

Der Einfluss von Handlungseffekten auf den Erwerb und die Ausführung von
Bewegungssequenzen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Philosophischen Fakultät III
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Vorgelegt von
Christian Stöcker
aus Würzburg

Würzburg
2002

Erstgutachter: Professor Dr. J. Hoffmann

Zweitgutachter: Professor Dr. H.-P. Krüger

Danksagung

Viele Menschen waren am Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt, die meisten von ihnen als klaglos und geduldig Tasten drückende Versuchspersonen. Ihnen möchte ich herzlich danken.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Joachim Hoffmann, der für Fragen und Diskussionen nicht nur über die Inhalte dieser Arbeit buchstäblich jederzeit zur Verfügung stand. Mehr Förderung, Anleitung und Unterstützung als mir von ihm zuteil wurde, hätte ich mir nicht wünschen können.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Lehrstuhls Psychologie III der Universität Würzburg, insbesondere Albrecht Sebald für fruchtbare Zusammenarbeit und die Programmierung von Experiment 1 und 2, sowie Wilfried Kunde und Andrea Kiesel für Anregungen und ausgiebige und hilfreiche Diskussionen.

Einige der in der vorliegenden Arbeit berichteten Experimente werden unter dem Titel „The Influence of Response-Effect Compatibility in a Serial Reaction Time Task“ im Quarterly Journal of Experimental Psychology veröffentlicht werden.

Würzburg, im Oktober 2002

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
1.1. <i>Lernen von Sequenzen in der Seriellen Wahlreaktionsaufgabe</i>	7
1.2. <i>Was wird in der seriellen Wahlreaktionsaufgabe gelernt?</i>	9
1.3. <i>Verschiedene Arten von Strukturbeschreibung</i>	9
1.4. <i>Experimentelle Belege für die Wirksamkeit unterschiedlicher Struktureigenschaften</i>	10
1.4.1. Statistische Strukturen	10
1.4.2. Relationale Strukturen	13
1.4.3. Räumliche und zeitliche Strukturen	14
1.5. <i>Reize, Reaktionen, Reaktionseffekte – was wird in SRT-Aufgaben verknüpft?</i>	15
1.5.1. Stimulus-Stimulus-Assoziationen	16
1.5.2. Reaktions-Reaktionen-Assoziationen	18
1.5.3. S-S- und R-R- Lernen als verzahnte oder parallele Prozesse	18
1.5.4. Task Integration: Status der Tonzählaufgabe	20
1.5.5. Lernen von Verhaltenseffekten – serielle Verknüpfung von Verhaltenszielen	22
1.6. <i>Zusammenfassung</i>	28
1.7. <i>Modelle motorischer Programmierung</i>	29
1.7.1. Sternberg et al. (1978)	30
1.7.2. Rosenbaum et al. (1984)	31
1.7.3. Rosenbaum et al. (1983), Ziebler, Hänel und Hoffmann (1988)	32
1.7.4. Klapp (1995)	34
1.7.5. Wann findet Programmierung statt?	35
1.7.6. Verhaltensziele und motorische Programmierung	36
1.8. <i>Ideomotorische Initiierung von Bewegungen: Experimentelle Belege</i>	38
1.8.1. Hommel (1996)	38
1.8.2. Kunde (2001)	39
1.9. <i>Zusammenfassung</i>	40
1.10. <i>Zielsetzung der vorliegenden Arbeit</i>	41
2. Experimente	42
2.1. <i>Experiment 1</i>	42
Methode	43
Ergebnisse	46
Diskussion	48
2.2. <i>Experiment 2</i>	50
Methode	51
Ergebnisse	53
Diskussion	56
Zusammenfassende Diskussion von Experiment 1 und 2	57
2.3. <i>Experiment 3</i>	61
Methode	62
Ergebnisse	64
Diskussion	69
2.4. <i>Experiment 4</i>	72
Methode	72

Ergebnisse	75
Diskussion	79
2.5. <i>Experiment 5</i>	83
Methode.....	83
Ergebnisse	84
Diskussion	89
2.6. <i>Experiment 6</i>	92
Methode.....	92
Ergebnisse	93
Diskussion	96
3. Allgemeine Diskussion.....	98
4. Literaturverzeichnis	104

1. Einleitung

Menschen lernen, bestimmte Bewegungen auszuführen, um bestimmte Ziele zu erreichen. Diese trivial klingende Aussage stellt in der experimentellen Psychologie, betrachtet man die Forschungsparadigmen, mit denen motorisches Lernen untersucht wird, anscheinend nach wie vor eine ungewöhnliche, ja eine exotische Position dar. Zwar gibt es zahlreiche Untersuchungen zur Kontrolle und Steuerung von Zielbewegungen, und auch einige Ansätze, die eine Repräsentation eines Zielzustandes explizit als Bestandteil eines Bewegungsplanes betrachten (z. B. Adams, Marshall & Bray, 1971). In den meisten Studien zur Übung und Ausführung von Bewegungssequenzen aber geht es nur um die Bewegung „an sich“, um die durch bestimmte Reize ausgelöste Spezifikation von Parametern wie Muskelspannungen, Gelenkstellungen etc. Diskutiert wird, ob bestimmte abstrakte Parameter wie Beschleunigung, Amplitude oder Richtung einer Bewegung „effektorunabhängig“ gelernt und umgesetzt werden können. Dabei wird aber übersehen, wofür diese Parameter in ihrer Gesamtheit stehen, welches Ergebnis sie, in entsprechender Kombination korrekt umgesetzt, zeitigen werden: Das durch den Handelnden angestrebte Ziel der Bewegung.

In der vorliegenden Arbeit soll ein Ansatz verfolgt werden, der dieser Zielorientiertheit menschlichen Handelns Rechnung trägt. Es soll im Einzelnen untersucht werden, welche Rolle die Effekte von Handlungen beim Lernen motorischer Sequenzen und bei ihrer Ausführung spielen. Dabei soll gezeigt werden, dass auch zunächst nicht als Handlungsziel repräsentierte Effekte zunehmend gezielt erzeugt werden, wenn sie bewegungskontingent eintreten, und dass sie dann wiederum nützlich und hilfreich für das Erlernen von Bewegungssequenzen werden; dass diese bewegungskontingenten Effekte auch den Erwerb von Bewegungsmustern erleichtern, die so komplex sind, dass sich Versuchspersonen schwer damit tun, sie auch nach ausgiebigem Training verbal oder anderweitig zu beschreiben; und dass sich bestimmte Eigenschaften der Bewegungseffekte darauf auswirken, ob sie diese nützliche Wirkung tatsächlich entfalten können oder nicht.

In einer weiteren Serie von Experimenten sollen die Mechanismen, die der Wirkung sensorischer Effekte bei der Planung und Ausführung von Bewegungsfolgen zugrunde liegen, genauer untersucht werden. An welcher Stelle des Stromes menschlicher Informationsverarbeitung werden sie wirksam? Sind vorweggenommene, antizipierte Effekte an der Vorprogrammierung bereits geübter, komplexer Bewegungen beteiligt? Erleichtern sie den Abruf von hochtrainierten Bewegungsmustern? Werden erwartete Effekte zur Kontrolle der korrekten Ausführung einer Bewegung genutzt? Auf diese Fragen soll im zweiten Teil der Arbeit eingegangen werden.

Zur Untersuchung der skizzierten Fragestellungen wurden zwei unterschiedliche Arten von experimentellen Paradigmen benutzt: Die so genannte Serielle Wahlreaktionsaufgabe und Trainingsparadigmen für kurze Sequenzen von Tastendrücken. Im Folgenden soll zunächst die Serielle Wahlreaktionsaufgabe („serial reaction time task“, SRT-task) kurz beschrieben und anschließend die Literatur in diesem Bereich selektiv dargestellt werden. Dabei geht es vor allem um die Frage, welche Arten von serieller Struktur in SRT-Aufgaben wirksam werden können, und welche Elemente einer zu bearbeitenden Reiz-Reaktions-Folge beim Lernen vorrangig miteinander verknüpft werden.

1.1. Lernen von Sequenzen in der Seriellen Wahlreaktionsaufgabe

Experimente, die sich der seriellen Wahlreaktionsaufgabe bedienen, folgen stets der gleichen Grundstruktur: Versuchspersonen werden aufeinanderfolgende Reize dargeboten, auf die mit zugeordneten Aktionen, üblicherweise Tastendrücken, reagiert werden soll. Die Reaktion auf einen aktuell dargebotenen Reiz löst die Darbietung des darauffolgenden Reizes aus, auf den wiederum reagiert werden muss, und so weiter. Um mit dieser Aufgabe Lernen zu untersuchen, werden die Reize nicht in einer zufälligen Reihenfolge dargeboten, sondern folgen einer vorgegebenen Struktur. Dabei kann es sich um eine feste Abfolge von Reizen handeln, die sich zyklisch wiederholt (z. B. Nissen & Bullemer; 1987, Stadler, 1992) oder um eine probabilistische Sequenz, deren Verlauf von bestimmten statistischen oder grammatikalischen Einschränkungen bestimmt wird (z. B. Cleeremans & McClelland 1991; Stadler, 1992). Reagieren Versuchspersonen längere Zeit auf eine solche strukturierte Reizsequenz, verringern sich die Reaktionszeiten mit zunehmender Übung stärker, als wenn eine Zufallssequenz dargeboten würde. Nach einer gewissen Trainingszeit wird üblicherweise eine Testphase eingeleitet, in der von der strukturierten zu einer zufälligen oder quasizufälligen Reizsequenz gewechselt wird. Dadurch steigen die Reaktionszeiten typischerweise wieder an. Dieser Anstieg wird als Maß für den Umfang des erworbenen sequenzspezifischen Wissens betrachtet.

Nissen und Bullemer (1987), und eine Reihe von anderen Autoren (z. B. Cohen, Ivry & Keele 1990; Stadler 1992; Willingham, Nissen & Bullemer 1989), berichten, dass der durch den Reaktionszeitgewinn dokumentierte Erwerb sequenzspezifischen Wissens nicht notwendigerweise mit verbalisierbaren, deklarativen Kenntnissen über die Struktur der Sequenz einhergeht. Wenn die Versuchspersonen nach der Bearbeitung der Aufgabe die Sequenz, beispielsweise in einer Generierungsaufgabe, in der der jeweils nächste Reiz vorhergesagt werden muss, wiedergeben sollen, tun sie sich dabei oft schwer oder sind überhaupt nicht dazu in der Lage. Die SRT-Aufgabe wird daher, neben anderen Paradigmen, zum Beispiel der Kontrolle

dynamischer Systeme (z. B. Berry & Broadbent, 1984), dem Kovariationslernen (z. B. Lewicki, Czyzewska, & Hoffman, 1987) oder Grammatiklernen (z. B. Reber, 1967, 1969, 1976) häufig als eine Situation bezeichnet, in der „implizit“ gelernt werden kann, das heißt, es soll sich eine Dissoziation zwischen indirekt, etwa über Reaktionszeiten und Fehler messbarem, implizitem Wissen und direkt, über Befragung und Generierungs- oder Klassifikationsaufgaben messbarem explizitem Wissen zeigen lassen. Diese Dissoziation wird als Hinweis auf die Existenz voneinander unabhängiger Lernprozesse betrachtet, die von einigen Autoren auch mit unterschiedlichen neuronalen Strukturen in Zusammenhang gebracht werden (siehe z. B. Goschke, Friederici, & Kotz, 2001; Keele, Ivry, Hazeltine, Mayr & Heuer, 1998 – Technical Report).

Die Experimente, die zu dieser Ansicht geführt haben, und ihre Interpretation sind aber nicht unumstritten. Es gibt gewichtige Argumente für die Ansicht, dass Versuchspersonen durchaus fragmentarisches „explizites“ Wissen über Sequenzeigenschaften wie Auftretenshäufigkeiten einzelner Reize/Reaktionen oder Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Reizen erwerben. Diskutiert wird daher das Problem angemessener Tests für das „explizite“ Wissen (Perruchet & Amorim, 1992; Shanks & St. John, 1994). Nur wenn sicher gestellt werden kann, dass ein Test wirklich sensitiv für das gesamte zur Verfügung stehende „explizite“ Wissen ist, kann laut Shanks und St. John (1994) eine gemessene Dissoziation zwischen zwei Testergebnissen überhaupt interpretiert werden. Gerade dieses „Sensitivitäts-Kriterium“ sehen sie aber in Studien zum seriellen Lernen nicht erfüllt. In vielen Studien zeigt sich außerdem eine Korrelation zwischen indirekten und direkten Wissensmaßen.

Die Debatte über die Frage, ob in SRT-Aufgaben „implizites“ Lernen beobachtet werden kann, soll in der vorliegenden Arbeit nicht im Vordergrund stehen. Da das zu untersuchende Thema ganz allgemein das Erlernen motorischer Sequenzen ist, soll stattdessen eine fundamentalere Frage betrachtet werden, und zwar welche Art von Information in SRT-Aufgaben überhaupt gelernt wird, sei es nun „implizit“ oder „explizit“. Nach wie vor ist umstritten, welche Elemente Versuchspersonen nutzen können, um in SRT-Aufgaben zunehmend schneller auf auftretende Reize zu reagieren. Lernen sie, auftauchende Reize frühzeitig vorherzusagen und somit schneller zu identifizieren? Bilden sich Verknüpfungen zwischen aufeinanderfolgenden Reaktionen? Können sequentielle Strukturen unabhängig vom ausführenden Effektor gelernt und repräsentiert werden? Werden Beziehungen zwischen Reaktionen und darauffolgenden Reaktionssignalen gelernt? Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über die für diese Fragen relevante Literatur gegeben werden.

1.2. Was wird in der seriellen Wahlreaktionsaufgabe gelernt?

Die Frage nach dem „Lernstoff“ der seriellen Wahlreaktionsaufgabe lässt sich auf zwei unterschiedlichen Ebenen beantworten. Auf der einen Seite ist untersucht worden, welche Strukturen in den aufeinanderfolgenden Elementen einer Reiz- oder Reaktionssequenz für eine Beschleunigung der Reaktionen genutzt werden können. Unterschiedliche Arten, solche Strukturen zu betrachten und die Auswirkungen unterschiedlicher Arten von Struktur werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

Auf der anderen Seite muss die Frage gestellt werden, welche Elemente der Ereignissequenz, die eine SRT-Aufgabe darstellt, überhaupt miteinander verknüpft werden. Grundsätzlich lassen sich Reize, Reaktionen und Handlungseffekte unterscheiden. Zwischen all diesen Elementen könnten Verknüpfungen gelernt werden. Experimentelle Arbeiten, die sich mit der Frage, welche Verknüpfungen dem seriellen Lernen zugrunde liegen, befasst haben, werden in Abschnitt 1.5. dargestellt.

1.3. Verschiedene Arten von Strukturbeschreibung

Versuchspersonen in SRT-Aufgaben lernen, die serielle Struktur zu nutzen, um zukünftige Ereignisse vorherzusagen. Um die strukturellen Abhängigkeiten innerhalb einer Ereignissequenz zu beschreiben, werden verschiedene Arten von Struktur diskutiert (für einen Überblick siehe Hoffmann & Koch, 1998).

Breiter Konsens herrscht im Bezug auf die Annahme, dass statistische Strukturen gelernt werden können, die sich durch die klassische Informationstheorie beschreiben lassen (Attneave, 1974; Shannon & Weaver, 1949). Dieser Ansatz misst die innerhalb einer Ereignissequenz bestehende Vorhersagbarkeit über die Berechnung der Auftretenshäufigkeit beziehungsweise der Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse. Als Maß für die Vorhersagbarkeit einzelner Ereignisse wird die *Redundanz* berechnet, die eine Ungleichverteilung in der Auftretenshäufigkeit der möglichen Ereignisse beschreibt. Je größer die Redundanz desto geringer ist die Unsicherheit über zukünftig auftretende Ereignisse. In der Sequenz ABCDBCDB beispielsweise kommt der Reiz A nur einmal, der Reiz B aber dreimal vor. Dies erhöht die Redundanz, weil es bei wiederholter Darbietung der Sequenz ermöglicht, vorherzusagen, dass der Reiz A nur in einem Achtel der Fälle auftauchen wird, der Reiz B aber in drei Achteln aller Fälle. Ebenso wie für einzelne Elemente die Redundanz erster Ordnung berechnet werden kann, lässt sich für Paare von Ereignissen die Redundanz zweiter Ordnung berechnen, für Reiztripel die Redundanz dritter

Was wird in der seriellen Wahlreaktionsaufgabe gelernt?

Ordnung und so weiter. Wird die obige Beispielsequenz zyklisch wiederholt, erscheint das Reizpaar BC pro Sequenzdurchgang zweimal, das Reizpaar BA hingegen nur einmal. Es kann also bei Erscheinen von B vorhergesagt werden, dass in zwei Drittel der Fälle als nächster Reiz C auftauchen wird. Dies erhöht die Redundanz zweiter Ordnung. Werden zwei Vorläuferreize zur Vorhersage genutzt, kann beispielsweise beim Erscheinen des Reizpaares BC sicher vorausgesagt werden, dass als nächstes der Reiz D folgen wird. Dies erhöht die Redundanz dritter Ordnung. In jeder beliebigen Sequenz mit n Elementen ist spätestens bei Berücksichtigung von $n-1$ Vorläufern vollständige Vorhersagbarkeit gegeben.

Während die klassische Informationstheorie Ereignissequenzen nur auf die Häufigkeit einzelner Ereignisse oder längerer Ereignisketten hin untersucht, bezieht die Strukturelle Informationstheorie nach Buffart, Leeuwenberg und Restle bedeutsame Beziehungen ein, die zwischen dem Auftreten von Elementen bestehen (z. B. Buffart & Leeuwenberg, 1983). Hierarchisch organisierte Sequenzen lassen sich mit Hilfe von Operationen wie Wiederholung, Spiegelung, Transposition, etc. beschreiben. In der Beispielsequenz ABCDBCDB lassen sich etwa die letzten sechs Glieder als Wiederholung der Kette CDB zusammenfassen. Betrachtet man die Bezeichnungen A, B, C und D als horizontal verteilte Bildschirmlokationen, an denen Reize erscheinen können, könnten die ersten vier Glieder der Beispielsequenz als Transposition des Reizortes von links nach rechts beschrieben werden.

Ein weiteres organisierendes Merkmal von Ereignissequenzen ist die räumliche und zeitliche Verteilung der Elemente. Durch zeitlich oder räumlich nicht gleichabständige Darbietung könnten etwa in der Sequenz ABCDBCDB unterschiedliche Teilstücke als zusammengehörig hervorgehoben werden: zum Beispiel AB CDB CDB oder A BCD BCD B.

Es existiert experimentelle Evidenz, die zeigt, dass alle drei Arten von Struktureigenschaften genutzt werden können, um Ereignisse innerhalb von Sequenzen vorherzusagen. Im folgenden Abschnitt werden einige wesentliche Studien kurz dargestellt.

1.4. Experimentelle Belege für die Wirksamkeit unterschiedlicher Struktureigenschaften

1.4.1. Statistische Strukturen

In den ersten Experimenten zum seriellen Lernen, die mit der SRT-Aufgabe durchgeführt wurden, spielte die Struktur der dargebotenen Sequenzen als experimenteller Faktor noch keine eigenständige Rolle. Es wurde nur zwischen festen, sich zyklisch wiederholenden Sequenzen und Zufallssequenzen unterschieden. In der eingangs bereits erwähnten Studie von Nissen und

Bullemer (1987) leuchtete bei jedem Durchgang ein Sternchen an einer von vier möglichen, horizontal angeordneten Positionen auf einem Computerbildschirm auf. Unterhalb jedes Reizortes war eine Reaktionstaste angebracht, die so schnell wie möglich gedrückt werden sollte, wenn dort ein Sternchen aufleuchtete. Jedem Sternchen war also eine Reaktionstaste zugeordnet.

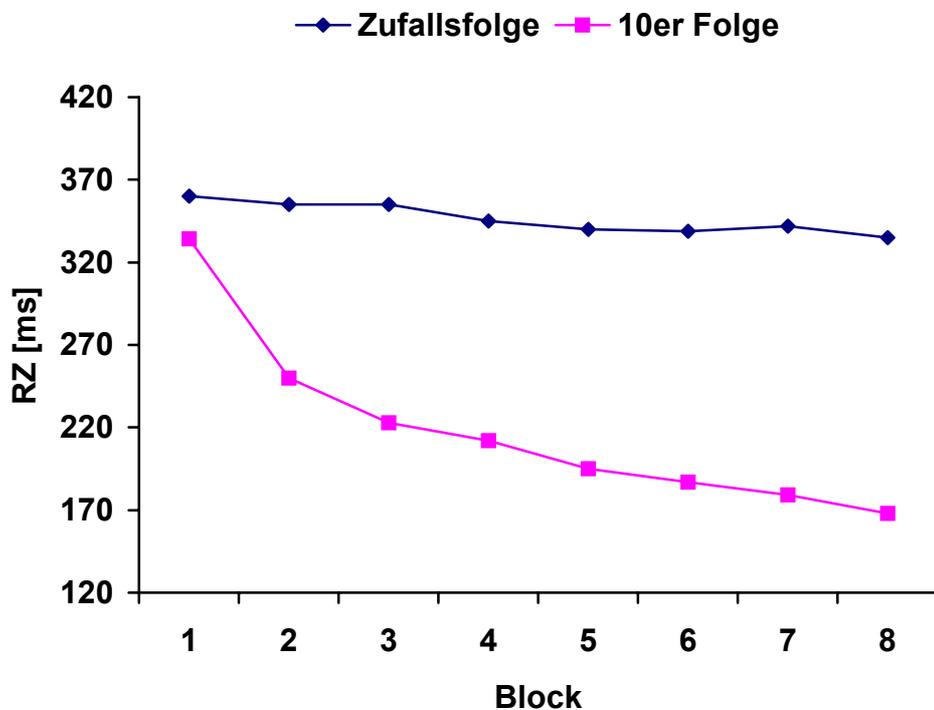


Abbildung 1: Reaktionszeitverlauf in der Studie von Nissen und Bullemer (1987).

Wenn die Reihenfolge der auftauchenden Sternchen - und damit auch die Reihenfolge der auszuführenden Reaktionen - durch eine feste, sich wiederholende Sequenz von zehn Reizorten vorgegeben war, nahmen die Reaktionszeiten im Verlauf des Experiments stark ab. Wenn man die vier Positionen, an denen Sternchen auftauchen konnten, von links nach rechts mit A, B, C und D benennt, hatte die verwendete Sequenz folgende Form: DBCACBDCBA. In einer Vergleichsgruppe mit zufällig generierten, sich nicht wiederholenden Reizabfolgen reduzierten sich die Reaktionszeiten nur minimal (Abb.1, aus Nissen & Bullemer, 1987). Die Reaktionszeitverkürzung bei Darbietung der strukturierten Sequenz ist also offensichtlich ein Ausdruck des Erwerbs sequenzspezifischen Wissens, kein genereller Übungseffekt.

Cohen, Ivry und Keele (1990, Experiment 3 und 4) untersuchten den Einfluss ein- und mehrdeutiger Reizübergänge auf die Lernleistung, während sie gleichzeitig eine Gleichverteilung der einzelnen Sequenzelemente sicherstellten. In ihrer Studie mussten die Versuchspersonen auf Reize reagieren, die an einer von drei, vier oder fünf möglichen Bildschirmpositionen auftauchen konnten. Auch hier war jedem Reizort eine räumlich korrespondierende Reaktionstaste

zugeordnet. Verwendet wurden feste, sich wiederholende Sequenzen aus fünf oder sechs Reizlokationen. Die Autoren unterschieden drei Arten von Sequenzen: „Eindeutige“ (*unique*) Sequenzen, bei denen jede Reizlokation nur einen Nachfolger hat (z. B. ABCDE), „mehrdeutige“ (*ambiguous*) Sequenzen, bei denen jede Lokation zwei verschiedene Nachfolger haben kann (z. B. ACBCAB) und hybride (*hybrid*) Sequenzen, in denen sowohl ein- als auch mehrdeutige Übergänge vorkamen (z. B. ADBCAB). Im letzten Beispiel gibt es zwei eindeutige (DB und CA) und zwei mehrdeutige (nach A und nach B) Übergänge. Parallel zu der Reaktionsaufgabe hatten die Versuchspersonen eine Ablenkaufgabe zu bewältigen, die darin bestand, von zwischen den Durchgängen dargebotenen Tönen jeweils entweder die hohen oder die tiefen Töne zu zählen. Die Gesamtzahl musste dann am Ende jedes experimentellen Blocks berichtet werden. Die Hypothese der Autoren war, dass das Lernen an den unterschiedlichen Übergängen von der Distraktoraufgabe in unterschiedlicher Weise beeinflusst werden würde. In der Tat zeigten Cohen et al., dass eindeutige und hybride Sequenzen auch dann gelernt wurden, wenn gleichzeitig die Distraktoraufgabe bearbeitet werden musste, während bei mehrdeutigen Sequenzen kein signifikanter Lernzuwachs stattfand. Ohne Distraktoraufgabe wurden alle drei Arten von Sequenzen gelernt.

Andere Autoren (z. B. Frensch, Buchner & Lin, 1994; Keele & Jennings, 1992; Reed & Johnson, 1994) konnten aber später zeigen, dass auch Sequenzen mit mehrdeutigen Übergängen trotz einer gleichzeitig zu bearbeitenden Ablenkaufgabe gelernt wurden. Dabei war der Lerneffekt für eindeutige Übergänge allerdings deutlicher als der für mehrdeutige.

Cleeremans und McClelland (1991) arbeiteten mit probabilistischen Sequenzen. Die Versuchspersonen bearbeiteten in ihrer Studie keine festen Ereignisfolgen, sondern aufgrund grammatikalischer Einschränkungen ad hoc generierte Reizserien. Die durch die Grammatik vorgegebene Struktur wurde dabei in unregelmäßigen Abständen durch eingestreute zufallsgenerierte Reize durchbrochen. Die Ergebnisse zeigen, dass auf grammatische Reize schneller reagiert wurde als auf nicht-grammatische. Eine genaue Datenanalyse zeigte, dass bei der Vorhersage des jeweils nächsten Reizes durch die Vpn bis zu drei Vorläufer berücksichtigt wurden. Ketten von vier Vorläufern wurden aber selbst nach intensivem Training über mehrere Tage hinweg nicht zur Vorhersage genutzt.

Zu einem ähnlichem Ergebnis gelangten auch Remillard und Clark (2001). In ihren Experimenten lernten die Versuchspersonen maximal drei Vorläufer zur Vorhersage zu nutzen. Die geschilderten Experimente zeigen, dass statistische Strukturen in Ereignissequenzen einen massiven Einfluss auf das Ausmaß des sequentiellen Lernens haben. Versuchspersonen nutzen Ungleichverteilungen nicht nur bei den absoluten Auftretenshäufigkeiten einzelner Ereignisse, sondern können auch Ketten von Ereignissen zur Vorhersage nachfolgender Ereignisse nutzen.

1.4.2. Relationale Strukturen

Im Gegensatz zu der Vielzahl von Arbeiten, die sich mit dem Einfluss statistischer Vorhersagbarkeit auf das serielle Lernen beschäftigt haben (der obige Überblick ist nur eine unvollständige Auswahl), beschränkt sich die systematische Untersuchung des Einflusses relationaler Strukturen auf einige wenige Studien.

Hoffmann und Sebald (1996) waren die ersten, die diesen Einfluss bei kontrollierter statistischer Struktur gezielt untersuchten. Ihre Versuchspersonen reagierten in jedem Durchgang mit einem von sechs möglichen Tastendrücken auf einen von sechs Buchstaben. Die Buchstaben K, L, M, N, O und P wurden aufgrund ihrer alphabetischen Reihenfolge zu Tripeln angeordnet, etwa KLM oder MNO. Die Sequenz setzte sich aus diesen Tripeln und bestimmten Transformationen dieser Tripel zusammen, etwa Spiegelungen (KLM \rightarrow MLK) oder Wiederholungen (KLM \rightarrow KLM). In einer korrespondierenden Reaktionssequenz wurden dieselben Transformationen auf Tripel von entsprechend angeordneten Tastendrücken angewendet (z. B. Taste 1-2-3 \rightarrow 3-2-1; 1-2-3 \rightarrow 1-2-3). Zusätzlich wurden eine nicht regelhafte Reiz- und eine nicht regelhafte Reaktionssequenz konstruiert. Diese regelhaften und nicht regelhaften Sequenzen ließen sich so miteinander kombinieren, dass eine orthogonale Variation der relationalen Strukturen in den Reiz- und Reaktionsfolgen möglich wurde. Durch eine bestimmte Reiz-Reaktionszuordnung rief die regelhafte Reizsequenz eine regelhafte Reaktionssequenz hervor, durch eine andere Zuordnung wurde die regelhafte Reizsequenz mit einer nicht regelhaften Reaktionssequenz verknüpft und so weiter. Die Ergebnisse zeigen, dass relationale Strukturen vor allem in den Reaktionssequenzen einen deutlichen Einfluss auf das serielle Lernen haben. Die Autoren ziehen die Schlussfolgerung, dass relationale Strukturen in den Reaktionssequenzen die Ausbildung motorischer Programme begünstigen, indem nebeneinander liegende Tastendrücke schneller zu Einheiten zusammengefasst werden.

Koch und Hoffmann (2000) wendeten eine ähnliche Methode an und kombinierten stark oder schwach relational strukturierte Sequenzen von Ziffern mit stark oder schwach strukturierten Reaktionsfolgen, wobei die statistische Struktur der Sequenzen wiederum konstant gehalten wurde. Auch hier zeigte sich, dass die relationalen Muster vor allem in den Reaktionssequenzen genutzt werden konnten. In einem zweiten Experiment zeigten die Autoren, dass in die Sequenz eingestreute längere Pausen das Lernen der hochstrukturierten Reaktionssequenzen behinderten, wenn diese Pausen die relationalen Muster durchbrachen. Dieses Ergebnis wurde als Hinweis darauf interpretiert, dass relationale Muster das *chunking*, also das Zusammenfassen von Einzelelementen der Reaktionssequenz zu größeren Einheiten, begünstigen. Die ebenfalls als Chunking-begünstigend betrachtete Unterteilung einer Sequenz in Untersequenzen durch

regelmäßig eingestreute Pausen (siehe nächster Abschnitt) trat daher möglicherweise in Wettbewerb zum Chunking durch relationale Muster. In einem weiteren Experiment wurde die Anordnung der einzelnen relationalen Muster innerhalb der Sequenz variiert, so dass eine hierarchische Strukturierung entweder nahe gelegt wurde oder nicht nahe gelegt wurde. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass einmal gebildete *chunks* tatsächlich im Sinne einer hierarchischen Struktur zu Chunks höherer Ordnung zusammengefasst werden können.

Die beschriebenen Arbeiten belegen klar, dass auch unabhängig von statistischer Struktur relationale Strukturen gelernt werden können.

1.4.3. Räumliche und zeitliche Strukturen

Stadler (1993) untersuchte den Einfluss zeitlicher Strukturierung auf das serielle Lernen. Er variierte das Reaktions-Stimulus Intervall (RSI) in einer SRT-Aufgabe. Einzelne Intervalle innerhalb der Reizsequenz waren länger als die übrigen. Die Sequenz war eine Kombination aus einer Zufallssequenz und einer festen Sequenz gleicher Länge, die abwechselnd präsentiert wurden. Es gab drei verschiedene Bedingungen im Bezug auf die RSIs: In einer Bedingung wurde das RSI über das gesamte Experiment hinweg konstant gehalten, in einer zweiten Bedingung waren längere RSIs (2000 statt 400 Millisekunden) so platziert, dass sie die zufälligen und die festen Sequenzabschnitte voneinander abgrenzten, in einer dritten Bedingung waren die längeren RSIs zufällig verteilt, so dass immer wieder andere Abschnitte voneinander abgegrenzt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die regelmäßig eingefügten längeren RSIs das Lernen der festen Sequenz begünstigten, während die zufällig eingestreuten längeren Pausen die Lernleistung im Vergleich zur Kontrollbedingung verringerten. Konsistente Unterteilung einer zu lernenden Sequenz kann also Lernen begünstigen.

Zu einem vergleichbaren Ergebnis gelangten, wie oben beschrieben, Koch und Hoffmann (2000, Experiment 2). Durch eingestreute Pausen in einer Sequenz, die relational stark strukturiert war, wurde das Ausmaß seriellen Lernens verringert, wenn diese Pausen die relationalen Muster „aufbrachen“.

Belege für den Einfluss räumlicher Muster auf das serielle Lernen erbrachte Zießler (1995). Die Versuchspersonen reagierten mit den Zeige- und Mittelfingern beider Hände auf Buchstaben, die auf einem Bildschirm präsentiert wurden. Eine Folge von sechs Buchstaben wurde zyklisch wiederholt. Variiert wurde der Präsentationsort der Buchstaben: In einer Bedingung (B1) wurden die Reize stets an der gleichen zentralen Bildschirmposition präsentiert, in einer zweiten Bedingung (B2) gab es auf dem Bildschirm sechs horizontal angeordnete Lokationen, an denen Reize auftauchen konnten. Der erste Buchstabe der Sequenz wurde an der äußersten linken

Bildschirmposition präsentiert, der zweite Buchstabe an der Position rechts von der ersten und so weiter. Der Reizort wanderte also im Laufe einer Sequenzdarbietung von links nach rechts über den Bildschirm und sprang dann bei der Wiederholung der Sequenz wieder an den äußersten linken Bildschirmort zurück. In einer dritten Bedingung (B3) war die Darbietung der Sequenz auf die gleiche Weise räumlich über den Bildschirm verteilt, aber der Startreiz, der am linken Bildschirmrand dargeboten wurde, hatte eine andere Position innerhalb der Sequenz. Es wurde also die gleiche Buchstabensequenz dargeboten, nur dass der Sprung vom rechten zum linken Bildschirmrand an einem anderen Punkt innerhalb der Sequenz auftrat. In der dritten Bedingung wurde durch den Sprung ein relationales Muster (die Wiederholung eines Reizpaares) durchbrochen, so dass zu erwarten war, dass das Lernen in dieser Bedingung erschwert sein würde. Genau dieses Ergebnis trat auch ein: In B2, wo die relationale Struktur der Sequenz durch die räumliche Darbietung betont wurde, wurde am meisten gelernt. Eine zusätzliche Auswertung der Interresponse-Zeiten ergab auch, dass die angesprochene relationale Struktur sich tatsächlich auf die Bearbeitung der Sequenz durch die Versuchspersonen auswirkte. In B3, wo diese relationale Struktur durch den Sprung von links nach rechts verschleiert wurde, ergab sich trotz identischer motorischer Sequenz ein anderes Muster der Interresponse-Zeiten, und es zeigte sich am wenigsten serielle Lernen. Die räumliche Strukturierung der Sequenz wirkte sich also auf die Bearbeitung der Aufgabe aus und beeinflusste, wie die zeitliche Strukturierung bei Koch und Hoffmann (2000, Experiment 2), die Wirksamkeit der relationalen Muster innerhalb der Sequenz. Die beschriebenen Experimente zeigen, dass räumliche und zeitliche Muster in der Reizpräsentation das serielle Lernen beeinflussen. Es scheint plausibel, dass sowohl dieser Einfluss als auch der Einfluss relationaler Strukturen in SRT-Aufgaben mit einem Mechanismus zusammenhängen, der längere Sequenzen in Untersequenzen aufteilt und diese zu Chunks zusammenfasst.

1.5. Reize, Reaktionen, Reaktionseffekte – was wird in SRT-Aufgaben verknüpft?

Strukturen entstehen durch Verknüpfung von Einzelelementen, wobei diese Verknüpfungen durch unterschiedliche Merkmale einer Ereignissequenz beeinflusst werden, wie oben gezeigt. Welche Elemente der Ereignissequenzen sind es aber, die miteinander verknüpft werden? Werden aktuelle Reize zur Vorhersage zukünftiger Reize benutzt, Reaktionen miteinander verkettet oder Reaktions-Reiz-Verbindungen gelernt? Die unterschiedlichen in der Literatur beschriebenen Versuche, diese Fragen zu beantworten, werden in den folgenden Abschnitten jeweils kurz dargestellt. Dabei wird Evidenz für Stimulus-Stimulus wie auch für Reaktions-

Reaktions-Verkettung präsentiert, daneben werden Arbeiten dargestellt, die belegen, dass verzahntes Lernen mehrerer strukturierter Ereignissequenzen möglich ist, was auch und insbesondere für die zusätzliche Tonsequenz gilt, die die in SRT-Experimenten häufig verwendete Tonzählaufgabe mit sich bringt. Im Anschluss werden neuere Ansätze dargestellt, die zeigen, dass bisherige Modellvorstellungen das Primat der Zielorientiertheit menschlichen Verhaltens außer Acht lassen. Experimente, die die Bedeutung von Reaktions-Effekt-Beziehungen und die Verknüpfung von Verhaltenszielen in den Vordergrund stellen, werden skizziert.

1.5.1. Stimulus-Stimulus-Assoziationen

Cohen, Ivry und Keele (1990, Experiment 2) ließen Versuchspersonen zyklisch wiederholte kurze Tastendrucksequenzen ausführen. Gleichzeitig waren hohe oder tiefe Töne zu zählen. Auf an drei horizontal angeordneten Positionen erscheinende Reize musste mit einem räumlich kompatiblen Tastendruck reagiert werden. Die Tasten mussten zunächst mit dem Zeige- Mittel und Ringfinger der rechten Hand bedient werden. In einer Transferphase wurde den Versuchspersonen entweder weiterhin die strukturierte Reizsequenz dargeboten oder es wurde zu einer Zufallssequenz gewechselt. Der kritische Wechsel in der Transferphase betraf den zu benutzenden Effektor: Während in der ersten Hälfte mit den Fingern der rechten Hand reagiert werden musste, waren in der zweiten Hälfte alle Tasten mit dem rechten Zeigefinger zu bedienen, so dass der ganze Arm bewegt werden musste, um die Aufgabe durchzuführen. In der Gruppe, die zu einer Zufallssequenz wechselte, stiegen die mittleren RTs deutlich an, während in der Gruppe, in der die Struktur beibehalten wurde, praktisch vollständiger Transfer von der Finger- auf die Armbewegung zu beobachten war. Die Autoren interpretieren dies als Beleg dafür, dass die Repräsentation, die dem impliziten seriellen Lernen zugrunde liegt, effektorunabhängig ist. Ein vergleichbares Ergebnis fanden Keele, Jennings, Jones, Caulton und Cohen (1995). Obwohl die Autoren zu dieser Frage nicht explizit Stellung beziehen, machen diese Resultate einen auf der unmittelbaren Verknüpfung aufeinander folgender Reaktionen basierenden Lernmechanismus unwahrscheinlich.

Eine direkte Überprüfung der Hypothese, dass serielles Lernen auf der Verknüpfung und Vorhersage von Reizereignissen basiert, strebten Howard, Mutter und Howard an (1992). Sie forderten Versuchspersonen auf, die auf dem Bildschirm dargebotenen Reize aufmerksam zu beobachten, ohne dass auf die sequentielle Natur des Materials hingewiesen wurde. Eine weitere Gruppe führte mit dem gleichen Reizmaterial eine normale SRT-Aufgabe durch. In einer Testphase, in der beide Gruppen mit Tastendrücken auf die Reize reagieren mussten, zeigten die

Versuchspersonen, die bisher nur beobachtet hatten, größere Lerneffekte als diejenigen, die die motorische Sequenz bereits einige Blöcke lang ausgeführt hatten. Die Ergebnisse dieser Studie sind allerdings angezweifelt worden. So weisen etwa Kelly und Burton (2001) darauf hin, dass Howard et al. (1992) nur mit der kürzeren von zwei verwendeten Sequenzen einen leistungsfördernden Effekt der Beobachtung fanden. Außerdem kritisieren sie, dass die Versuchspersonen in der Beobachtungsgruppe in direkten Tests des Sequenzwissens signifikant besser abschnitten als die Gruppe, die tatsächlich reagiert hatte. Es lässt sich also nicht ausschließen, dass der Wissenserwerb in der Beobachtungsgruppe durch andere Faktoren, etwa das Ausmaß expliziten Wissens, vermittelt wurde. In ihrer eigenen Studie konnten Kelly und Burton (2001) in zwei Experimenten, einem mit einer ebenfalls räumlichen Sequenz und einem mit einer Farbfolge, kein serielles Lernen bei Versuchspersonen nachweisen, die die Sequenz nur beobachtet hatten. Sie schlussfolgern: „[...] implicit learning in the SRT task may require action as well“ (Kelly & Burton, 2001, p. 22).

Frensch und Miner (1995) variierten das Reizmaterial innerhalb einer SRT-Aufgabe. Sie kontrastierten strukturell identische Sequenzen von Buchstaben und sinnlosen grafischen Symbolen. Ein erstes Experiment zeigt einen deutlichen Einfluss der Art der Reize: Mit Buchstaben wurde sehr viel mehr über die Sequenz gelernt als mit bedeutungslosen Symbolen. In einem weiteren Experiment wurden Vertrautheit und das Vorhandensein eines phonologischen Labels für die einzelnen Reize variiert. Ein Teil der Versuchspersonen musste die grafischen Symbole vor Beginn des Experimentes mehrmals abzeichnen, ein Teil wurde aufgefordert, sich für jedes Symbol einen kurzen „Namen“ auszudenken. Sowohl die Vertrautheit der Symbole als auch das Vorhandensein eines phonologischen Labels wirkten sich auf die Lernleistung aus. Frensch und Miner interpretieren dies als Hinweis auf die Beteiligung der beiden von Baddley und Hitch (1974) benannten „Sklavensysteme“ des Arbeitsgedächtnisses, der phonologischen Schleife und des visuell-räumlichen Pfades. Sie gehen also von einer Verknüpfung von Reizereignissen im Arbeitsgedächtnis als Grundlage des seriellen Lernens aus. Hierzu lässt sich kritisch anmerken, dass das Vorhandensein eines phonologischen Labels auch reaktionsseitig Auswirkungen haben dürfte: Die subvokale Benennung des jeweils aktuellen Reizes kann ebenso als weitere Reaktionssequenz interpretiert werden, was wiederum für einen Anteil von Reaktionsverknüpfung am seriellen Lernen sprechen würde. Im nächsten Abschnitt werden einige Studien dargestellt, die die Bedeutung der Reaktionsfolge für das Lernen in einer SRT-Aufgabe herausstellen.

1.5.2. Reaktions-Reaktions-Assoziationen

Einen ersten Hinweis auf die Bedeutung von Reaktions-Reaktions-Verknüpfungen für das serielle Lernen lieferten bereits die Ergebnisse des oben beschriebenen Experimentes von Hoffmann und Sebold (1996): Verstärkte relationale Struktur führte nur dann zu ausgeprägterem Sequenzlernen, wenn die Strukturen die Reaktionssequenz betrafen, nicht aber, wenn die Struktur der Reizsequenz manipuliert wurde.

Explizit zum Forschungsgegenstand gemacht wurde diese Frage von Nattkemper und Prinz (1997). Sie benutzten in einer SRT-Aufgabe Buchstaben als Reize und Tastendrucke als Reaktionen, wobei jedem Tastendruck zwei Buchstaben zugeordnet waren (Experiment 1). Dies eröffnet die Möglichkeit, sensorische Abweichler in eine feste Sequenz einzustreuen, die entweder die an dieser Stelle zu erwartende motorische Reaktion aufrufen oder einen motorischen Abweichler auslösen. Die Ergebnisse zeigen, dass abweichende Reizereignisse nur dann zu einer Erhöhung der Reaktionszeiten führen, wenn sie auch eine andere Reaktion erforderten. Mit anderen Worten: In diesem Experiment scheint die Repräsentation der Reaktionssequenz der Verhaltenssteuerung zugrunde zu liegen, da Abweichungen in der Reizsequenz allein nicht zu Leistungseinbußen führten.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgten Rüsseler und Rösler (2000). Auch in ihren Experimenten gab es in festen Sequenzen eingestreute Abweichler, sowohl rein sensorisch als auch sensorisch und motorisch nicht strukturgemäße Reize. Dabei wurden EEG-Daten erhoben und ereigniskorrelierte Potentiale (ERPs) gemessen. Nach Bearbeitung der Aufgabe wurden die Versuchspersonen mittels Nachbefragungsaufgaben in „explizite“ und „implizite“ Lerner aufgeteilt. Das Ergebnismuster der ERPs war für die explizite und die implizite Gruppe hinsichtlich der beiden Arten von Abweichlern (perzeptuell oder sensorisch) unterschiedlich. Es zeigte sich, dass bestimmte, als „perzeptuell“ interpretierbare EEG-Komponenten nur bei den expliziten Lernern messbar waren, während die von motorischen Abweichlern provozierten ERPs in beiden Gruppen gleichermaßen auftraten. Dies wird von den Autoren als Hinweis darauf interpretiert, dass es sich bei implizitem Sequenzlernen um motorisches Lernen handeln muss.

1.5.3. S-S- und R-R-Lernen als verzahnte oder parallele Prozesse

Eine Möglichkeit zur Interpretation der bisher dargestellten widersprüchlichen Ergebnisse besteht in der Annahme, dass Folgen von S-R-Zuordnungen gelernt werden. In einem Transferexperiment von Willingham, Nissen und Bullemer (1989) wurde die gleiche Reaktionsfolge durch zwei unterschiedliche Stimulussequenzen hervorgerufen. In einer

Trainingsphase mussten die Versuchspersonen auf die Farbe dargebotener Sternchen reagieren, in der Transferphase auf den Ort, an dem die Sternchen auftauchten. Obwohl die Farbsequenz und die Lokationssequenz die gleiche Abfolge von zehn Reaktionen auslösten, fand zwischen der Trainings- und der Transferphase kein Transfer statt. Die Autoren ziehen den Schluss, dass das, was die Versuchspersonen lernen, sowohl sensorische als auch motorische Information beinhaltet: „What is learned may be thought of as a series of condition-action statements mapping stimuli onto responses“ (Willingham et al. 1989, S. 1058).

Fendrich, Healy und Bourne (1991) ließen Versuchspersonen eine große Anzahl von Sequenzen von je drei Tastendrücken auf dem Nummernblock einer PC-Tastatur wiederholt ausführen und prüften in einer späteren Transferphase die Behaltensleistung. Experiment 1 zeigte, dass Sequenzen, die in der Erwerbsphase fünfmal ausgeführt worden waren, noch einen Monat später schneller initiiert werden konnten, als neue Kontrollsequenzen. In Experiment 2 wurde eine andere Art von Transferphase eingeführt, in der durch die Benutzung zweier unterschiedlicher Tastatur-Layouts drei unterschiedliche Arten von Sequenz bearbeitet werden mussten: Solche, die motorisch mit bereits trainierten Sequenzen übereinstimmten, aber durch neue Reize aufgerufen wurden, solche, bei denen die Reizsequenz bekannt war, aber eine neue motorische Sequenz ausgeführt werden musste, und vollständig neue Sequenzen. Sowohl die Wiederholung perzeptueller als auch die Wiederholung motorischer Komponenten führte zu einer verbesserten Leistung in der Transferphase, wobei sich die Ersparnisse bei Wiederholung des motorischen Musters auf die Initiierung der Sequenzen, also die Zeit, die nach der Reizdarbietung bis zur Registrierung des ersten Tastendrucks in der Sequenz verstrich, beschränkten, während sich für die Ausführung nach dem ersten Tastendruck keine bedeutsamen Unterschiede ergaben. Die Autoren ziehen die Schlussfolgerung, dass sowohl auf der Seite der Wahrnehmung als auch auf der Seite der motorischen Programmierung Ersparnisse durch vorangegangenes Training möglich sind.

Goschke (1998) konnte mit einer speziell für diesen Zweck entwickelten Aufgabe ebenfalls unabhängiges Lernen von Reiz- und Reaktionssequenzen zeigen. In seinem Experiment gab es keine feste Reiz-Reaktionszuordnung, sondern zu Beginn jeden Durchgangs wurde eine neue Zuordnung auf dem Bildschirm eingeblendet. Vier Buchstaben wurden jeweils vier Reaktionstasten zugeordnet. Die Reaktionssignale selbst waren akustische Darbietungen des jeweiligen Targetbuchstaben, auf die hin die im aktuellen Durchgang mit diesem Buchstaben verknüpfte Taste gedrückt werden musste. In einer Bedingung (B1) wurde die Abfolge der Reaktionslokationen durch eine feste Sequenz mit zehn Elementen bestimmt, während die Reizsequenz zufällig war, in der zweiten Bedingung (B2) war die Abfolge der Reaktionslokationen zufällig, aber die Abfolge der Reize folgte einer festen Zehnersequenz.

Sowohl in B1 als auch in B2 erwarben die Versuchspersonen offenbar sequenzspezifisches Wissen, da die Reaktionszeiten in beiden Gruppen signifikant abnahmen und wieder zunahmen, wenn nach einer gewissen Trainingsdauer statt der festen eine Zufallssequenz dargeboten wurde. Dieses Ergebnismuster zeigte sich sowohl für Versuchspersonen, die explizites Wissen über die Sequenz erworben hatten als auch für „implizite“ Lerner.

Paralleles Lernen einer perzeptuellen und einer motorischen Sequenz konnte Mayr (1996) zeigen. Er bot Versuchspersonen geometrische Figuren dar, die an verschiedenen Orten auf dem Bildschirm erscheinen konnten. Sowohl die Objekt- als auch die Lokationssequenzen folgten einem festen Muster. Dabei waren die beiden Sequenzen unkorreliert. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, auf die Identität der Objekte zu reagieren. Trotzdem erwarben sie ein bedeutsames Ausmaß an Wissen über die Lokationssequenz: Wenn diese gegen eine Zufallssequenz ausgetauscht wurde, stiegen die Reaktionszeiten signifikant an. Es gab keinerlei Hinweise auf eine Interferenz durch das gleichzeitige Lernen der unterschiedlichen sequentiellen Information.

Die dargestellten Ergebnisse sprechen einhellig dafür, dass unterschiedliche Arten von sequentieller Information parallel und möglicherweise unabhängig voneinander gelernt werden können. In diesem Zusammenhang ist eine Eigenheit der häufig verwendeten Anordnung in SRT-Aufgaben von Bedeutung: Als Distraktoraufgabe, die den Aufbau expliziten Sequenzwissens erschweren soll, werden die Versuchspersonen oft aufgefordert, zwischen den Durchgängen dargebotene hohe oder tiefe Töne zu zählen. Die dadurch entstehende Tonsequenz kann im Licht der oben dargestellten Ergebnisse ebenso gut als zusätzliche Reizsequenz interpretiert werden. Im folgenden Abschnitt werden zwei Arbeiten dargestellt, die sich mit den Implikationen dieser Sichtweise auseinandersetzen.

1.5.4. Task Integration: Status der Tonzählaufgabe

Schmidtke und Heuer (1997) untersuchten den Einfluss einer parallel dargebotenen Sequenz von hohen und tiefen Tönen auf die Lernleistung in einer SRT-Aufgabe. Die Versuchspersonen sollten in einigen Gruppen zusätzlich zur seriellen Lernaufgabe bei Darbietung entweder eines hohen oder eines tiefen Tones ein Fußpedal drücken, in anderen Bedingungen wurden die Töne dargeboten, ohne dass eine Reaktion erforderlich war. Experiment 1 zeigte, dass eine kurze, feste Sequenz von Tönen, deren Länge mit der der visuellen Reizsequenz übereinstimmte, zu verbessertem Lernen führte, wenn auf die Töne auch reagiert werden musste. Wenn die Ton- und die visuelle Reizsequenz nicht die gleiche Länge hatten, was zu einer Phasenverschiebung führt und daher die Integration der beiden Sequenzen zu einer audiovisuellen Reizfolge

erschwert, wirkte sich dies leistungsmindernd aus. Experiment 2 zeigte, dass ein Wechsel zu zufälliger Abfolge sowohl in der akustischen als auch in der visuellen Sequenz zu Leistungseinbußen führte, und zwar in beiden Reaktionsmodalitäten. In Experiment 3 wurde deutlich, dass die Tonsequenz nur dann einen Einfluss hatte, wenn auch auf die Töne reagiert werden musste. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die beiden Reizsequenzen bzw. die beiden Aufgaben zu einer komplexen Aufgabe integriert werden. Schmidtke und Heuer ziehen die Schlussfolgerung, dass implizites Lernen eine grundlegende und nicht-selektive Lernform sein muss, die alle potentiell verhaltensrelevanten Beziehungen zwischen Umweltreizen und eigenen Handlungen einbezieht.

Rah und Reber (2000) konnten nachweisen, dass sich die Art der Beziehungen zwischen visueller Reizsequenz und Tonsequenz auch auswirkt, wenn die Töne nicht per Fußpedal klassifiziert werden müssen, sondern hohe oder tiefe Töne gezählt werden. Die visuellen Reize waren Bilder von Maulwürfen, die aus einem von fünf bogenförmig angeordneten Löchern auftauchen konnten. Reagiert werden musste mit einem räumlich kompatiblen Tastendruck. Rah und Reber bedienten sich einer Within-Subject-Variation der Kontingenz zwischen Tonhöhe und nachfolgender Reizlokation. In der kontingenten Variante folgten auf den hohen Ton jeweils eine von drei Lokationen, das gleiche galt für den tiefen Ton. Jeweils zwei der Lokationen ging ausschließlich der entsprechende Ton voran, bei einer Lokation gab es keinen systematischen Zusammenhang mit dem vorangegangenen Ton. In Experiment 1 wurde eine quasizufällige Lokationssequenz zunächst mit einer Tonsequenz gepaart, die die Reizlokationen kontingent vorhersagte. In einem Transferblock wurde zu einer nicht-kontingenten Zuordnung gewechselt, was zu signifikanten Leistungseinbußen führte. In Experiment 2 wurde eine sich wiederholende Lokationssequenz dargeboten, und dabei von einer kontingenten zu einer nicht-kontingenten Tonsequenz gewechselt, was ebenfalls Leistungseinbußen zur Folge hatte. In Experiment 3 wurde von der Kombination feste Lokationssequenz/kontingente Tonsequenz zu quasizufällige Lokationssequenz/nicht-kontingente Töne gewechselt. Hier waren die Leistungseinbußen am stärksten. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass die Beziehungen zwischen den eigentlich als Zweitaufgabe eingeführten Tönen und den visuellen Reizen in der Tat einen Einfluss auf das Ausmaß des seriellen Lernens haben. Rah und Reber schlussfolgern, dass die Töne als integraler Bestandteil einer komplexen Reizumwelt betrachtet werden sollten. Im Gegensatz zu Schmidtke und Heuer (1997) betrachten sie nicht die Integration der Aufgaben an sich als entscheidenden Mechanismus, sondern postulieren einen breiter angelegten Mechanismus, der die Umwelt nach potentiell koordinierten Kovariationsmustern absucht. Nach dieser Vorstellung müsste jede Art von valider Vorhersagemöglichkeit aufgrund von Beziehungen zwischen irgendwelchen Elementen der Aufgabe genutzt werden können, wobei

hier als Elemente nur verschiedene Arten von Reizen und die Reaktionen betrachtet werden. Im nächsten Abschnitt wird ein Ansatz dargestellt, der Verhaltenseffekte in dieses Schema einbezieht.

1.5.5. Lernen von Verhaltenseffekten – serielle Verknüpfung von Verhaltenszielen

Ziebler (1998) wies als erster auf eine Eigenheit der seriellen Wahlreaktionsaufgabe hin, die eine weitere mögliche Verknüpfung innerhalb derartiger Experimente denkbar macht: Gewöhnlich löst in SRT-Aufgaben jeder Tastendruck die Präsentation des nachfolgenden Reizes aus. Ein neuer Reiz könnte daher auch als Effekt der vorausgegangenen Reaktion betrachtet werden. Ziebler untersuchte die Nutzbarkeit von Aktions-Effekt-Beziehungen im Zusammenhang mit implizitem seriellen Lernen. Er manipulierte die Häufigkeit der Verknüpfung zwischen Reizen und Reaktionen, sowie die Häufigkeit der Verknüpfung zwischen Reaktionen und ihren Effekten und zeigte dabei, dass nur die Häufigkeit der Aktions-Effekt-Beziehungen einen Einfluss auf die Lernleistung hatte.

Das verwendete Stimulusmaterial bestand aus quadratischen Matrizen aus fünf mal fünf Buchstaben. In jedem Durchgang musste in einer neu erscheinenden Matrix einer von neun Targetbuchstaben entdeckt und mit einer zugeordneten Taste darauf reagiert werden. Jeweils zwei Buchstaben war dieselbe Taste zugeordnet. In den aufeinanderfolgenden Matrizen „wanderte“ der Targetbuchstabe jeweils um eine Position nach links, rechts, oben oder unten. Als letzter Reiz, auf den reagiert werden sollte, erschien stets der Buchstabe „V“. Danach begann ein neuer Durchgang, bei dem der erste Reiz wiederum in der Mitte der Matrix erschien. Die Reizsequenzen bestanden entweder aus fünf oder aus sieben Elementen. Die Länge der aktuellen Sequenz wurde jeweils zufällig aus diesen zwei Möglichkeiten ausgewählt. Es bestand ein Zusammenhang zwischen der Identität des aktuellen Targetbuchstaben und der Lokation des Targets in der nächsten Matrix. Der jeweils aktuelle Buchstabe erlaubte eine eindeutige Vorhersage darüber, wo der nächste Targetreiz erscheinen würde: Oberhalb, unterhalb, rechts oder links vom momentanen Ort des Targets. Ziebler variierte nun die Häufigkeiten der einzelnen Targetbuchstaben. Von zwei Buchstaben, auf die mit derselben Taste reagiert werden sollte, erschien einer jeweils etwa viermal so häufig wie der andere. In einer Bedingung folgte beiden Buchstaben eines derartigen Paares die gleiche Targetlokation. In der anderen Bedingung wanderte die Targetlokation nach dem häufiger auftauchenden Buchstaben in eine andere Richtung als nach dem selten auftauchenden Buchstaben. In diesem Fall war die gleiche Reaktion (auf beide Buchstaben hin sollte dieselbe Taste gedrückt werden) mit zwei unterschiedlichen Konsequenzen verknüpft, einer seltenen und einer häufigen Konsequenz.

Wenn der Tastendruck nach beiden ihn auslösenden Buchstaben (selten oder häufig) die gleiche Konsequenz hatte, gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Reaktionen auf die nachfolgenden Reize. Wenn der Tastendruck nach einem seltenen Buchstaben eine andere Konsequenz hatte als nach einem häufigen Buchstaben, wenn sich also im Anschluss an die gleiche Reaktion die Targetlokation in zwei verschiedene Richtungen bewegen konnte, nahmen die Reaktionszeiten bei häufigen Vorläufern stärker ab als bei seltenen. Da durch entsprechende Kontrollbedingungen eine Erklärung des Ergebnisses durch das Lernen von Stimulus-Effekt-Beziehungen ausgeschlossen werden konnte, geht Ziebler davon aus, dass Aktions-Effekt-Beziehungen aufgebaut werden. Die Aktion ist dabei der aktuelle Tastendruck und der damit verbundene Effekt die nachfolgende Targetlokation. Der Zusammenhang zwischen der Identität der gedrückten Taste und dem Ort des nachfolgenden Reizes wird gelernt und ermöglicht eine schnellere Reaktion auf diesen nachfolgenden Reiz.

Ziebler berichtet, dass keine der Versuchspersonen im Anschluss an das Experiment in der Lage war, Regelmäßigkeiten im Auftreten der Reize zu benennen. Trotz der deutlichen Auswirkung auf die Reaktionszeiten blieb die Beziehung zwischen aktuellem Tastendruck und nachfolgender Reizlokation den Versuchspersonen also verborgen. Ziebler nimmt an, dass die implizite Komponente der bei seriellen Lernvorgängen beobachteten Effekte auf die Ausbildung von Aktions-Effekt-Beziehungen zurückzuführen ist.

Zwei Punkte machen es schwierig, die Ergebnisse von Zieblers zu den bisher berichteten Experimenten zum seriellen Lernen in Bezug zu setzen. Zum einen handelte sich bei den verwendeten Reizfolgen weder um feste, sich wiederholende Sequenzen, noch um aufgrund von Regeln generierte Serien. Die unterschiedliche Häufigkeit der dargebotenen Buchstaben war die einzige Einschränkung, ansonsten war die Abfolge der Targetbuchstaben und damit auch die Sequenz der auszuführenden Reaktionen rein zufällig. Über die unterschiedlichen Häufigkeiten der Reizbuchstaben hinaus waren in dieser Abfolge Regelmäßigkeiten nicht vorhanden und konnten daher auch nicht gelernt werden. Die einzige vorhandene Regelmäßigkeit bestand in der Beziehung zwischen der Identität des aktuellen Reizes und der Lokation des nachfolgenden Reizes.

Darüber hinaus bearbeiteten die Versuchspersonen keine reine Wahlreaktionsaufgabe sondern eine Kombination aus visueller Suchaufgabe und Wahlreaktion. In jeder Matrix musste der Targetreiz zunächst entdeckt werden, bevor auf ihn reagiert werden konnte. Diese Art von Doppelaufgabe ist schwer mit den seriellen Wahlreaktionsexperimenten zum Sequenzlernen, wie sie weiter oben beschrieben sind, zu vergleichen. Dennoch zeigen die Ergebnisse dass Zusammenhänge zwischen einer Aktion und einer darauffolgenden Reizlokation erlernt werden

können, ein Mechanismus, der auch in SRT-Experimenten mit Lokation als kritischem Reizmerkmal (etwa Nissen & Bullmer, 1987) eine Rolle spielen könnte.

Ziebler und Nattkemper (2001) gelang es, auch im Rahmen einer typischen SRT-Aufgabe die Bedeutung von Reaktions-Stimulus beziehungsweise Reaktions-Effekt-Beziehungen zu zeigen. Indem sie mehrere Reize als Reaktionssignale für dieselbe Reaktion verwendeten, konstruierten sie Sequenzen, in denen die Komplexität von Stimulus-Stimulus- und Response-Stimulus-Beziehungen unabhängig voneinander variiert werden konnte, während die Response-Response-Übergänge kontrolliert waren. In Experiment 1 zeigten die Ergebnisse, dass die Lerneffekte von der Komplexität der R-S-Beziehungen, aber nicht von der der S-S-Beziehungen abhingen. Im zweiten Experiment fand ein Transfer von sequenzspezifischem Wissen von einer Sequenz auf eine zweite Sequenz nur dann statt, wenn die beiden Sequenzen identische R-S-Beziehungen aufwiesen. In Experiment 4 verbesserte sich das serielle Lernen nur dann, wenn R-S-Beziehungen vereinfacht wurden, bei Vereinfachung der S-S-Beziehungen allein trat keine solche Verbesserung auf. Die Autoren ziehen die Schlussfolgerung, dass serielles Lernen auf Mechanismen zur willentlichen Kontrolle zielgerichteten Verhaltens beruht, und dass R-S-Lernen in diesem Zusammenhang ein bedeutsamer Lernmechanismus ist.

Obwohl Ziebler und Nattkemper (2001) von Mechanismen zur Steuerung intentionalen Verhaltens sprechen, sind die Stimuli/Effekte in ihren Experimenten für die Versuchspersonen zunächst nicht primär Verhaltensziele. Die Instruktion stellt eine Verbindung zwischen Reizen und Reaktionen her, die Bezüge zwischen Reaktionen und darauffolgenden Reizen müssen aber im Laufe des Experimentes inzidentell, das heißt ohne explizite Instruktion, erworben werden. Zudem sind Stimuli und Effekte in diesen Experimenten identisch, das heißt, die dargebotenen Effekte sind immer auch relevant für die Auswahl nachfolgenden Verhaltens.

Explizit instruierte Verhaltensziele wurden in einer Studie von Willingham, Wells, Farell und Stemwedel (2000) variiert. Sie bezogen Stellung zu der bereits oben aufgeworfenen Frage, ob die in SRT-Aufgaben gelernte Information perzeptueller, motorischer oder abstrakt-räumlicher Natur ist. Aufgrund eigener und anderer Ergebnisse (z. B. Willingham, 1999) formulierten sie die Hypothese, dass das, was gelernt wird, eine Abfolge von Reaktions-Lokationen sein könnte. Experiment 1 zeigte, dass ein Wechsel von einer bestimmten Tastenanordnung im Training zu einer anderen Tastenanordnung in einem Transferblock bei konstanter Reizsequenz zu einem massiven Leistungseinbruch führte. Das Sequenzwissen konnte also nicht auf ein anderes Tastaturlayout übertragen werden. In Experiment 2 arbeiteten die Versuchspersonen zunächst mit überkreuzten Händen, in der Transferphase dann mit ungekreuzten Händen. In einer Gruppe wurde die Reizsequenz im Transfer so modifiziert, dass sie die gleichen Fingerbewegungen erforderte wie im Training. In einer anderen Gruppe wurde weiterhin die gleiche Sequenz

präsentiert, was dazu führte, dass eine neue Sequenz von Tastendrücken ausgeführt werden musste, aber die Lokationen, an denen Tasten zu drücken waren, die gleichen blieben. Es zeigte sich, dass ein hervorragender Transfer des vorher Gelernten möglich war, wenn die Reaktions-Lokationen die gleichen blieben, aber keinerlei Transfer auftrat, wenn die Fingerbewegungen beibehalten wurden aber die Lokationen verändert waren. Willingham et al. ziehen die Schlussfolgerung dass serielles Lernen im motorischen System beheimatet ist, „[...] motoric not in the sense of muscle movement, but in the sense of selecting targets for motor movements“ (Willingham et al. 2000, S.375).

Auch Hazeltine (2001) vertritt die Ansicht, dass es sich bei dem Wissen, das beim seriellen Lernen erworben wird, um Repräsentationen von Abfolgen von Verhaltenszielen handelt. Diese „goal-based hypothesis“ überprüfte er in einer Serie von Experimenten, in denen bei veränderten motorischen Anforderungen gleiche Reaktionseffekte produziert werden mussten. In Experiment 1 reagierten die Versuchspersonen zunächst auf visuelle Stimuli mit unterschiedlich intensiven Tastendrücken auf einem drucksensitiven Gerät. Mit den Tastendrücken erzeugten sie Töne unterschiedlicher Tonhöhe. In einer Transferphase musste auf die gleiche Reizsequenz mit unterschiedlichen, mit verschiedenen Fingern auszuführenden Tastendrücken auf einer PC-Tastatur reagiert werden, wobei diese veränderte Reaktionssequenz wieder die gleiche Effektsequenz erzeugte. Die Effektgleichheit führte in der Tat zu einem verbesserten Transfer im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne Toneffekte.

In Experiment 2 sollte der Frage nachgegangen werden, ob eher effektorspezifisches oder lokationsspezifisches Lernen bei SRT-Aufgaben im Vordergrund steht. Zu diesem Zweck wurde wiederum mit einer Hand eine Sequenz einige Zeit ausgeführt, dann fand eine Transferphase statt, bei der zur anderen Hand gewechselt werden musste. In einer Bedingung ging dieser Wechsel mit effektor-, das heißt fingerkorrespondierenden Effektfolgen einher, in einer zweiten Bedingung wurden die räumlichen Lagebeziehungen der Reaktionstasten zu den Tönen aufrechterhalten und damit die Fingerzuordnung umgekehrt. Gleiche Töne wurden also entweder von den korrespondierenden Fingern oder an den korrespondierenden Lokationen erzeugt. Die Ergebnisse zeigen, dass Transfersequenzen immer dann besonders schnell bearbeitet werden konnten, wenn sie zur Erzeugung der gleichen Tonsequenz führten, unabhängig von der Tasten-Ton Zuordnung. Hazeltine (2001) interpretiert dies als Beleg für die Annahme, dass eher die Verknüpfung von Verhaltenszielen als lokations- oder effektorspezifisches Sequenzwissen dem seriellen Lernen zugrunde liegt.

Ebenfalls mit einer SRT-Aufgabe mit zusätzlichen Toneffekten verfolgten Hoffmann, Sebald und Stöcker (2001) einen ähnlichen Ansatz. Hier mussten die Versuchspersonen auf Sternchen reagieren, die an vier horizontal angeordneten Bildschirmpositionen erscheinen konnten. Die

Reizdarbietung folgte der zehn-elementigen Sequenz, die von Nissen und Bullemer (1987) eingeführt wurde. Mit den vier Reaktionstasten waren in der Experimentalgruppe die vier Töne eines C-Dur Akkordes in aufsteigender Reihenfolge verknüpft. In der Bedingung mit kontingenten Aktions-Effekt-Beziehungen löste also jeder Tastendruck unmittelbar und immer den gleichen Ton aus. In einer Kontrollbedingung mit nichtkontingenten Aktions-Effekt-Beziehungen war mit jedem Reaktionssignal, also jeder möglichen Reizlokation, ein Ton fest verknüpft. Das hatte zur Folge, dass der Druck auf die gleiche Taste unterschiedliche Töne hervorrief, je nachdem an welcher Position in der Sequenz sich die Versuchsperson aktuell befand. Die Variation kontingente vs. nichtkontingente Aktionseffekte war der einzige Unterschied zwischen den Gruppen. Alle Versuchspersonen tippten dieselbe Tastenfolge, alle Versuchspersonen sahen dieselbe Lokationsfolge und alle Versuchspersonen hörten dieselbe Melodie. Nur war die Melodie in der nichtkontingenten Bedingung um einen Trial nach vorn verschoben. In einer zusätzlichen Kontrollgruppe wurden keine Toneffekte dargeboten. Nach einer Trainingsphase von sechs Blöcken mit je 12 Sequenzwiederholungen wurde von der Zehnersequenz zu einer quasizufälligen Abfolge mit den gleichen Reizhäufigkeiten gewechselt. Der dadurch verursachte Anstieg der mittleren Reaktionszeiten wurde als Maß für das erworbene sequenzspezifische Wissen betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass die kontingenten Toneffekte zu einer signifikanten Verbesserung der Lernleistung führten, während die nicht reaktionskontingenten Töne keinerlei Verbesserung im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Toneffekte erbrachten.

In einem weiteren Experiment sollte die Bedeutung der Kontingenz mit einer Within-Subject Variation erneut geprüft werden. Das Vorgehen entsprach dem in Experiment 1, nur dass im neunten Block keine Zufallsfolge, sondern weiterhin die Nissen und Bullemer - Sequenz dargeboten wurde. Gleichzeitig wurde in diesem Block die Tasten-Ton Zuordnung von kontingent zu nichtkontingent verändert. In einer Kontrollbedingung war die Tasten-Ton-Beziehung vom ersten Block an nichtkontingent. Im neunten Block wurde zur selben nichtkontingenten Beziehung gewechselt, die auch in der Experimentalgruppe in diesem Block verwendet wurde. Wie die Ergebnisse deutlich machen, hatte der Wechsel zu einer anderen Tasten-Ton Zuordnung nur dann eine Auswirkung, wenn von einer kontingenten zu einer nichtkontingenten Zuordnung gewechselt wurde. Der Wechsel von einer nichtkontingenten zu einer anderen nichtkontingenten Zuordnung führte nicht zu einem signifikanten RT-Anstieg. Die Autoren gehen deshalb davon aus, dass die kontingenten Aktions-Effekt-Beziehungen einen Teil des erworbenen sequenzspezifischen Wissens ausmachen, das für die Beschleunigung der Reaktionen verantwortlich ist. Werden diese Beziehungen zerstört, verschwindet der Vorteil von kontingenten gegenüber nichtkontingenten Zuordnungen.

Hoffmann et al. (2001) interpretierten diese Ergebnisse im Zusammenhang mit einem von Greenwald (1970) erstmals formulierten Ansatz zur Erklärung des Erwerbs motorischer Sequenzen. Ausgehend von der Ideo-Motor Hypothese wie sie zum Beispiel von William James (1881/1890) formuliert wurde, beschreibt er einen Mechanismus zur Steuerung von trainiertem Verhalten den er *ideo motor mechanism* nennt. Der Begriff bezieht sich auf die Annahme, dass eine Vorstellung oder ein „Bild“ der sensorischen Eigenschaften einer auszuführenden Reaktion der eigentlichen Ausführung dieser Reaktion vorangeht, und dass diese Antizipation der Initiierung der Reaktion entspricht. Greenwald nimmt für den Erwerb ideomotorischer Kontrolle über eine Aktionssequenz folgende Schritte an: Jeder Reaktion folgt eine Reihe sensorischer Rückkopplungen wie die taktile Empfindung an dem Finger, der die Taste drückt, das auditorische Klicken der Taste und die propriozeptive Wahrnehmung der Bewegung. Gemeinsam formen diese reaktionskontingenten Reize das „Effektbild“ der jeweiligen Reaktion. Reiz-Reaktions-Effekt Tripel werden wiederholt erlebt, was dazu führt, dass interne Repräsentationen der Reaktionseffekte ausgebildet werden. Diese internen Repräsentationen können dann der eigentlichen Ausführung der jeweiligen Reaktion antizipativ vorausgehen. Gleichzeitig werden konditionierte Verbindungen zwischen den aufeinanderfolgenden Elementen der Effektsequenz aufgebaut. Die Sequenz von antizipierten Reaktionseffekten kann nun anstelle der Reize die Ausführung der sie erzeugenden Reaktionen steuern.

Eine Hypothese, die sich aus dieser Modellvorstellung herleiten lässt, wurde in einem dritten Experiment überprüft: Wenn tatsächlich die Wahrnehmung eines Effekt-Tones die Antizipation des folgenden Tones hervorruft, und diese wiederum zur Ausführung der entsprechenden Aktion führt, sollte das Zeitintervall zwischen aktuellem Effekt-Ton und nachfolgendem Reaktionssignal kritisch für die Effektivität dieser antizipativen Reaktionsauslösung sein. Ein zu spät dargebotener Ton sollte zu keinem allzu großen Vorteil führen. In der Tat hatten Vorversuche gezeigt, dass die Effekt-Töne nicht genutzt werden konnten, wenn sie erst gleichzeitig mit dem nachfolgenden Reiz dargeboten wurden. Die Ergebnisse von Experiment 3 zeigten nun, dass die kontingenten Toneffekte nur dann zu einer Verbesserung des seriellen Lernens genutzt werden konnten, wenn sie 150 Millisekunden vor dem nächsten Reaktionssignal dargeboten wurden, nicht aber, wenn sie dem nächsten Reaktionssignal nur um 75 Millisekunden vorausgingen. Dieses Ergebnis steht gut im Einklang mit dem oben skizzierten hypothetischen Lernmechanismus: Nur wenn die Antizipation des nachfolgenden Tones genügend Zeit hat, die entsprechende Reaktion zu aktivieren, ergibt sich ein Vorteil gegenüber einer Gruppe ohne Toneffekte.

1.6. Zusammenfassung

Die dem Lernen in SRT-Aufgaben zugrunde liegenden Strukturen lassen sich auf zwei unterschiedlichen Ebenen beschreiben. Zum einen lassen sich Arten struktureller Abhängigkeit differenzieren, in erster Linie statistische, auf Auftretenshäufigkeit basierende Zusammenhänge, daneben relationale Muster in den Reiz- bzw. Reaktionsfolgen, die sich mit Hilfe der strukturellen Informationstheorie beschreiben lassen, sowie Strukturen in Raum und Zeit. Von allen diesen Strukturtypen lässt sich experimentell zeigen, dass sie innerhalb von SRT-Aufgaben auf das serielle Lernen Einfluss nehmen können.

Auf der anderen Seite gilt es, die Frage zu beantworten, zwischen welchen Elementen einer Ereignissequenz strukturelle Verknüpfungen wirksam werden. Am schwächsten erscheint hier die Evidenz für ausschließlich stimulusbasierte Lernprozesse. Eher wahrscheinlich erscheint es nach der augenblicklichen Datenlage, dass ein verzahntes Erlernen der Zusammenhänge zwischen Stimuli, Reaktionen und auch den ursprünglich als Ablenkaufgabe eingeführten hohen und tiefen Tönen möglich ist. Einige Ergebnisse sprechen auch dafür, dass sequentielle Information in unterschiedlichen Reizdomänen parallel und unabhängig voneinander gelernt werden kann. Neuere Ansätze betonen, dass die sequentielle Art der Reizdarbietung in SRT-Experimenten die Interpretation nachfolgender Reize als Verhaltenseffekte nahe legt. Entsprechend konnte gezeigt werden, dass prädiktive R-S-Beziehungen in derartigen Aufgaben gelernt werden können. Von dieser Überlegung ausgehend zeigen verschiedene Autoren, dass sich die Ereignissequenz einer SRT-Aufgabe auch als Abfolge von Verhaltenszielen konzeptualisieren lässt, die die Versuchsperson immer besser zu erreichen lernt. Dieser Vorstellung entsprechend lassen sich positive Einflüsse zusätzlicher, an und für sich irrelevanter Verhaltenseffekte für Lernen und Transfer des Gelernten nachweisen.

1.7. Modelle motorischer Programmierung

Viele der in der SRT-Literatur diskutierten Lernmechanismen enthalten die implizite Annahme, dass im Laufe des Lernprozesses immer ausgefeiltere Repräsentationen zukünftig auszuführender Aktionen entstehen, die die Ausführung dieser zukünftigen Aktionen beschleunigen, egal ob es sich dabei um effekt- oder reaktionsbasierte Repräsentationen handelt (siehe z. B. Abschnitte 1.5.2, 1.5.3 und 1.5.5.). Diese Vorstellung von antizipativ zur eigentlichen Bewegung aktivierten Repräsentationen nachfolgender Bewegungen ist in der experimentellen Psychologie nicht neu: Bereits 1960 führten Henry und Rogers eine Serie von Experimenten durch, mit denen sie zeigen konnten, dass die Anfangslatenzzeit einer motorischen Sequenz von der Länge dieser Sequenz abhängt: Je länger eine zu initiierte Bewegungsfolge, desto länger die durchschnittliche Zeit, die zwischen Reaktionssignal und Bewegungsbeginn verstreicht. Dieser in die Literatur als „Sequenzlängeneffekt“ eingegangene Befund ist eine der Grundlagen für die Annahme, dass die Elemente einer motorischen Sequenz bereits vor der Ausführung vorbereitet werden können, wobei diese Vorbereitung in Abhängigkeit von der Komplexität der Bewegung unterschiedlich lang dauert. Henry und Rogers (1960) skizzierten ein „Memory Drum Model“, nach dem die Einzelelemente einer Sequenz aus einem Gedächtnispuffer gezogen werden, analog der Ziehung von Losen aus einer Lotterietrommel.

Keele (1968) formulierte einige Jahre später das Konzept des *motor program* als einer vor Bewegungsbeginn zu generierenden Steuereinheit, die Muskelkommandos enthält und die es erlauben soll, eine Bewegung unabhängig von peripherem Feedback in einem Zug auszuführen. Auf den beiden Konzepten „Motorpuffer“ und „motorisches Programm“ basierend, entwickelten Sternberg, Monsell, Knoll und Wright 1978 eine erste mathematisch präzise formulierte Modellvorstellung über den Zusammenhang zwischen Länge und Komplexität einer Bewegung sowie deren Initiierungszeit und Ausführungsgeschwindigkeit. Es entwickelte sich eine lebhaft Debatten über Natur und Eigenschaften motorischer Programme. Einige wichtige Beiträge sollen im Folgenden kurz skizziert werden. Dabei wird wiederum deutlich werden, dass die Bedeutung intendierter Verhaltensziele bei der Beschäftigung mit motorischer Programmierung, ähnlich wie in der SRT-Literatur, in jüngerer Zeit nicht ausreichend berücksichtigt worden ist. Im Anschluss werden daher kurz einige Arbeiten dargestellt, die die funktionale Rolle von Repräsentationen sensorischer Handlungseffekte für Planung und Initiierung von Bewegungen verdeutlichen.

1.7.1. Sternberg et al. (1978)

Sternberg et al. (1978) führten eine Reihe von Experimenten durch, in denen die Versuchspersonen entweder Listen von Wörtern aussprechen mussten oder Abfolgen von Buchstaben auf einer Tastatur einzugeben hatten. Dabei wurden sowohl die Anfangslatenz (L) oder Initiierungszeit als auch die mittleren Interresponsezeiten (I) gemessen. Dabei fanden sich eine Reihe von stabilen Befunden, die im Folgenden aufgelistet sind:

- L nimmt mit der Sequenzlänge zu.
- Die Zunahme ist in etwa linear.
- L nimmt mit der Komplexität der Einzelelemente zu.
- Die Effekte der Wirkungen von Elementanzahl und -komplexität sind unabhängig, das heißt additiv.
- I nimmt mit zunehmender Sequenzlänge ebenfalls zu.
- Die Zunahme ist ebenfalls annähernd linear.
- Auch hier sind die Effekte von Elementanzahl und -komplexität additiv.
- L und I nehmen in Abhängigkeit von der Sequenzlänge in ähnlichem Maße zu.
- Die einzelnen Interresponsezeiten nehmen mit zunehmend später Position in der Sequenz nichtmonoton ab.
- Die Effekte, die serielle Position und Elementkomplexität auf die Interresponsezeiten haben, sind annähernd additiv.

Zur Erklärung dieser Resultate nehmen Sternberg et al. drei unabhängige Stadien an: Eine *retrieval stage* die von der Zahl der Elemente, aber nicht von deren Größe beeinflusst wird, eine *unpacking stage*, die von der inneren Struktur der Elemente, aber nicht von ihrer Anzahl beeinflusst wird und eine *command stage*, in der die Kommandos generiert werden, die für die Ausführung eines Elements sorgen, und die unabhängig von der Anzahl der Elemente ist.

Die vorausgesagte Latenzzeit für eine beliebige Sequenz ergibt sich dann als Summierung von vier Unterkomponenten:

S(k): Zeit, das Subprogramm für Element k im Motorpuffer zu finden (*self-terminating search*), abhängig von der Zahl der Elemente und der Position von Element k.

U(k): Die Zeit zwischen der Lokalisierung eines Subprogramms und dem Beginn der Befehlssequenz für das Element k, das heißt die Zeit, die das „Auspacken“ des entsprechenden Subprogramms beansprucht (hängt von der Komplexität des Elements ab).

C(k): Zeit, die es dauert, die Befehlssequenz für Element k umzusetzen (hängt nur von der Elementgröße und nicht von seiner seriellen Position oder der Anzahl der Elemente ab). Damit

ist die tatsächliche Ausführungsdauer gemeint, zum Beispiel bei einer Tastendruckaufgabe die Zeit, die es dauert, die Taste soweit zu drücken, dass die Reaktion registriert wird.

$T(b)$: *base time*, in der der Reiz wahrgenommen und verarbeitet wird.

Die Latenz errechnet sich dann als:

$$L(n) = T(1,n) = T(b) + S(1) + U(1) + C(1)$$

Die Interresponse-Zeiten werden berechnet über:

$$R(k,n) = T(k,n) - T(k-1,n) = S(k) + U(k) + C(k) \quad (n = \text{Gesamtzahl Elemente, gilt ab } n \geq 2)$$

Sternberg et al. machen keine expliziten Aussagen über mögliche hierarchische Strukturen innerhalb der Motorsequenzen, ihr Konzept vom *unit* als der kleinsten Einheit einer Programmsequenz lässt jedoch die Möglichkeit offen, mehrere Einzelaktionen zu einem *unit* zusammenzufassen und in einem Schritt abzuarbeiten. Alle Ergebnisse, auf denen das Modell beruht, wurden mit Einfachreaktionen erhoben, das heißt, eine Auswahl zwischen verschiedenen Bewegungsfolgen mussten die Versuchspersonen nicht treffen. Mit den Implikationen solcher Auswahlprozesse beschäftigten sich Rosenbaum und seine Mitarbeiter. Ihre Arbeit wird im folgenden Abschnitt skizziert.

1.7.2. Rosenbaum et al. (1984)

Rosenbaum und Kollegen führten eine Serie von Experimenten durch, in denen Versuchspersonen stets zwei Tastendrucksequenzen in Vorbereitung halten mussten, von denen eine dann auf ein Signal hin ausgeführt werden sollte (Rosenbaum, Inhoff & Gordon, 1984). Die Anzahl der Tastendrucke konnte zwischen einem und drei variieren, und die Gemeinsamkeiten der beiden gleichzeitig vorzubereitenden Sequenzen wurde ebenfalls manipuliert. Es zeigte sich, dass sowohl Eigenschaften der tatsächlich auszuführenden Sequenz als auch Eigenschaften der anderen Sequenz sich auf Latenzzeiten und Interresponsezeiten auswirkten. Um diese Resultate zu erklären, nehmen Rosenbaum et al. in ihrem *Hierarchical Editor Model* an, dass bei einer Auswahl zwischen zwei Bewegungsfolgen zwei Prozesse nacheinander ablaufen: Ein *edit pass* genannter „Entpack“-Durchgang, in dem die beiden Sequenzen auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede hin überprüft werden und anschließend ein als *execution pass* bezeichneter Ausführungsprozess, der wiederum das sukzessive Entpacken und die anschließende Ausführung der einzelnen Elemente umfasst, ähnlich dem von Sternberg et al. (1978) angenommenen Mechanismus. Die Elemente der Sequenzen können in sich hierarchisch strukturiert sein und Bearbeitungsschritte des *edit pass* können auch an höheren Hierarchieebenen ansetzen – und damit beispielsweise zwei miteinander verknüpfte Tastendrucke in einem einzigen Arbeitsschritt annulliert werden. Eine besondere Herausforderung an die Modellbildung stellte vor allem ein

Ergebnis dar: Bei zwei ähnlichen Sequenzen wirkt sich die serielle Position des ersten unterschiedlichen Elements auf die Anfangslatenz aus. Je später in der Abfolge das abweichende Element auftritt, desto kürzer ist die Initiierungszeit. Das Hierarchical Editor Model erklärt dieses Ergebnis mit einer besonderen Eigenschaft des *edit pass*: In einer Wahlreaktionsaufgabe soll dieser Prozess bereits vor Präsentation des Reaktionssignals bis zu der Stelle hin ablaufen können, an der die erste Unsicherheit auftaucht. Der damit verbundene Zeitaufwand geht also nicht in die gemessene Wahlreaktionszeit ein.

Die Ergebnisse von fünf unterschiedlichen Experimenten stehen in guter Übereinstimmung mit dem beschriebenen Modell. Die Autoren betonen vor allem zwei fundamentale Implikationen des Modells: Die strenge Serialität, die im Einklang mit klassischen Stadienmodellen der Informationsverarbeitung steht (siehe z. B. Sternberg, 1969) sowie die Bedeutung hierarchischer Strukturen für die Bewegungskontrolle.

Kritisiert wurde die Interpretation von Rosenbaum et al. von Debra Rose (1988). Sie konnte zeigen, dass in einem Rosenbaum et al. nachempfundenen Experiment die Anfangslatenz bei einer Zweifachwahlreaktion linear von der Anzahl aller Elemente sowohl in der auszuführenden als auch in der zu unterdrückenden Tastenfolge abhing. Rose interpretiert ihre Daten als Hinweis darauf, dass der Zweck des hypothetischen *edit pass* nicht darin bestehen kann, einem unvollständigen Motorprogramm fehlende Merkmale hinzuzufügen, sondern den Motorpuffer zu durchsuchen und für die ausgewählte Bewegung überflüssige Unterprogramme zu löschen. Rose weist außerdem darauf hin, dass die Wahl zwischen zwei Sequenzen mit unterschiedlichen zugrunde liegenden Strukturen schwieriger, das heißt zeitaufwändiger zu sein scheint. Dieser Befund deutet auf die Bedeutung abstrakter, struktureller Eigenschaften der in Vorbereitung zu haltenden Sequenzen hin. Die Frage, ob strukturelle Eigenschaften unabhängig von konkreten Bewegungselementen vorprogrammiert werden können, wurde, in Anknüpfung an eine Arbeit von Rosenbaum, Kenny und Derr (1983), von Zießler, Hänel und Hoffmann (1988) untersucht.

1.7.3. Rosenbaum et al. (1983), Zießler, Hänel und Hoffmann (1988)

In einem ersten Versuch, sich der Bedeutung hierarchischer Strukturen für die motorische Programmierung experimentell zu nähern, ließen Rosenbaum, Kenny und Derr (1983) Versuchspersonen Tippfolgen auf einer Tastatur ausführen. Diese Folgen waren hierarchisch strukturiert, und zwar gemäß Struktureigenschaften, wie sie von der strukturellen Informationstheorie beschrieben werden (siehe Abschnitt 1.4.1.). Fehlerzahlen und Interresponsezeiten korrespondierten dabei mit einem „tree traversal model“. Dieses Modell geht davon aus, dass eine hierarchische Struktur wie die der Sequenz *ZzZzMmMm* (wobei Z für

Zeigefinger, M für Mittelfinger und Groß- bzw. Kleinbuchstaben für die rechte bzw. linke Hand stehen) durch einen Hierarchiebaum repräsentiert wird, auf dessen unterster Ebene der Wechsel von der einer Hand zum gleichen Finger der anderen Hand repräsentiert ist, eine Ebene weiter ist die Wiederholung dieses Handwechsels repräsentiert und auf der höchsten Ebene der Wechsel dieser Viererstruktur vom Zeige- zum Mittelfinger. Wie die Ergebnisse von Rosenbaum et al. (1983) zeigen, korrespondieren Latenzen und Fehler mit der Anzahl der Knotenpunkte innerhalb des Hierarchiebaumes, die von einem Tastendruck zum nächsten durchlaufen werden muss.

Ein Einfluss hierarchischer Strukturen innerhalb kurzer motorischer Sequenzen lässt sich also nachweisen. Ziebler, Hänel und Hoffmann (1988) wollten daran anschließend der Frage nachgehen, ob solche hierarchischen Strukturen auch unabhängig von konkreten Bewegungselementen, gewissermaßen abstrakt, vorprogrammiert werden können. Die Versuchspersonen trainierten vier kurze Sequenzen mit den Zeige- und Mittelfingern beider Hände, die auf ein spezifisches Reaktionssignal hin möglichst schnell auszuführen waren. Nach einer ausreichenden Trainingsphase wurde den Versuchspersonen 2 Sekunden vor dem Reaktionssignal eine Vorinformation dargeboten, die entweder das Startelement der Sequenz oder die Struktur der Sequenz oder beides vorgab. Sowohl die Vorinformation über das Startelement als auch die Vorinformation über die Struktur der Sequenz ergab einen signifikanten Latenzzeitgewinn, wobei die Interresponsezeiten unbeeinflusst blieben. Die vollständige Vorinformation ergab den stärksten Effekt, wobei die Autoren anmerken, dass diese auch die Identifikation des Reaktionssignals überflüssig macht, was die Vergleichbarkeit mit den anderen Bedingungen beeinträchtigt.

Um verschiedene mögliche Alternativerklärungen auszuräumen, wurden in einem zweiten Experiment längere Tippfolgen mit einer zusätzlichen Hierarchieebene trainiert. In den Testblöcken war immer nur zwischen jeweils zwei Sequenzen zu wählen, die entweder in ihren ersten beiden Elementen oder in ihrer Struktur übereinstimmten. Die Ergebnisse zeigten auch hier einen vergleichbaren Gewinn durch die Vorinformation über Startelement und Struktur.

In einem dritten Experimente wurde die Zeit variiert, die zur Umsetzung der Vorinformation zur Verfügung stand. Es zeigte sich, dass auch bei einer sehr kurzen Vorperiode von 100 ms Informationen über das Startelement zur Reduktion der Anfangslatenz führten, während Vorinformation über die Struktur der auszuführenden Sequenz erst ab einer Vorperiode von mehr als 250 ms genutzt werden konnte.

Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse von Rosenbaum et al. und Ziebler et al. dafür, dass motorische Programme erstens hierarchisch strukturiert sein können, wenn die auszuführenden Bewegungen das erlauben, und dass zweitens die Struktur einer zukünftig

auszuführenden Bewegung unabhängig von ihren konkreten Elementen vorprogrammiert werden kann.

Dass auch andere Sequenzeigenschaften jeweils unabhängig vorprogrammiert werden können, zeigten beispielsweise Semjen und Gottsdanker (1990). Sie ließen Versuchspersonen je sechsmal den gleichen Tastendruck ausführen, wobei einer der sechs Tastendrucke betont werden sollte. Vorinformation wurde entweder über die serielle Position des zu betonenden Tastendruckes oder über die Hand, mit der die Tastendrucke auszuführen waren, gegeben. Beide Arten von Vorinformation reduzierten die Latenzzeiten. Andere Autoren (z. B. Klapp, 1977) konnten auch zeigen, dass die Dauer eines auszuführenden Tastendruckes vorbereitet werden kann, auch wenn noch nicht bekannt ist, mit welchem Effektor die Bewegung auszuführen sein wird.

1.7.4. Klapp (1995)

Klapp (1995, 1996) vertritt die Meinung, dass Paradigmen wie sie von Rosenbaum et al. verwendet wurden, keine reine Analyse von Programmierung erlauben, weil in den üblicherweise benutzten Mehrfachwahlreaktionen stets auch eine Auswahl- oder Selektionskomponente enthalten sei. Die Reaktionszeiteffekte beispielsweise bei Kontrastierung von längeren und kürzeren Sequenzen, die gleichzeitig in Vorbereitung gehalten werden sollen, oder beim Vergleich von Sequenzen unterschiedlicher Struktur hält er in erster Linie für die Auswirkungen von Selektionsprozessen. Klapp bemüht sich, die Abhängigkeit der RT vom Wert eines bestimmten Parameters der Reaktion, etwa Dauer oder Komplexität, zu untersuchen, wobei andere Faktoren wie S-R-Kompatibilität oder Unsicherheit im Bezug auf Reaktionsparameter konstant gehalten werden sollen.

In einer Übersicht über verschiedene Arbeiten zum Thema macht Klapp zwei unterschiedliche Fälle aus (Klapp, 1996): Im ersten Fall beeinflusst die Reaktionskomplexität die Wahlreaktionszeit stärker als die RT einer Einfachreaktion, im zweiten Fall beeinflusst die Reaktionskomplexität die Einfachreaktionszeit stärker als die Wahlreaktionszeit. Klapp nimmt dieses scheinbar paradoxe Ergebnismuster als Ausgangspunkt für eine Theorie der Reaktionsprogrammierung. In einer eigenen experimentellen Arbeit gelang es ihm, beide Ergebnismuster in einem Experiment nachzuweisen (Klapp, 1995): Kurze („dit“) und lange („dah“) Reaktionen wurden trainiert und mussten so schnell wie möglich ausgeführt werden. Wenn nur einzelne dit- oder dah-Reaktionen verglichen wurden, ergaben sich in einer Wahlreaktionsbedingung signifikante Unterschiede – die komplexeren dah-Reaktionen wurden langsamer initiiert – während die Einfachreaktionszeit relativ unabhängig von der Länge der Reaktion war. Wurde dagegen die Anzahl der Elemente der Sequenz variiert, wirkte sich das

stärker auf die Einfachreaktionszeit als die Wahlreaktionszeit aus. Dieses Datenmuster veränderte sich zusätzlich über die Zeit: Nach mehrtägigem Training verschwand dieser Sequenzlängeneffekt.

Klapp interpretiert dieses Resultat als Indikator für zwei unterschiedliche Mechanismen, die den Reaktionszeitmustern zugrunde liegen: Wahlreaktionszeit soll von der Komplexität eines einzelnen Chunks abhängen, während die RT einer Einfachreaktion von der Anzahl der Chunks in der Sequenz abhängt. Mit zunehmender Übung werden Einzelemente bei längeren Sequenzen zu Chunks zusammengefasst, was dazu führt, dass der Sequenzlängeneffekt in der Einfachreaktionsaufgabe verschwindet.

Im Einzelnen geht Klapp von zwei unterschiedlichen Prozessen aus: Prozess INT soll für die Vorbereitung der internen Merkmale eines Motorchunks zuständig sein. INT hängt von Länge und/oder Komplexität des Chunks ab. Prozess SEQ soll die Chunks in die richtige Reihenfolge bringen und hängt daher von der Anzahl der Chunks ab. Prozess INT kann vor dem eigentlichen Startsignal ausgeführt werden (bei Einfachreaktionen), SEQ nicht. In einer Wahlreaktionsaufgabe finden beide Prozesse parallel statt, wobei INT der zeitraubendere Prozess ist, das heißt, in einer Wahlreaktionsaufgabe ist INT der zeitbestimmende Faktor, weshalb Wahlreaktionszeit von der Chunk-Komplexität aber nicht der Sequenzlänge abhängt. Wenn Sequenzelemente durch Training zu Chunks zusammengefasst worden sind, verliert SEQ zunehmend an Bedeutung, weshalb nach ausreichender Übung keine Auswirkungen der Sequenzlänge mehr auf die Einfachreaktionszeit zu beobachten sind, gleichzeitig aber die Wahlreaktionszeit durch die nun unterschiedliche Chunk-Komplexität beeinflusst wird.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgte Verwey (1999). Er ließ Versuchspersonen Sequenzen von zwei und sechs Tastendrücken über einen längeren Zeitraum hinweg trainieren und manipulierte dabei unter anderem das Vorbereitungsintervall. Auch er findet eine deutliche Reduktion des Sequenzlängeneffektes in den Initiierungszeiten, bis hin zu dessen völligem Verschwinden. Auch Verwey geht von der Bildung von Motorchunks aus, die zu einer schnelleren Initiierung auch komplexerer Sequenzen führen sollen.

1.7.5. Wann findet Programmierung statt?

Die bisherigen experimentellen Ergebnisse lassen auf eine Reihe unterschiedliche Prozesse schließen, die bei der Ausführung motorischer Sequenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden können. Zunächst scheint es Bewegungseigenschaften zu geben, die bereits vor dem imperativen Reiz zumindest zum Teil vorbereitet werden können, wie die Ergebnisse von Rosenbaum et al., Ziebler et al., Klapp und anderen zeigen. Ein weiterer Prozess, der etwa von

Sequenzlänge und/oder -komplexität beeinflusst wird, scheint zwischen der Präsentation des Reaktionssignals und dem Beginn der ersten Bewegung innerhalb der Sequenz abzulaufen. Zusätzlich gibt es eine ganze Reihe von Ergebnissen, die darauf hinweisen, dass auch während der Ausführung von Sequenzen noch nachfolgende Bewegungselemente vorbereitet werden. So finden Sternberg et al. (1978) eine Abnahme der Interresponsezeiten zum Sequenzende hin. Verwey (2001) konnte zeigen, dass bei zwei hochgeübten, nacheinander auszuführenden Sequenzen die Ausführungsrate niedriger ist, als bei nur einer auszuführenden Sequenz. Dieser Effekt ist bei der ersten Sequenz besonders deutlich. Er schließt daraus, dass während der Ausführung der ersten Sequenz bereits Vorbereitungsprozesse für die zweite Sequenz in Gang sind. Schließlich zeigten sowohl Rosenbaum und Kollegen (1984) als auch Semjen und Gottsdanker (1990), dass die serielle Position eines abweichenden Sequenzelementes sich auf die Anfangslatenz auswirkt: Je später in der Sequenz das unsichere Element auftaucht, desto weniger verzögert sich die Initiierung. Semjen und Gottsdanker (1990) interpretieren dies als Hinweis darauf, dass Sequenzen mit späten unsicheren Elementen begonnen werden, ohne vollständig vorbereitet zu sein, und dass das später auftretende abweichende Element erst vorbereitet wird, während die Ausführung bereits läuft, während Rosenbaum et al. eine partielle Vorwegnahme des *edit pass* als Ursache annehmen. Beiden Ansätzen ist die Überzeugung gemeinsam, dass auch während der Ausführung einer Sequenz noch nachfolgende Elemente vorbereitet werden können.

1.7.6. Verhaltensziele und motorische Programmierung

Die bisher dargestellten Ergebnisse und theoretischen Ansätze beziehen sich in erster Linie auf rein motorische, bewegungsspezifische Parameter – auch wenn einige dieser Parameter offenbar effektorunspezifisch vorbereitet werden können. Wie in der SRT-Literatur auch, wird hier wiederum außer Acht gelassen, dass Bewegungen oder Bewegungsfolgen sich gemeinhin auf ein konkretes Verhaltensziel richten, und nicht um ihrer selbst willen ausgeführt werden. Gerade im Zusammenhang mit motorischer Programmierung erfreute sich dieser Gedanke einige Zeit lang einer großen Popularität, wurde dann aber zunehmend vernachlässigt. Ausgangspunkt war ein Befund von Bernstein (1947). Er ließ Versuchspersonen Schriftproben mit der dominanten Hand abgeben und bat die Teilnehmer anschließend, die gleichen Wörter mit den unterschiedlichsten Effektoren erneut zu schreiben. Unter anderem wurde der Stift mit dem Fuß oder dem Mund gehalten, oder sogar am Ellenbogen- oder Handgelenk befestigt. Ein Vergleich der verschiedenen Schriftproben ergab, dass die interne Struktur der Wörter jedes Mal vergleichbar ausfiel, auch wenn sich Genauigkeit der Ausführung und vor allem die Größe der Buchstaben teils drastisch

unterschieden. Eine Reihe von Autoren hat dies als Beleg für „generalisierte Motorprogramme“ gewertet, in denen abstrakte Parameter wie die Relationen von Bewegungsamplituden zueinander gespeichert sind, und auf die von unterschiedlichsten Effektoren zugegriffen werden kann (z. B. Wulf & Lee, 1993; Wulf, Schmidt & Deubel, 1993). In jedem Fall ist das Ergebnis ein deutlicher Hinweis darauf, dass nicht etwa konkrete Muskelkommandos, sondern umweltbezogen definierte Verhaltensziele eine zentrale Rolle bei der motorischen Programmierung spielen. Ein anderes Beispiel aus einem völlig anderen Bereich lieferte MacKay (1982): In seiner Studie übten zweisprachige Versuchspersonen, die Deutsch wie Englisch perfekt beherrschten, das Aussprechen von Sätzen, die Hälfte auf deutsch, die andere Hälfte auf Englisch. Die Satzproduktionszeiten reduzierten sich mit zunehmender Übung. Nach 12 Durchgängen wurde die Sprache gewechselt, wobei die Bedeutung des Satzes manchmal gleich blieb und sich in anderen Fällen änderte. Bei gleich bleibender Bedeutung verursachte der Wechsel der Sprache keinerlei Veränderung, den Versuchspersonen gelang der Transfer perfekt. Mit wörtlichen Übersetzungen von sinnlosen Wortreihen zeigte sich dieser Transfereffekt nicht.

Die Daten weisen darauf hin, dass es eine konzeptuelle Repräsentation der Satzbedeutung zu geben scheint, die sich bei entsprechender Vorbildung ohne Schwierigkeit in der einen oder anderen Sprache realisieren lässt. Mit anderen Worten: MacKays Ergebnisse deuten wiederum darauf hin, dass ein bestimmtes Verhaltensziel, in diesem Fall die Vermittlung einer bestimmten Botschaft, unmittelbar mit der Ausführung eines dazu notwendigen motorischen Aktes verknüpft ist.

Wie oben bereits erwähnt, hat die Vorstellung, dass sensorische Repräsentationen von Verhaltenszielen eine zentrale Rolle bei der Verhaltenssteuerung spielen, innerhalb der Psychologie eine lange Tradition. Im folgenden Abschnitt sollen kurz einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden, die zeigen, dass vorweggenommene Verhaltenseffekte in der Tat an der Bewegungssteuerung beteiligt sind.

1.8. Ideomotorische Initiierung von Bewegungen: Experimentelle Belege

1.8.1. Hommel (1996)

In einer Studie von Hommel (1996) waren die Versuchspersonen aufgefordert, Zweifachwahlreaktionen auf visuelle Reize (S) wie Buchstaben oder Farbflecken auszuführen. Jedem Tastendruck (R) folgte ein Ton (E) von bestimmter Höhe oder an einem bestimmten Ort ($S1 \rightarrow R1 \rightarrow E1$, $S2 \rightarrow R2 \rightarrow E2$). Nach einer Trainingsphase wurden die Töne nicht mehr nur im Anschluss an die Reaktion, also als Aktionseffekt, dargeboten, sondern auch vor der Reaktion, gleichzeitig mit dem Reaktionssignal. Dabei war eine kongruente ($S1+E1 \rightarrow R1$) oder inkongruente ($S1+E2 \rightarrow R1$) Verknüpfung von Ton und Reaktionssignal möglich. Es zeigte sich, dass kongruente Töne in Verbindung mit dem Reaktionssignal zu schnelleren Reaktionen führten als inkongruente. Hommel zieht daraus den Schluss, dass die akustischen Aktionseffekte mit der korrespondierenden Reaktion verknüpft wurden, so dass die Aktionen durch die Darbietung „ihres“ Effektes vorbereitet werden konnten. Das führt dazu, dass bei kongruenter Zuordnung die vorbereitete Reaktion schneller ausgeführt werden kann, während bei inkongruenter Zuordnung die vorbereitete Reaktion zunächst gehemmt und die korrekte Reaktion ausgewählt werden muss, was eine Reaktionszeitverzögerung verursacht.

In einer anderen Studie (Hommel, 1993, Experiment 2) bearbeiteten Versuchspersonen eine Aufgabe, wie sie zur Demonstration des Simon-Effektes (Simon & Rudell, 1967) verwendet wird. Auf einen hohen oder tiefen Ton sollte mit einem Tastendruck mit der rechten oder linken Hand reagiert werden. Die Töne wurden in zufälliger Abfolge auf der rechten oder linken Seite der Versuchsperson dargeboten. Der Simon-Effekt besteht darin, dass auf einen Ton, der auf der gleichen Seite dargeboten wird wie die auszuführende Reaktion (räumlich kompatibel), schneller reagiert werden kann als auf einen räumlich inkompatibel dargebotenen Ton. In Hommels Experiment wurde zusätzlich für jede Reaktion ein Effekt eingeführt: Jeder Tastendruck rief einen Lichtblitz hervor, der, je nach Versuchsbedingung, auf der gleichen Seite wie die Reaktion oder ihr gegenüber aufleuchtete. Die Versuchspersonen wurden nun nicht instruiert, auf den Ton so schnell wie möglich mit einem Tastendruck zu reagieren, sondern so schnell wie möglich das Licht auf der rechten oder linken Seite einzuschalten, wenn der tiefe oder hohe Ton erklang. Die Stellung der Hände (parallel oder überkreuz) und der Ort des zu erzeugenden Lichtblitzes (links oder rechts) wurden orthogonal variiert. Eine Gruppe musste also beispielsweise auf einen links dargebotenen tiefen Ton mit der linken Hand reagieren und damit auf der linken Seite einen Lichtblitz erzeugen. Eine andere Gruppe musste bei einem links dargebotenen hohen Ton mit

der rechten Hand reagieren und ebenfalls einen Lichtblitz auf der linken Seite erzeugen. Es zeigte sich, dass alle drei räumlichen Zuordnungen (Ton-Licht, Ton-Taste und Ton-Hand) einen eigenen Kompatibilitätseffekt hervorriefen. Man kann also schließen, dass sowohl der propriozeptive und taktile Effekt des Tastendruckes als auch der visuelle Effekt des Lichtblitzes mit der Reaktion verknüpft wurden.

Beide Experimente liefern deutliche Hinweise dafür, dass Reaktionseffekte tatsächlich mit den Reaktionen verknüpft werden, die sie hervorrufen. Sie bleiben aber den schlüssigen Beleg schuldig, dass diese sensorischen Effektrepräsentationen tatsächlich ursächlich an der Steuerung der Bewegungen beteiligt sind. In diesem Zusammenhang sind vor allem zwei Experimente von Kunde (2001) von Interesse, die im nächsten Abschnitt kurz dargestellt werden.

1.8.2. Kunde (2001)

In einem Experiment von Kunde (2001) bearbeiteten Versuchspersonen eine Vierfachwahlreaktion, in der sie auf ein nicht-räumliches Reizmerkmal (Reizfarbe) mit dem Druck auf eine von vier horizontal angeordneten Tasten reagieren sollten. Jede einzelne Reaktion erzeugte einen distinkten visuellen Effekt: Eines von vier horizontal auf dem Bildschirm angeordneten Kästchen wurde weiß ausgefüllt. Die kritische Variation betraf die Reaktions-Effekt-Zuordnung: Die Reaktionen füllten entweder ein räumlich korrespondierendes oder ein nicht korrespondierendes Kästchen aus. Die inkompatible Reiz-Reaktions-Zuordnung erhöhte die mittleren Reaktionszeiten im Vergleich zu einer Kontrollbedingung mit kompatiblen Reaktionseffekten signifikant.

In einem weiteren Experiment (Kunde 2001, Experiment 2) zeigte sich ein vergleichbarer Kompatibilitätseffekt auch für eine andere Reizdimension: Die Versuchspersonen konnten einen starken Druck auf eine gewichtssensitive Taste schneller initiieren, wenn ihm als Effekt ein lauter Ton folgte, als wenn er einen leisen Ton erzeugte. Umgekehrt konnte ein sanfter Tastendruck mit leisem Effekt schneller initiiert werden als mit einem lauten Effekt. Kunde interpretiert die Ergebnisse mit dem Verweis auf grundlegende Überlegungen zum ideomotorischen Prinzip: Da laut dem IM-Ansatz sensorische Repräsentationen von Aktionseffekten der Bewegungsinitiierung stets vorangehen, ist es zu erwarten, dass die Merkmale dieser Effekte mit den Merkmalen der Reaktion selbst Kompatibilitätsbeziehungen eingehen, analog den Kompatibilitätseffekten von Reizen und Reaktionen, wie sie etwa im Simon-Paradigma zu beobachten sind. Ein antizipierter inkompatibler Effekt aktiviert demnach „falsche“ Reaktionsmerkmale (z. B. hohe Intensität) und die Hemmung bzw. das Ersetzen dieser fälschlich aktivierten Merkmale führt zu Reaktionszeitkosten.

Die Tatsache, dass ein nach der Reaktionsabgabe präsentierter Effekt tatsächlich die Initiierungsgeschwindigkeit beeinflusst, ist ein starkes Argument dafür, dass sensorische Repräsentationen von Handlungseffekten tatsächlich an der Handlungsinitiierung beteiligt sind. In einer neueren Arbeit konnte Kunde (im Druck) außerdem zeigen, dass nachgeordnete Effekte auch die Ausführung einer kontinuierlichen Bewegung beeinflussen.

1.9. Zusammenfassung

Eine Vielzahl von Befunden spricht dafür, dass der Initiierung zumindest geübter Bewegungsfolgen die Aktivierung antizipativer Repräsentationen der Bewegung vorausgeht. So ist die Latenzzeit einer Bewegungsfolge von deren Länge oder Komplexität abhängig – je länger die Sequenz, desto zeitaufwändiger ist die Initiierung. Ein weiterer zentraler Befund ist, dass hochgeübte Bewegungsfolgen teilweise mit solcher Geschwindigkeit ausgeführt werden können, dass für eine Feedback-Kontrolle aufgrund von begrenzter neuraler Leitgeschwindigkeit keine Zeit mehr bleiben kann. Diese und andere Resultate haben zum Konzept des motorischen Programmes geführt. Ein Motorprogramm soll eine zentrale Repräsentation einer Bewegung sein, die vor Beginn der Bewegung entweder erstellt oder erinnert und anschließend „entpackt“ und in direkte Muskelkommandos umgesetzt werden soll. Motorische Programmierung wird häufig mit Paradigmen untersucht, in denen Versuchspersonen kurze Bewegungs- (meist Tastendruck-) Sequenzen trainieren und dann möglichst schnell ausführen müssen. Dabei lässt sich unter anderem das Ausmaß der Vorinformation variieren, das die Versuchsperson zum Zeitpunkt der Reizpräsentation hat. Verschiedene Autoren konnten zeigen, dass unterschiedliche Arten von Information, etwa über die Intensität der auszuführenden Reaktion oder über die abstrakte Struktur einer vorzubereitenden Sequenz, effektorunspezifisch zur Vorbereitung genutzt werden können. Außer Acht gelassen werden dabei häufig die angestrebten Verhaltenseffekte, obwohl gerade einige ältere Studien zeigen, dass Verhaltensziele, die auf sensorischer, ja möglicherweise sogar auf konzeptueller Ebene repräsentiert sind, einen direkten Einfluss auf motorische Prozesse haben können. Diese Annahme wird schon seit vielen Jahren von den Vertretern des ideomotorischen Prinzips (z. B. James, 1981/1890; Lotze, 1852) propagiert. Inzwischen gibt es experimentelle Befunde, die zeigen, dass sensorische Verhaltenseffekte erstens mit den sie verursachenden Bewegungen verknüpft werden und zweitens neben der Selektion auch die Initiierung und die Ausführung von Handlungen beeinflussen.

1.10. Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Mit Hilfe des Paradigmas der seriellen Wahlreaktionsaufgabe soll zunächst gezeigt werden, dass externe Aktionseffekte beim Erlernen auch komplexer motorischer Sequenzen eine Rolle spielen. Dabei sollen insbesondere Belege dafür präsentiert werden, dass auch eine Verknüpfung von nicht unmittelbar benachbarten Sequenzelementen durch geeignete zusätzliche Effekte unterstützt werden kann. Zusätzlich sollten Grenzen und notwendige Rahmenbedingungen für dieses effektunterstützte motorische Lernen untersucht werden.

Im den nachfolgenden Experimenten soll versucht werden, die Mechanismen, die dem Einfluss externer Aktionseffekte für das motorische Lernen zugrunde liegen, genauer zu betrachten. Dazu werden unterschiedliche Varianten eines Trainingsparadigmas mit kurzen motorischen Sequenzen eingesetzt, in denen sich spezifische Variablen wie Sequenzlänge oder Vorbereitungszeit kontrolliert variieren lassen.

2. Experimente

2.1. Experiment 1

Ziel von Experiment 1 war es, die Resultate von Hoffmann et al (2001, siehe Abschnitt 1.5.5.) zu replizieren, und zu zeigen, dass der beobachtete Einfluss von Toneffekten auf das serielle Lernen sich auch einstellt, wenn mehr als unmittelbare Übergangsinformationen genutzt werden müssen, das heißt wenn mehr als ein Kontextelement einbezogen werden muss, um zu korrekten Vorhersagen über nachfolgende Elemente zu kommen. Zu diesem Zweck wurden so genannte *second order conditional* (SOC) Sequenzen dargeboten. Diese Art von Sequenz zeichnet sich dadurch aus, dass jedes einzelne Element einmal jedem anderen Element vorausgeht, dass also die Kenntnis des aktuellen Elementes keine Vorhersage über das darauf folgende erlaubt, außer dass es sich nicht wieder um das gleiche Element handeln wird. Um den Einfluss der bloßen Präsentation einer zusätzlichen Reizsequenz zu kontrollieren, wurde wiederum eine Kontrollbedingung eingeführt, in der die Toneffekte nicht tastenkontingent erzeugt wurden, aber dennoch zur gleichen Tonsequenz führten wie in der Experimentalgruppe, in Analogie zur von Hoffmann et al. (2001) verwendeten Methode.

SOC-Sequenzen wurden im Zusammenhang mit seriellem Lernen erstmals von Reed und Johnson (1994) verwendet. Bei dieser Art von Sequenz sind alle Elemente gleich häufig und auch alle Übergangswahrscheinlichkeiten erster Ordnung sind gleich, da jedes Element genau einmal auf jedes andere folgt. Jedes denkbare Reizpaar kommt daher auch genau einmal vor. Berücksichtigt man nun das vorangegangene Reizpaar, kann das nachfolgende Element sicher vorhergesagt werden – vorausgesetzt die Zusammenhänge zwischen drei aufeinanderfolgenden Reizen wurden bereits erlernt.

Wie in Abschnitt 1.4.1. dargestellt wurde, haben verschiedene Autoren bereits gezeigt, dass Versuchspersonen mit zunehmendem Trainingsstand ein zunehmendes Ausmaß seriellen Kontextes zu Vorhersage nutzen lernen. Die Fragestellung von Experiment 1 war, ob auch das Lernen einer SOC-Sequenz von kontingenten Toneffekten profitieren würde. Um es in den Begriffen des ideomotorischen Prinzips zu formulieren: Können Versuchspersonen in einer SRT-Aufgabe mit zusätzlichen Toneffekten nur unmittelbar aufeinanderfolgende Töne miteinander verknüpfen, das heißt, löst ein Ton nur die Antizipation des darauffolgenden aus und beschleunigt dadurch die entsprechende Reaktion? Oder können längere Ketten von Tönen enkodiert und antizipiert werden und dadurch die Leistung verbessern?

Wenn serielles Lernen mit SOC-Sequenzen durch kontingente Toneffekte verbessert wird, dann muss der Mechanismus, der eine Repräsentation der Effektsequenz erzeugt, mindestens in der

Lage sein, Übergangswahrscheinlichkeiten zweiter Ordnung, oder anders formuliert, Zusammenhänge zwischen mindestens drei aufeinanderfolgenden Aktionseffekten zu berücksichtigen.

Die Reize waren Sternchen, die an vier horizontal angeordneten Bildschirmlokalationen erscheinen konnten. Die Versuchspersonen reagierten mit räumlich kompatiblen Tastendrücken. Es gab zwei Kontrollbedingungen: Eine Gruppe ohne Toneffekte und eine Gruppe mit nicht-kontingenten Toneffekten.

Methode

Versuchspersonen

Es gab 19 Versuchspersonen in der Gruppe *Contingent Tones* (CT, durchschnittliches Alter = 23, $s=5.4$), 19 Versuchspersonen in der Gruppe *No Tones* (NT, durchschnittliches Alter = 23 $s = 3.6$) und 20 in der Gruppe *Non-Contingent Tones* (NCT, durchschnittliches Alter = 24, $s = 4.9$). 4 Versuchspersonen in Gruppe CT, 4 Versuchspersonen in Gruppe NT und 5 Versuchspersonen in Gruppe NCT waren männlichen Geschlechts. Aus Gründen, die weiter unten erläutert werden, wurden 2 Versuchspersonen in Gruppe CT ersetzt. Etwa die Hälfte der Versuchspersonen in jeder Gruppe waren Studenten, die eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten, die übrigen waren Freiwillige, die mit etwa 6 € entlohnt wurden.

Reize und Reaktionen

Alle Experimente wurden auf MS-DOS-kompatiblen PCs durchgeführt. Der Bildschirm war blau, die Anzeige und die Stimuli waren weiß. In Experiment 1 bestand die Anzeige aus vier etwa 1 cm breiten Linien in der unteren Bildschirmhälfte. Die Linien waren etwa 4.5 cm voneinander entfernt, was bei einem Abstand von etwa 57 cm einem Sichtwinkel von etwa 4.5 Grad entspricht.

In jedem Durchgang wurde ein Sternchen von 4 mm Durchmesser etwa 1.3 cm oberhalb einer der vier Linien dargeboten. Die Tasten ‚c‘, ‚v‘, ‚n‘ und ‚m‘ einer deutschen QWERTZ-Tastatur dienten als Reaktionstasten.

Die Zeige- und Mittelfinger der Versuchspersonen ruhten auf diesen Tasten. Jede der vier Bildschirmlokalationen war mit der räumlich kompatiblen Taste verknüpft, die so schnell wie möglich gedrückt werden sollte, wenn dort ein Sternchen auftauchte. Jede Reaktion löste die Darbietung des nachfolgenden Reizes aus, und zwar nach einem Reaktions-Stimulus Intervall (RSI) von 150 ms. Bei einer falschen Reaktion wurde das Wort „Fehler!“ kurz am unteren Bildschirmrand eingeblendet.

In den Gruppen CT und NCT löste jeder Tastendruck außerdem die unmittelbare Darbietung eines Tones aus, entweder „c“, „e“, „g“ oder „c“¹. Diese Töne entsprechen denen eines C-Dur Akkordes mit zusätzlicher Oktave.

In Gruppe CT waren die vier Töne c-e-g-c' den vier Reaktionstasten aufsteigend von links nach rechts zugeordnet. Jeder Tastendruck produzierte immer denselben Ton, unabhängig davon, ob die Reaktion korrekt oder falsch war. In der NCT-Gruppe waren die vier Töne c-e-g-c' den vier Bildschirmlokationen von links nach rechts aufsteigend zugeordnet. Jeder Tastendruck produzierte hier den Ton, der der Sternchenlokation im vorangegangenen Durchgang entsprach. Dies hatte zur Folge, dass jeder Tastendruck drei unterschiedliche Toneffekte auslösen konnte, je nach der aktuellen Position innerhalb der Sequenz. Die äußere linke Taste konnte beispielsweise die Töne e, g und c' erzeugen, in Abhängigkeit von der Position des Sternchens im vorangegangenen Trial. Diese Manipulation hat den Vorteil, dass in der CT und der NCT-Gruppe dieselbe Tonsequenz erzeugt wird, vorausgesetzt die CT-Versuchspersonen reagieren korrekt. Nur in der CT-Gruppe gibt es jedoch einen kontingenten Zusammenhang zwischen Taste und Toneffekt, in Gruppe NCT ist die Tonsequenz im Vergleich zu CT um einen Trial verschoben.

In Gruppe NT wurden keine zusätzlichen Töne dargeboten.

Die Darbietung der Reize folgte einer festgelegten Sequenz. Zwei SOC-Folgen, ähnlich denen, die Reed und Johnson (1994) verwendeten, wurden eingesetzt. Die beiden Sequenzen hatten keinerlei Übergangsinformation zweiter Ordnung gemeinsam, das heißt, jedes Reizpaar hatte in Sequenz 1 einen anderen Nachfolger als in Sequenz zwei. Die folgenden Sequenzen wurden verwendet (die Buchstaben A, B, C und D stehen für die Bildschirmlokationen von links nach rechts):

SOC 1: ACDBABCBD CAD

SOC 2: BADCDABDBCAC

Ablauf

Den Versuchspersonen war nicht bewusst, dass das dargebotene Stimulusmaterial strukturiert sein würde, sie gingen davon aus, eine herkömmliche Wahlreaktionsaufgabe zu bearbeiten. Die Instruktion wurde zu Beginn des Experimentes als Text auf dem Bildschirm dargeboten. In der Instruktion wurde erklärt, dass Sternchen auf dem Bildschirm erscheinen würden, und dass die Versuchspersonen darauf reagieren sollten, indem sie die zugeordnete Taste so schnell wie möglich drückten. Es wurde betont, dass sowohl Geschwindigkeit als auch Genauigkeit für eine gute Leistung wichtig seien. Die Versuchspersonen in den Gruppen CT und NCT wurden auch darüber informiert, dass sie nach jedem Tastendruck einen Ton hören würden.

Das Experiment bestand insgesamt aus 10 Blöcken, in denen jeweils zehnmal eine der Sequenzen dargeboten wurde, was eine Trialzahl von 120 pro Block ergibt. SOC 1 wurde in den Blöcken 1, 2 und 9 dargeboten, SOC 2 in den Blöcken 3 bis 8 und 10.

Am Ende jedes Blocks informierte eine Anzeige die Versuchspersonen über ihre durchschnittliche Reaktionszeit und ihre Fehlerrate und ermutigte sie, ihre Leistung weiter zu steigern. Nach einer kurzen Pause starteten die Versuchspersonen den folgenden Block mit einem Tastendruck. Die Reaktionszeit (RT) jeder korrekten Reaktion wurde vom Beginn der Stimuluspräsentation bis zur Ausführung des Tastendrucks gemessen.

Nachbefragung

Nach dem Ende des Experimentes wurden die Versuchspersonen gefragt, ob ihnen etwas Besonderes am Reizmaterial aufgefallen war, und ihre Antworten wurden aufgezeichnet. Sie wurden darüber informiert, dass es in Block 3 bis 8 eine zyklisch wiederholte Sequenz gegeben hatte und gebeten, sich an so viel davon wie möglich zu erinnern. Die Versuchspersonen bekamen ein Blatt Papier, auf dem die vier Bildschirmlokationen mit den Ziffern eins bis vier nummeriert waren. Sie wurden ermutigt, jede erinnerte Sequenz und jedes Sequenzfragment mit Hilfe dieser Ziffern zu notieren.

Erinnerte Sequenzen und Teilsequenzen wurden als Maß für explizites Sequenzwissen aufgezeichnet. Die Ergebnisse dieses *free recall* Tests wurden anschließend nach Tripeln von Reizen/Tastendrücken abgesucht, die in der Trainingssequenz, die in Block 3 bis 8 dargeboten wurde, enthalten sind. Jedes korrekt wiedergegebene Tripel wurde mit einem Punkt belohnt. Da die Gesamtzahl unterschiedlicher Tripel in der Sequenz zwölf ist, wenn Sequenzwiederholung miteinbezogen wird, wurden zwischen 0 und 12 Punkten für explizites Wissen vergeben.

Es gibt seit einigen Jahren eine Debatte um die Effektivität unterschiedlicher Maße für explizites Sequenzwissen in der SRT-Literatur. Einige Forscher (z. B. Cohen & Curran, 1993; Destrebecqz & Cleeremans, 2001; Jiminez, Mendez & Cleeremans, 1996) sind der Meinung, dass implizites und explizites Lernen mit angemessenen Mitteln wie RT-Maßen und freien oder geführten Sequenz-Generierungs-Aufgaben separat erfasst werden können. Andere vertreten den Standpunkt, dass bisher noch nicht überzeugend gezeigt worden ist, dass implizites Lernen in derartigen Aufgaben tatsächlich stattfindet. Sie betonen einen Mangel an Spezifität und Sensitivität bei den entsprechenden Lernmaßen (z. B. Perruchet & Amorim, 1992; Shanks & St. John, 1994; siehe auch Lovibond & Shanks, 2002). Ich möchte mich in dieser Arbeit eher auf letzteren Standpunkt beziehen, und stimme mit Shanks und St. John überein, die feststellen: „[...] no convincing evidence of implicit learning has yet emerged in sequential RT tasks” (Shanks & St. John, 1994, S.389). Wie bereits in der Einleitung angesprochen, ist es nicht Ziel

dieser Arbeit, unbewusstes Lernen zu demonstrieren. Das Hauptinteresse, das den vorliegenden Experimenten zugrunde liegt, betrifft die Frage *was* in SRT-Aufgaben gelernt wird, nicht ob es bewusst oder unbewusst gelernt wird (siehe auch Hoffmann & Koch 2000; Hunt & Aslin 2001). Um aber dem Einwand entgegenzutreten zu können, es handle sich bei möglicherweise nachweisbaren Auswirkungen der Toneffekte um einfache Auswirkungen verstärkter „expliziter“ Lernprozesse, wurden dennoch Nachbefragungsdaten erhoben.

Ergebnisse

Fehlerdaten

Da die Töne den Tasten in Gruppe CT kontingent zugeordnet waren, produzierte jede fehlerhafte Reaktion einen Ton, der von der eigentlich vorgegebenen Tonsequenz abwich. Besonders hohe Fehlerraten führten daher dazu, dass die entsprechenden Versuchspersonen eine deutlich andere Effektsequenz erlebten. Um Vergleichbarkeit zwischen den Tonsequenzen herzustellen, die die Versuchspersonen während des Experiments hörten, wurden alle Versuchspersonen mit Fehlerraten über 10 Prozent aus der Stichprobe ausgeschlossen und ersetzt (siehe auch Abschnitt Versuchspersonen). Dieses Vorgehen erlaubt es nicht, die Fehlerdaten gezielt auszuwerten. Es lässt sich aber sagen, dass es in den Daten keine Anzeichen für *speed-accuracy-tradeoffs* gab.

RTs die mehr als 3 Standardabweichungen vom individuellen Mittelwert entfernt lagen, wurden als Ausreißer klassifiziert und ebenfalls aus der Analyse ausgeschlossen. Dies betraf 1,3 % aller Reaktionen, ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen.

Reaktionszeiten

Die Reaktionszeiten wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Bedingung (CT, NCT, NT) und Training (Block 3 bis 8) unterzogen (siehe Abb. 2). Es zeigt sich ein signifikanter Effekt der Übung, die RTs nehmen von Block 3 bis Block 8 ab, $F(5, 275) = 37.06$, $p < .001$. Die Bedingung hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss, $F(2, 55) = 2816.61$, $p < .01$. Die Versuchspersonen in Gruppe CT reagierten am schnellsten ($m = 364$ ms), in Gruppe NT wurde langsamer reagiert ($m = 395$ ms), und Gruppe NCT produzierte die höchsten RTs ($m = 428$ ms). Einzelkontraste zeigten, dass nur der Unterschied zwischen den Gruppen CT und NCT statistisch bedeutsam ist, $t(37) = -3.61$, $p < .001$. Die Wechselwirkung von Block und Bedingung ist ebenfalls signifikant, $F(10, 275) = 2.23$, $p < .05$. Die RTs nehmen in Gruppe CT (-70 ms) stärker ab als in Gruppe NCT (-37 ms) und NT (-43 ms).

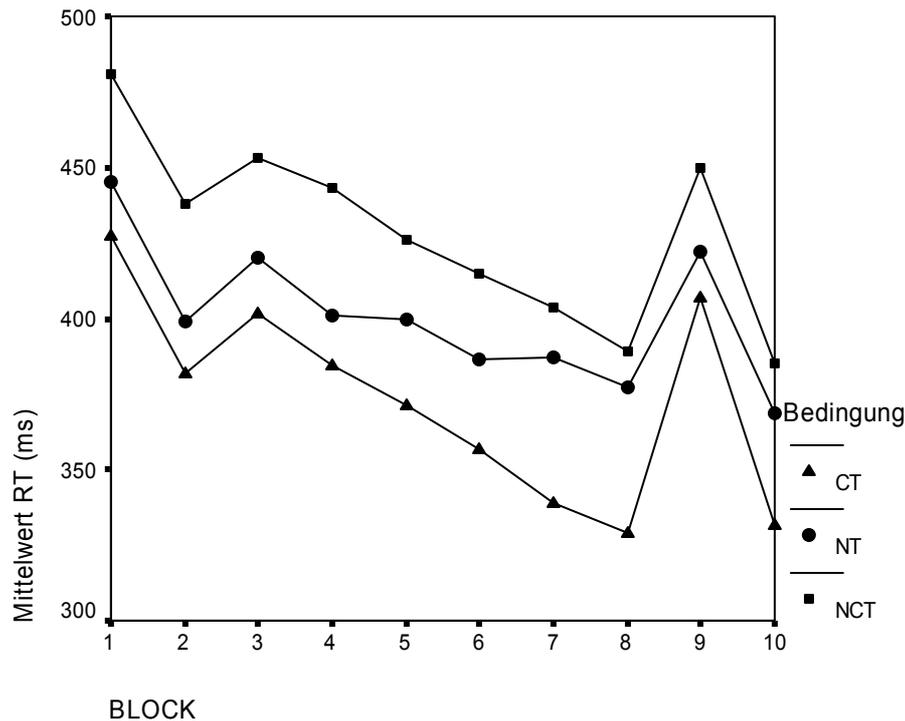


Abbildung 2: Mittlere Reaktionszeiten in den drei Gruppen über die experimentellen Blöcke hinweg.

Als reines Maß für sequenzspezifisches Lernen wurde eine weitere ANOVA mit den Faktoren Sequenzstruktur (Mittelwert der Blöcke 8 und 10 verglichen mit dem Mittelwert von Block 9) und Bedingung (CT, NCT, NT) durchgeführt. Dabei zeigte sich ein signifikanter Effekt des Faktors Sequenzstruktur, $F(1, 55) = 159.63$, $p < .001$. Die RTs nehmen im neunten Block zu und danach wieder ab. Der Effekt des Faktors Bedingung ist ebenfalls signifikant, $F(2, 55) = 7.03$, $p < .01$. Die Versuchspersonen in Gruppe CT reagierten wiederum am schnellsten, etwas langsamer war Gruppe NT, die Versuchspersonen in Gruppe NCT reagierten noch langsamer. Die kritische Wechselwirkung von Sequenzstruktur und Bedingung ist ebenfalls signifikant $F(2, 55) = 3.58$, $p < .05$. Die Veränderung der Sequenzstruktur in Block 9 beeinträchtigte die Reaktionsgeschwindigkeit am meisten in Gruppe CT (75 ms) und etwas weniger in den Gruppen NT und NCT (49 ms in beiden Gruppen). Post hoc Vergleiche bestätigten dieses Ergebnis: Die RT-Differenz zwischen dem Mittelwert von Block 8/10 vs. Block 9 ist in Gruppe CT signifikant größer als in Gruppe NT ($t(36) = 2.08$, $p < .05$) und Gruppe NCT ($t(37) = 2.35$, $p < .05$). Es gibt keinen Unterschied zwischen den Gruppen NT und NCT ($t(37) = (-.017)$, $p >> .05$).

Nachbefragung

17 Versuchspersonen (89 %) in Gruppe CT, 13 Versuchspersonen (68 %) in Gruppe NT und 14 Versuchspersonen (70 %) in Gruppe NCT berichteten nach dem Experiment, dass sie Wiederholungen im Reizmaterial bemerkt hatten. 9 Versuchspersonen in Gruppe CT (47 %), 9 Versuchspersonen in Gruppe NT (47 %) und 4 Versuchspersonen in Gruppe NCT (20 %) berichteten, dass ihnen aufgefallen sei, dass sich das wiederholt auftretende Muster an einem Punkt geändert hatte. Die mittleren Punktwerte für explizites Wissen (mögliche Schwankungsbreite zwischen 0 und 12 Punkten) waren 3.9 Punkte (SE = .80) in Gruppe CT, 2.7 Punkte (SE = .62) in Gruppe NT und 1.4 Punkte (SE = .26) in Gruppe NCT. Post hoc Vergleiche deckten einen bedeutsamen Unterschied im Bezug auf explizites Wissen zwischen den Gruppen CT und NCT, $t(37) = 3.14$, $p < .01$, und ebenso einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen NT und NCT auf, $t(37) = 2.24$, $p < .05$. Gruppe CT und Gruppe NT unterscheiden sich im Bezug auf explizites Wissen nicht ($t(36) = 1.1$). Über alle Gruppen hinweg gibt es eine signifikante Korrelation zwischen dem RT-Maß (Differenz des Mittelwertes von Block 8 und 10 zu Block 9) und den Punktzahlen für explizites Wissen, $r = .608$, $p < .01$. Wird die Korrelation für die einzelnen Gruppen berechnet, ergeben sich signifikante Korrelationen für die Gruppen CT ($r = .622$, $p < .01$) und NT ($r = .648$, $p < .01$), aber nicht für Gruppe NCT ($r = .250$, $p \gg .10$).

Diskussion

Experiment 1 replizierte die Befunde von Hoffmann et al. (2001). Erstens ergab sich Sequenzlernen für alle drei Gruppen, die RTs nahmen über die Trainingsblöcke hinweg ab und nahmen wieder zu, als die Sequenzstruktur in Block 9 geändert wurde. Zweitens war das serielle Lernen ausgeprägter in der Gruppe mit kontingenten Toneffekten (CT). Die RTs nahmen in Block 3 bis 8 stärker ab und der Anstieg in Block neun war stärker ausgeprägt als in den übrigen Gruppen. Die Ergebnisse erweitern aber auch die Befunde von Hoffmann et al. (2001): Da die prädiktive Information, die nötig ist, um eine SOC-Sequenz zu lernen, mindestens drei aufeinanderfolgende Stimuli/Reaktionen umfassen muss, muss der Mechanismus, der kontingente Reaktionseffekte zu Repräsentationen von Effektsequenzen verknüpft, in der Lage sein, mindestens drei aufeinanderfolgende Effekte zu verbinden.

Im Bezug auf die Frage, ob das beobachtete Sequenzlernen „implizit“ oder „explizit“ war, ist die signifikante Korrelation von RT und explizitem Lernmaß von Interesse: Wie auch andere Autoren bereits gezeigt haben (siehe z. B. Perruchet & Amorim, 1992), scheinen die beiden Maße nicht vollkommen unabhängig voneinander zu sein. Es ist interessant, dass die Korrelation in

Gruppe NCT nicht einmal annähernd signifikant ist, der Gruppe, die auch das geringste Ausmaß „expliziten“ Sequenzwissens aufweist. Dieses Resultat könnte allerdings mit statistischer Testpower zusammenhängen und sollte daher vorsichtig interpretiert werden.

Der nützliche Einfluss der Toneffekte in Gruppe CT kann nicht auf einen zusätzlichen Gewinn beim expliziten Wissen reduziert werden, da es keinen bedeutsamen Unterschied im Bezug auf das explizite Wissen zwischen Gruppe CT und der Gruppe ohne Toneffekte (NT) gibt.

Die konsistenten und reizkontingenten Töne in Gruppe NCT scheinen den Erwerb oder den Abruf von explizitem Wissen eher behindert zu haben, als ihn zu verstärken. Obwohl die Versuchspersonen die gleiche, 12 Noten lange Melodie in Block 3 bis 8 wieder und wieder hörten, und dann in Block 9 eine weitere Melodie, wurde einer geringeren Anzahl von ihnen bewusst, dass sich das wiederholte Muster an einem Punkt änderte, und sie erinnerten sich an weniger Sequenzfragmente als die Versuchspersonen in den anderen Gruppen.

Die Tatsache, dass die nicht-kontingenten Toneffekte in Gruppe NCT den Erwerb expliziten Wissens eher behindert als gefördert zu haben scheinen, weist auf eine interessante Möglichkeit hin: Nichtkontingente Aktionseffekte wirken möglicherweise der Ausbildung oder dem Behalten expliziten Wissens über Ereignissequenzen entgegen. Niedrige Werte für explizites Wissen in zahlreichen in der Literatur berichteten SRT-Experimenten könnten daher mit der Tatsache zusammenhängen, dass nicht-eindeutige Reizübergänge benutzt wurden, und damit jede Taste nicht-kontingente Effekte erzeugte. Wie unter anderem Zießler und Nattkemper (2001, siehe Abschnitt 1.5.5.) zeigen konnten, können nachfolgende Reize in SRT-Aufgaben wirklich als Effekte wahrgenommen werden. Wenn einem Stimulus zwei oder mehr andere Reize folgen können, bedeutet das daher auch, dass jede Reaktion von zwei oder mehr unterschiedlichen „Effekten“ begleitet wird.

In Experiment 1 bestand vollständige Kompatibilität zwischen Reizen, Reaktionen und Effekten: Die Reize waren räumlich differenzierte Sternchen, die Reaktionen den Reizen räumlich kompatibel zugeordnete Tastendrucke und die Effekte, zumindest in der Gruppe mit kontingenter Aktions-Effekt-Zuordnung den Tasten von links nach rechts aufsteigend zugeordnete Töne. Es ist bekannt, dass sich räumliche S-R-Kompatibilität auf die Reaktionsgeschwindigkeit in Wahlreaktionen auswirkt (z. B. Simon & Rudell, 1967). Zusätzlich lässt sich nachweisen, dass auch zwischen Reaktionen und ihren Effekten leistungsbeeinflussende Kompatibilitätsbeziehungen bestehen (Kunde, 2001). In Experiment 2 sollte die Bedeutung von Reaktions-Effekt-Kompatibilität für den Einfluss von Toneffekten in einer SRT-Aufgabe geprüft werden, wobei der Einfluss von Reiz-Reaktions-Kompatibilität und Reiz-Effekt-Kompatibilität kontrolliert wurde.

2.2. Experiment 2

Experiment 1 zeigte, dass kontingente Aktionseffekte das serielle Lernen auch mit einer SOC-Sequenz verbessern können, obwohl in derartigen Sequenzen unmittelbare Reizübergänge allein keine Informationen über Sequenzstruktur liefern. Experiment 2 war darauf ausgerichtet, diesen Befund auf eine Situation auszuweiten, in der Kompatibilitätsbeziehungen zwischen Reizen und Reaktionseffekten keine Rolle spielen konnten. Zentral präsentierte Buchstaben wurden als Stimulusmaterial verwendet, aufgrund der Annahme, dass es keine dimensionale Überlappung zwischen Buchstaben und horizontal angeordneten Reaktionstasten geben sollte. Diese Annahme wurde durch eine separate Manipulation der Reiz-Reaktions-Zuordnung in einer Gruppe überprüft.

Die kritische Variation betraf die Zuordnung von Tönen zu Reaktionstasten. Die Beziehung zwischen Tasten und Tönen war nun in allen Gruppen außer den Kontrollbedingungen ohne Töne kontingent, aber die Zuordnung von Tastenlokation und Tonhöhe wurde variiert. Dieser Variation liegt eine einfache Überlegung zugrunde: In Analogie zu bekannten Befunden zur S-R-Kompatibilität, also der Tatsache, dass bestimmte Reiz-Reaktions-Zuordnungen effektiver sind als andere, kann man annehmen, dass auch bestimmte Effekte bevorzugt mit bestimmten Aktionen verknüpft werden. Sinnvoll wäre etwa ein Primat von auditorischen Effekten für die Sprechorgane, oder eine besonders einfache Verknüpfung visueller Effekte mit manuellen Aktionen. Auch die Ergebnisse von Kunde (2001) legen nahe, dass es bevorzugte Verknüpfungen von Aktionen und Effekten gibt.

Eine „*Aufsteigende*“ Zuordnung, die der in Gruppe CT in Experiment 1 entsprach, wurde daher mit einer „*Absteigenden*“ Zuordnung, in der die Anordnung der Tonhöhen von links nach rechts umgekehrt war, und einer „*Gemischten*“ Zuordnung, in der es keine systematische Beziehung zwischen Tastenlokation und Tonhöhe gab, verglichen. Die *Aufsteigende* und die *Absteigende* Tasten-Ton-Zuordnung erzeugen eine Tonsequenz, die parallel zur Sequenz der Reaktionslokationen verläuft. Im Gegensatz dazu gibt es mit der *Gemischten* Zuordnung keine systematische Regel für die Vorhersage des Tones, den eine Taste weiter rechts oder weiter links erzeugen wird und ebensowenig eine systematische Regel zur Auswahl einer Taste, die einen höheren oder einen tieferen Ton erzeugen soll. Wenn strukturelle Parallelität zwischen der Reaktionssequenz und der Effektsequenz kritisch ist, sollten sowohl die *Auf-* als auch die *Absteigende* Zuordnung beide Verbesserungen erzeugen. Wenn es jedoch ein ausreichend starkes Stereotyp für tiefere Töne auf der linken und höhere Töne auf der rechten Seite gibt (induziert beispielsweise durch die Tatsache, dass dies die gebräuchliche Zuordnung bei westlichen

Tastensymbolen ist), dann sollte nur das *Aufsteigende* Mapping hilfreich sein (siehe z. B. Kornblum, 1992).

Wenn Reaktions-Effekt-Kontingenz alleine ausreichend ist, um das serielle Lernen zu verbessern, dann sollten alle drei Tongruppen Verbesserungen im Vergleich zur Kontrollbedingung ohne Töne aufweisen.

Methode

Versuchspersonen

Es gab 18 Versuchspersonen in der Gruppe *Aufsteigend* (durchschnittliches Alter = 21, $s=1.7$), 19 Versuchspersonen in der Gruppe *NT* (durchschnittliches Alter = 21 $s = 1.2$), 19 Versuchspersonen in der Gruppe *Absteigend* (durchschnittliches Alter = 23, $s = 4.7$) und 19 in der Gruppe *Gemischt* (durchschnittliches Alter = 22, $s = 4.7$). 5 Versuchspersonen in Gruppe *Aufsteigend*, 3 Versuchspersonen in Gruppe *NT*, 7 Versuchspersonen in Gruppe *Absteigend* und 3 Versuchspersonen in Gruppe *Gemischt* waren männlichen Geschlechts. Wie in Experiment 1 wurden auch in Experiment 2 Versuchspersonen mit Fehlerraten über 10 Prozent ersetzt. Dies betraf 4 Versuchspersonen in Gruppe *Aufsteigend*, 3 Versuchspersonen in Gruppe *NT*, eine Versuchsperson in Gruppe *Absteigend* und 4 Versuchspersonen in Gruppe *Gemischt*. Etwa die Hälfte der Versuchspersonen in jeder Gruppe waren wieder Studenten, die eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten, die übrigen waren Freiwillige, die mit etwa 6 € entlohnt wurden.

Reize und Reaktionen

Der grundsätzliche Aufbau von Experiment 2 entsprach dem von Experiment 1, mit der Ausnahme, dass nun zentral präsentierte Buchstaben statt räumlich variierenden Sternchen als Reize dienten. In jedem Durchgang wurde einer der Buchstaben F, G, H und I in einem 20 Punkt „Times New Roman“ Schrifttyp mittig in der unteren Bildschirmhälfte dargeboten. Die Tasten ‚c‘, ‚v‘, ‚n‘, und ‚m‘ einer deutschen QWERTZ-Tastatur wurden wiederum als Reaktionstasten benutzt.

Die Reiz-Reaktions-Zuordnung war am unteren Bildschirmrand während des gesamten Experimentes eingeblendet, wobei die vier Buchstaben oberhalb der räumlich kompatibel angeordneten Tastennamen c, v, n und m dargeboten wurden. Um zu prüfen, ob Reiz-Reaktions-Kompatibilität eine Rolle spielt, wenn Buchstaben als Reize verwendet werden, wurde die Zuordnung von Buchstabenreizen zu Reaktionstasten innerhalb einer Gruppe (*Aufsteigend*) variiert. Für eine Hälfte der Versuchspersonen in dieser Gruppe waren die Buchstaben den Tasten von links nach rechts in alphabetischer Reihenfolge zugeordnet (F->Taste c, G->Taste v,

H->Taste n, I->Taste m), für die andere Hälfte der Versuchspersonen wurde die alphabetische Reihenfolge aufgebrochen (G->Taste c, F->Taste v, I->Taste n, H-> Taste m).

Mapping	<i>Aufsteigend</i>				<i>Gemischt</i>				<i>Absteigend</i>			
Tasten	c	v	n	m	c	v	n	m	c	v	n	m
Töne	c	e	g	c'	c'	e	c	g	c'	g	e	c

Tabelle 1: Tasten-Ton Zuordnungen in Experiment 2.

Die Tasten-Ton-Zuordnung wurde zwischen den Gruppen variiert. In Experiment 2 waren alle Tasten-Ton-Zuordnungen kontingent, das heißt, jede Taste erzeugte stets denselben Ton. Die experimentelle Manipulation betraf die Zuordnung Tonhöhe zu Tastenlokation. Die genauen Zuordnungen können Tabelle 1 entnommen werden. In der *Aufsteigend*-Bedingung waren die Töne den Tasten aufsteigend von links nach rechts zugeordnet, in Gruppe *Absteigend* nahm die Höhe der erzeugten Töne von links nach rechts ab. In der *Gemischt*-Bedingung waren die Töne den Tasten willkürlich zugeordnet, mit dem Ergebnis, dass je ein höherer und ein tieferer Ton von der linken und der rechten Hand erzeugt wurden (die Töne c'-e-c-g waren den Tasten von links nach rechts zugeordnet.). Wie in Experiment 1 gab es eine Kontrollgruppe, in der keine Toneffekte dargeboten wurden.

Ablauf und Nachbefragung

Wie in Experiment 1 war es den Versuchspersonen nicht bewusst, dass das dargebotene Reizmaterial strukturiert sein würde, das heißt, sie erwarteten, eine normale Wahlreaktionsaufgabe zu bearbeiten. Der grundlegende Ablauf war der gleiche wie in Experiment 1, mit dem Unterschied, dass das Reizmaterial nun aus Buchstaben bestand. Dieselbe Blockabfolge und dieselben Sequenzen wie in Experiment 1 wurden benutzt.

Auch die Nachbefragung wurde so durchgeführt wie in Experiment 1, mit dem Unterschied, dass die Versuchspersonen nun gebeten wurden, Buchstabensequenzen und nicht Lokationssequenzen wiederzugeben.

Ergebnisse

Fehler

Auch in Experiment 2 wurden alle Versuchspersonen mit Fehlerraten von über 10 % aus der Stichprobe ausgeschlossen und ersetzt (siehe Abschnitt Versuchspersonen). Dieses Vorgehen verbietet eine weitere Interpretation der Fehlerdaten. Es gab keine Anzeichen für Speed-Accuracy-Tradeoffs in den Daten. RTs, die mehr als 3 Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt lagen, wurden wieder als Ausreißer klassifiziert und gingen nicht in die Auswertung ein. Dies betraf 1.5 % der Reaktionen, wobei es keine signifikanten Gruppenunterschiede gab.

Reaktionszeiten

Eine explorativ durchgeführte ANOVA für die Gruppe *Aufsteigend* zeigte, dass der Faktor Buchstaben-Tasten-Zuordnung keinen bedeutsamen Einfluss ausübte und auch nicht mit den übrigen Faktoren interagierte. Dies erlaubt den Schluss, dass Reiz-Reaktions-Kompatibilität keine Rolle spielt, wenn die Buchstaben F, G, H und I als Reize mit Reaktionstasten in unterschiedlicher Anordnung verknüpft werden. Die Daten der beiden Hälften der Gruppe *Aufsteigend* wurden daher zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet.

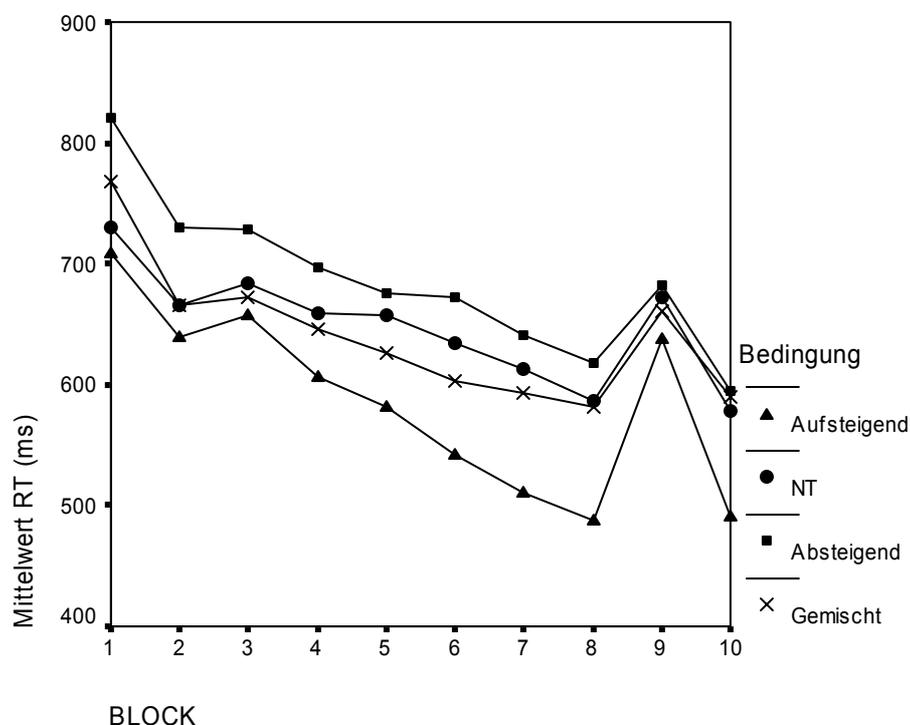


Abbildung 3: Mittlere Reaktionszeiten in den vier Gruppen über die Blöcke hinweg.

Die RT-Daten (Abb. 3) wurden wiederum einer ANOVA unterzogen, mit dem Faktor Gruppe (4 Stufen) und Übung (Trainingsblöcke 3-8) als Messwiederholungsfaktor. Anschließend wurde eine

weitere ANOVA mit dem Mittelwert der Reaktionszeiten aus Block 8 und 10 sowie den Reaktionszeiten in Block 9 durchgeführt.

Es gab eine signifikante Abnahme der RTs in den Blöcken 3 bis 8, $F(5, 355) = 39.21$, $p < .001$. Die mittlere RT nahm in Gruppe *Aufsteigend* um 171 ms ab, in Gruppe *NT* um 98 ms, um 111 ms in Gruppe *Absteigend* und um 91 ms in Gruppe *Gemischt*. Gruppe hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluss, $F(3, 71) = 2.79$, $p < .05$. Die Versuchspersonen in Gruppe *Aufsteigend* reagierten am schnellsten ($m = 564$ ms), gefolgt von den Versuchspersonen in Gruppe *Gemischt* (620 ms), *NT* (639 ms) und *Absteigend* (671 ms). Einzelkontraste zeigten, dass nur die Unterschiede zwischen Gruppe *Aufsteigend* und *NT*, $t(35) = (-2.14)$, $p < .05$, und zwischen Gruppe *Aufsteigend* und Gruppe *Absteigend*, $t(35) = (-2.74)$, $p < .01$, signifikant sind. Die Interaktion von Übung und Gruppe verfehlte die Signifikanz, $F(15, 355) = 1.21$, $p > .05$.

Beim Vergleich des Mittelwerts von Block 8 und 10 mit Block 9 zeigte sich ein bedeutsamer Einfluss des Faktors Block, $F(1, 71) = 81.54$, $p < .001$. Die RTs sind in Block 9 höher als in Block 8 und 10. Es gibt keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Gruppe, $F(3, 71) = 2.15$, $p < .102$. Die Interaktion der Faktoren Sequenzstruktur und Gruppe verfehlte knapp die Signifikanz, $F(3, 71) = 2.49$, $p < .067$.

Einzelkontraste mit dem Lernmaß zeigten jedoch einen signifikanten Vorteil für Gruppe *Aufsteigend* im Vergleich mit allen anderen Gruppen: $t(35) = 1.71$, $p < .048$ (einseitiger Test) für Gruppe *Aufsteigend* vs. Gruppe *NT*, $t(35) = 2.21$, $p < .034$ für *Aufsteigend* vs. *Absteigend*, $t(35) = 2.27$, $p < .029$ für *Aufsteigend* vs. *Gemischt*. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen *Gemischt*, *Absteigend* und *NT* (alle $t_s < 1$).

Um die Wechselwirkung von räumlich definierten Reizen vs. Buchstaben mit Toneffekte vs. keine Toneffekte zu prüfen, wurden die Daten der Gruppen *CT* und *NT* aus Experiment 1 gemeinsam mit den Daten der Gruppen *Aufsteigend* und *NT* aus Experiment 2 einer zusätzlichen Inter-Experiment ANOVA unterzogen. Die Überlegung, die dieser Auswertung zugrunde lag, war, dass nicht nur Reaktions-Effekt-Kompatibilität sondern auch Stimulus-Effekt-Kompatibilität zu den Ergebnissen von Experiment 1 beigetragen haben könnte. Eine signifikante Dreifach-Wechselwirkung von Reizmaterial, Reaktionseffekten und Sequenzstruktur würde auf einen unterschiedlichen Einfluss von Toneffekten mit räumlichen Reizen hindeuten, das heißt einen Einfluss von Reiz-Effekt-Kompatibilität.

Die Zwischen-Experiment ANOVA wurde mit den Faktoren Stimuli (Sternchen vs. Buchstaben), Reaktionseffekt (*Aufsteigend* vs. *NT*) und Sequenzstruktur (Mittelwert von Block 8 und 10 vs. Mittelwert von Block 9) durchgeführt. Obwohl es eine signifikante Wechselwirkung der Faktoren Stimuli und Sequenzstruktur gab, $F(1, 71) = 9.91$, $p < .01$, und auch eine signifikante Interaktion von Reaktionseffekten und Sequenzstruktur, $F(1, 71) = 5.51$, $p < .05$, näherte sich die kritische

Dreifach-Interaktion nicht einmal der Signifikanz ($F < 1$). Die Versuchspersonen zeigten stärker ausgeprägtes Sequenzlernen mit Buchstaben als Reizen, aber der Einfluss der Toneffekte auf das Lernen wurde nicht von der Art der Stimuli beeinflusst.

Nachbefragung

15 Versuchspersonen (83 %) in Gruppe *Aufsteigend*, 14 Versuchspersonen (73 %) in Gruppe *NT*, 16 Versuchspersonen (84 %) in Gruppe *Absteigend* und 11 Versuchspersonen (58 %) in Gruppe *Gemischt* berichteten nach den Experimenten, dass ihnen Wiederholungen im Reizmaterial aufgefallen waren. 8 Versuchspersonen in Gruppe *Aufsteigend* (44 %), 7 Versuchspersonen in Gruppe *NT* (37 %), 3 Versuchspersonen in Gruppe *Absteigend* (16 %) und 2 Versuchspersonen in Gruppe *Gemischt* (10 %) berichteten, dass ihnen aufgefallen sei, dass sich das wiederholt auftretende Muster an einem Punkt geändert hatte. Die mittleren Punktwerte für explizites Wissen (maximal 12 Punkte) waren 5.4 Punkte (SE = 1.01) für Gruppe *Aufsteigend*, 3.5 Punkte (SE = .89) für Gruppe *NT*, 1.7 (SE = .37) für Gruppe *Absteigend* und 1.8 Punkte (SE = .53) für Gruppe *Gemischt*. Post-hoc Vergleiche zeigten einen signifikanten Unterschied im Bezug auf das explizite Wissen zwischen den Gruppen *Aufsteigend* und *Absteigend*, $t(35) = 3.30$, $p < .01$, und auch einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen *Aufsteigend* und *Gemischt*. $t(35) = 3.03$, $p < .01$. Der Unterschied zwischen den Gruppen *NT* und *Absteigend* erreichte nicht die Signifikanz, $t(36) = 1.860$, $p < .071$. Alle anderen Vergleiche verfehlten die Signifikanz (alle $ps > .10$).

Es gab auch in Experiment 2 eine signifikante Gesamtkorrelation zwischen explizitem Wissen und RT: $r = .498$, $p < .001$. Wurde die Korrelation für jede Gruppe einzeln berechnet, ergab sich eine signifikante Korrelation nur für Gruppe *NT* ($r = .709$, $p < .01$, alle anderen $ps > .10$).

Ein Inter-Experiment-Vergleich der Punktwerte für explizites Wissen in den Gruppen *CT*, *NT*, *Aufsteigend* und *NT* (Experiment 2) ergab keine signifikanten Unterschiede, außer für den Vergleich der Gruppen *Aufsteigend* (Experiment 2) und *NT* (Experiment 1) $t(35) = (-2.10)$, $p < .05$. Die Versuchspersonen in Gruppe *NT1* konnten signifikant weniger explizites Wissen als die Versuchspersonen in Gruppe *Aufsteigend* wiedergeben.

Diskussion

Wie in Experiment 1 gibt es wiederum klare Evidenz für serielles Lernen in allen vier Gruppen. Die RTs nahmen über die Trainingsblöcke hinweg ab und nahmen wieder zu, wenn in Block 9 die Sequenzstruktur geändert wurde. Die Wechselwirkung von Gruppe und Übung verfehlte in den Trainingsblöcken allerdings die Signifikanz. Dieses Ergebnis könnte mit der Aufgabenschwierigkeit zusammenhängen: Wie das substantiell höhere RT-Niveau und die stärkere Abnahme der Reaktionszeiten im Training zeigt, ist es offenbar schwerer, auf Buchstaben mit Tastendrücken zu reagieren als auf räumlich verteilte, kompatibel zugeordnete Sternchen. Die gruppenspezifischen Unterschiede im Sequenzlernen könnten daher von anderen, aufgabenspezifischen Lernprozessen, wie dem Erwerb einer stabilen Repräsentation des Reiz-Reaktions-Mappings, überlagert worden sein. Derartige Einflüsse sollten aber im Verlauf des Trainings mehr und mehr an Bedeutung verlieren, und sollten sich nicht auf den Effekt des Strukturwechsels in Block 9 auswirken. Dies ist im Einklang mit den Daten: Obwohl die Wechselwirkung von Sequenzstruktur und Gruppe nur marginal signifikant ist, ist die RT-Zunahme in Block 9 in Gruppe *Aufsteigend* signifikant größer als in allen übrigen Gruppen. Dies weist wiederum auf den nützlichen Einfluss der aufsteigend zugeordneten Toneffekte hin. Die beiden anderen Tongruppen zeigen keinen hilfreichen Einfluss der Effekte. Numerisch weisen sie hinsichtlich des Lernmaßes sogar einen leichten Nachteil gegenüber der Gruppe ohne Toneffekte auf. Kompatibilität zwischen Reaktionen und ihren Effekten scheint also eine Voraussetzung für die Nutzung von Effekten für den Aufbau handlungssteuernder Strukturen zu sein (siehe den oben skizzierten Lernmechanismus, Abschnitt 1.5.5.).

Auf der anderen Seite hat Stimulus-Effekt-Kompatibilität keinen Einfluss. Der Inter-Experiment-Vergleich der Gruppen mit einem aufsteigenden Mapping und der NT-Gruppen ergab keine Wechselwirkung von Sequenzstruktur, Reizmaterial und Reaktionseffekten. Der beobachtete Effekt beruht offenbar auf Reaktions-Effekt-Kompatibilität und nicht auf Stimulus-Effekt-Kompatibilität.

Wie in Experiment 1, berichtet auch in Experiment 2 die Gruppe mit einem aufsteigenden Tasten-Ton Mapping das größte Ausmaß an explizitem Sequenzwissen, was sich daran zeigt, wie viele Versuchspersonen spontan von einem sich wiederholenden Muster und von einer später eintretenden Veränderung dieses Musters berichten, sowie an dem Ausmaß korrekt berichteter Sequenzfragmente. Es gab wiederum keinen statistisch signifikanten Unterschied hinsichtlich des expliziten Wissens zwischen den Gruppen *Aufsteigend* und *NT*. Sowohl die *Absteigend*- als auch die *Gemischt*-Gruppe zeigten jedoch im Vergleich mit Gruppe *Aufsteigend* vermindertes explizites Wissen.

Zusammenfassende Diskussion von Experiment 1 und 2

Experiment 1 und 2 ergaben vier Hauptergebnisse:

Erstens haben die Toneffekte eine klare Auswirkung auf das serielle Lernen: In den Gruppen mit einer aufsteigenden Tasten-Ton-Zuordnung war deutlich mehr Lernen als in den Kontrollbedingungen zu beobachten. Die Befunde von Hoffmann et al. (2001) konnten also repliziert werden: Aufgabenirrelevante Toneffekte können in einer seriellen Lernsituation in die Verhaltenssteuerung einbezogen werden. In Experiment 1 und 2 zeigt sich dieser nützliche Einfluss auch in einer statistisch und relational weniger vorhersagbaren Umwelt, nämlich mit Second Order Conditional Sequenzen. Dies bedeutet, dass der Verkettungsmechanismus, der antizipierbare Effektsequenzen erzeugen soll, in der Lage sein muss, mindestens drei aufeinanderfolgende Reaktionseffekte miteinander zu verknüpfen.

Zweitens ist der Einfluss der Toneffekte unabhängig von den eingesetzten Reizen. Obwohl die generelle Lernrate und auch das generelle RT-Niveau in Experiment 2 höher ist, erreicht die Dreifachinteraktion von Reizmaterial, Reaktionseffekten und Sequenzstruktur nicht Signifikanz. Obwohl die Vorteile durch kontingente Toneffekte für die Buchstabengruppen numerisch größer sind, scheinen die Effekte von Reiz-Reaktions-Mapping und Reaktions-Effekt-Mapping additiv zu sein.

Dieses Ergebnis ist von Interesse im Bezug auf die Frage, ob Reiz-Effekt-Kompatibilität in den Experimenten 1 und 2 eine Rolle gespielt haben könnte: Wäre dies der Fall gewesen, wäre eine Wechselwirkung zwischen Reizmaterial und Reaktions-Effekt-Mapping zu erwarten gewesen, mit stärkeren Vorteilen mit dem aufsteigenden Tasten-Ton-Mapping in Experiment 1 – da von links nach rechts angeordnete Sternchen die gleiche Art von dimensionaler Überlappung (Kornblum, 1992) mit aufsteigenden Tönen aufweisen wie von links nach rechts angeordnete Reaktionslokationen. Da diese Interaktion sich nicht zeigt, kann angenommen werden, dass Reaktions-Effekt-Kompatibilität und nicht Stimulus-Effekt-Kompatibilität tatsächlich der entscheidende Faktor ist.

Drittens wird der Einfluss der kontingenten Toneffekte auf das Lernen von der Reaktions-Effekt-Zuordnung beeinflusst. Töne, die den Tasten von links nach rechts aufsteigend zugeordnet sind, verbessern das serielle Lernen deutlich, sowohl im Vergleich mit einer Kontrollgruppe ohne Toneffekte als auch im Vergleich mit Bedingungen mit einer absteigenden oder gemischten Zuordnung.

Die Kompatibilitätseffekte, die zwischen horizontal angeordneten Reaktionslokationen und nach Tonhöhe geordneten Tönen bestehen, sind vermutlich Folge kulturell überformter Lernprozesse, etwa der Tatsache, dass diese Zuordnung die auf westlichen Tasteninstrumenten übliche ist.

Diese „erworbene Kompatibilität“ wäre in Analogie zu sehen etwa zu den Beziehungen zwischen numerisch geordneten Ziffern und Reaktionslokalationen („SNARC-Effekt“, siehe z. B. Fias, 2001), die zweifellos ebenfalls nicht angeboren sind. Von dieser Warte aus gesehen erscheint es auch möglich, dass ausreichendes Training mit den beiden anderen Zuordnungen schliesslich zu Kompatibilitätsbeziehungen und damit einer Leistungssteigerung durch die Toneffekte geführt hätte (siehe auch Barber & O’Leary, 1997 für eine theoretische Analyse kurz- und langfristiger S-R-Assoziationen).

Viertens scheint das Ausmaß des wiedergegebenen expliziten Wissens im Zusammenhang mit dem motorischen Sequenzlernen zu stehen, wie die signifikanten Korrelationen zwischen RT-Maß und Punktwerten für explizites Wissen zeigen. Dies deutet darauf hin, dass das beobachtete Lernen nicht zur Gänze „implizit“ war, ein Ergebnis, das nicht überrascht, da die Versuchspersonen keine Ablenkaufgabe zu bearbeiten hatten. Obwohl viele Versuchspersonen spontan berichteten, dass sie Wiederholungen im Reizmaterial bemerkt hatten, ist das wiedergegebene explizite Sequenzwissen eher fragmentarisch: Die Gesamtpunktzahlen deuten darauf hin, dass selbst in den Gruppen mit sehr ausgeprägtem motorischen Lernen von kaum einer Versuchsperson mehr als die Hälfte der Trainingssequenz wiedergegeben werden konnte. Dies könnte allerdings mit dem eher konservativen Maß für explizites Wissen zusammenhängen, das verwendet wurde.

Die „Dissoziation“ zwischen dem Wissen über die Existenz eines sich wiederholenden Musters und der Unfähigkeit, viel von diesem Muster wiederzugeben, mag zunächst paradox erscheinen. Sie illustriert jedoch nur, in Verbindung mit dem deutlichen Einfluss der Toneffekte auf die RTs, dass das, was in einer SRT-Aufgabe gelernt wird, und auch das, was die Leistung beeinflusst, vermutlich (ideo-) motorisches Wissen ist. Die Versuchspersonen erwerben primär Verknüpfungen zwischen sensorischen Repräsentationen aufeinander folgender Handlungen. Der Erwerb dieser Verknüpfungen kann durch adäquate zusätzliche Effekte unterstützt werden. Adäquat bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die zusätzlichen Effekte den Aufbau eines konsistenten sensorischen Abbildes erlauben. Die Tatsache, dass Töne besonders gut geeignet sind, um seriell verkettet zu werden – schlicht aufgrund der Tatsache, dass wir es gewohnt sind, Töne nicht allein, sondern als Teil von Melodien wahrzunehmen – könnte ein weiterer Faktor sein, der zu dem nützlichen Einfluss beiträgt. In der Gedächtnispsychologie gibt es einen Befund, der diese Alltagsbeobachtung weiter qualifiziert: Das sogenannte „Echo-Gedächtnis“, die auditorische Variante des etwa von Sperling (1960) untersuchten Ultrakurzzeitgedächtnisses (UKZG), hat eine wesentlich längere passive Behaltensspanne als sein visuelles Pendant. Wie Darwin, Turvey und Crowder (1972) zeigen konnten, hat das „Echo-Gedächtnis“ eine effektive Speicherdauer von 2 bis 4 Sekunden, ein Vielfaches der Speicherdauer des visuellen UKZG.

Auditorische Reize beziehungsweise Effekte sind also wesentlich länger für weitere Verarbeitung verfügbar als etwa visuelle Reize.

Der Aufbau konsistenter sensorischer Abbilder wird gestört, wenn Aktionseffekte nicht kontingent oder reaktionskompatibel sind. Dies hat interessante Auswirkungen auf die beiden unterschiedlichen Lernmaße: Die Gruppen mit nicht-kontingenten oder inkompatiblen Toneffekten erreichen ein den NT-Gruppen vergleichbares Niveau im Bezug auf das mittels RT gemessene Sequenzwissen, aber ein niedrigeres Niveau im Bezug auf das explizite Wissen. Dieses Ergebnis schließt auch die Interpretation aus, dass der nützliche Einfluss der Toneffekte in den Gruppen CT und *Aufsteigend* ausschließlich auf einer Zunahme des expliziten Wissens beruht. Kurz gesagt: Adäquate Toneffekte scheinen hauptsächlich das motorische Lernen zu verbessern, während inadäquate Toneffekte das motorische Lernen kaum beeinflussen, aber dafür den Erwerb oder die Wiedergabe expliziten Sequenzwissens behindern. Wodurch genau dieses Ergebnismuster entsteht, bleibt zu klären. Eine mögliche Interpretation wäre, dass der andauernde Versuch, Aktionen und Effekte zu konsistenten Abbildern zu integrieren, Ressourcen beansprucht, die sonst der Beobachtung des eigenen Verhaltens und dem damit verbundenen Aufbau bzw. der Speicherung expliziten Wissens gewidmet werden könnten.

Eine Frage, die nicht allein aufgrund der vorliegenden Daten beantwortet werden kann ist, ob die nicht-kontingenten und inkompatiblen Reaktionseffekte entweder gar nicht mit den entsprechenden Reaktionen verknüpft werden, oder ob solche Verknüpfungen lediglich nicht genutzt werden können, um das serielle Lernen zu verbessern. Im letzteren Fall würde man vom Ideomotor-Standpunkt aus eine leistungsmindernde Wirkung vorhersagen, weil antizipierte inkompatible Effekte falsche Reaktionen bahnen würden, ebenso wie ein inkompatibler Stimulus eine falsche Reaktion aktiviert (siehe Kunde, 2001).

Besonders in Experiment 2 gibt es jedoch keine systematische Leistungsabnahme in den Gruppen mit inkompatiblen Reaktionseffekten, wenn man sie mit der NT-Gruppe vergleicht. Insofern ist die sparsamste Annahme bei der momentanen Datenlage, dass die Toneffekte gar nicht erst in die sensorischen Reaktionsabbilder integriert werden. Derartige Prioritäten bei der Bildung von Aktions-Effekt-Beziehungen wären durchaus sinnvoll, da sie beispielsweise eine schnellere Verknüpfung „plausibler“ Handlungseffekte erlauben, während bei handlungsbegleitenden Reizereignissen, bei denen es weniger plausibel ist, dass es sich um tatsächliche Effekte der Bewegung handelt, möglicherweise zufällige Gleichzeitigkeit mit einer Aktion nicht unmittelbar zur Verknüpfung führen würde. Auch in der Literatur zum assoziativen Lernen sind derartige Prädispositionen für Verknüpfungen berichtet worden, allerdings in erster Linie für S-R Koppelungen (z. B. Öhmann & Soares, 1998; vergleiche auch den Begriff der „Preparedness“, z. B. Seligman & Hager, 1972).

Alles in allem sind die Ergebnisse gut mit dem in Abschnitt 1.5.5. skizzierten Ideomotor-Mechanismus zum Sequenzerwerb vereinbar. Danach bilden die Versuchspersonen Sequenzrepräsentationen, die auf Folgen von Reaktionseffekten basieren. Die Antizipation zukünftiger Reaktionseffekte, die durch strukturierte Reaktions-Effekt-Sequenzen ermöglicht wird, führt zu effizienterem Sequenzlernen. Der Mechanismus, der Reaktionseffekte zu Sequenzen verkettet, ist offenbar in der Lage, mindestens Redundanz zweiter Ordnung auszuschöpfen. Damit der Mechanismus arbeiten kann, müssen die Effekte mindestens zwei Bedingungen erfüllen: Sie müssen kontingent mit den Reaktionen einhergehen und sie müssen mit den Reaktionen kompatibel sein.

Wenn man annimmt, dass das in einer SRT-Aufgabe erworbene Wissen in einer zunehmend verfeinerten Repräsentation von erwarteten Reaktionseffekten besteht, seien sie propriozeptiv oder external, bleibt zu klären, wann diese Repräsentationen aktiviert werden und wie die Verknüpfungen zwischen antizipierten Effekten in unterschiedlichen sensorischen Dimensionen zustandekommen. Wie in Abschnitt 1.7. bereits dargestellt, gehen Autoren im Bereich der Psychomotorik bereits seit langem davon aus, dass es einen „Motorpuffer“, das heißt eine Speichereinheit geben muss, in der motorische Repräsentationen (Motorprogramme oder Chunks) vor der Reaktionsausführung in einem aktivierten Zustand gehalten werden können (z. B. Henry & Rogers, 1960; Sternberg, Monsell, Knoll & Wright, 1978; Verwey, 1999). Aus Sicht des ideomotorischen Prinzips und aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse kann man vermuten, dass es sich bei diesem Speicher um einen „Effektpuffer“ handelt, der die Repräsentation herzustellender Reaktionseffekte erlaubt. Eine Möglichkeit, diese Annahme systematisch zu überprüfen, ist die Einführung zusätzlicher, externaler Reaktionseffekte in ein Sequenzvorbereitungsparadigma, wie es von den genannten Autoren eingesetzt wurde. Experiment 3 wurde gestaltet, um eben dies zu erreichen.

2.3. Experiment 3

Ziel von Experiment 3 war es, die mit der SRT-Aufgabe erhobenen Befunde zu differenzieren und den unterstellten ideo-motorischen Lernmechanismus und die Einflüsse redundanter Aktionseffekte bei der Ausführung motorischer Sequenzen zu konkretisieren. Dazu wurden die Versuchspersonen aufgefordert, einige kurze Sequenzen von Tastendrücken zu trainieren und sie anschließend auf ein spezifisches Startsignal hin so schnell wie möglich auszuführen. Im Zusammenhang mit einem solchen Paradigma zum Training kurzer Tastendrucksequenzen lassen sich einige Vorhersagen aus dem in Abschnitt 1.5.5. skizzierten hypothetischen Lernmechanismus machen. Wenn Repräsentationen von Toneffekten erstens tatsächlich *vor* der Initiierung einer Handlung aktiviert werden und zweitens einzelne Aktionen mit geeigneten Aktionseffekten tatsächlich schneller zu antizipierbaren Sequenzen verknüpft werden, sollte sich dies auch in einem derartigen Experiment zeigen. Konkret ist zu erwarten, dass der Unterschied in der Initiierungszeit zwischen komplexeren und weniger komplexen Sequenzen (siehe Abschnitt 1.7.) mit geeigneten Toneffekten im Trainingsverlauf schneller abnimmt als in einer Vergleichsbedingung ohne Toneffekte. Nach dieser Logik sollten sich entsprechende Reaktionseffekte also sowohl auf das generelle Leistungsniveau auswirken, zumindest nach einer gewissen Trainingszeit, als auch auf den Sequenzlängeneffekt.

In Experiment 3 trainierten die Versuchspersonen vier unterschiedliche Tastendrucksequenzen, je zwei kurze (2 Elemente) und zwei längere Folgen (6 Elemente). Je eine kurze und eine lange Sequenz war mit distinkten, den Tasten aufsteigend zugeordneten Toneffekten verknüpft, bei den übrigen zwei Tastenfolgen wurde durch jeden Tastendruck der gleiche Toneffekt erzeugt.

Das Experiment war in Anlehnung an eine Trainingsstudie von Verwey (1999) gestaltet und wurde mit jeder Versuchsperson an drei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Als Reizmaterial dienten auf einem Bildschirm dargebotene Kästchen, die der Anordnung der Reaktionstasten entsprachen und in jedem Durchgang in einer bestimmten Abfolge aufleuchteten und damit die Sequenzen vorgaben. Als Reaktionstasten dienten neun Tasten einer Standard-PC-Tastatur, die mit den Fingern beider Hände sowie dem Daumen der dominanten Hand bedient wurden. Die verwendeten Sequenzen waren eindeutig, das heißt, es gab keine Wiederholungen von Reizen/Tastendrücken innerhalb einer Sequenz. Die Sequenzen waren in ihrer inneren Struktur stets vergleichbar, wurden aber von Versuchsperson zu Versuchsperson variiert (s. u.).

*Methode*Versuchspersonen

Insgesamt 18 Versuchspersonen nahmen an dem Experiment teil, alle waren Psychologiestudenten im Grundstudium, die durch ihre Teilnahme eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten. Das mittlere Alter der Versuchspersonen betrug 22,7 Jahre ($s = 3.4$).

Reize und Reaktionen

Das Experiment wurde auf einem MS-DOS kompatiblen PC durchgeführt. Der Bildschirm war schwarz und alle präsentierten Reize hellblau oder rot. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 4.

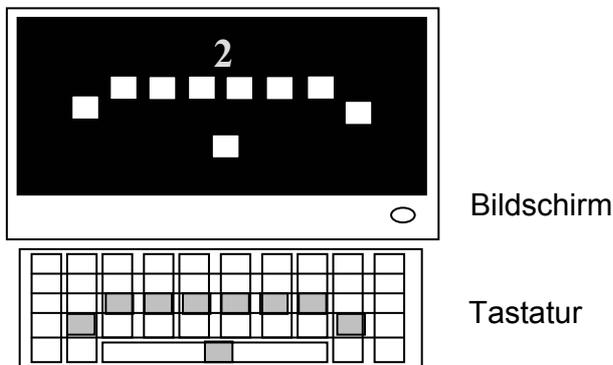


Abbildung 4: Schematischer Versuchsaufbau in Experiment 3.

Die Anzeige bestand aus neun hellblauen, unausgefüllten Kästchen, die in der gleichen Weise auf dem Bildschirm angeordnet waren wie die Reaktionstasten auf der Tastatur. Zusätzlich zu den Kästchen wurde für jede Sequenz am oberen Bildschirmrand ein spezifischer Hinweisreiz (*cue*) eingeblendet. Diese Hinweisreize waren die Ziffern 1, 2, 5 und 6, die in Rot in einem 60 Punkt „Times New Roman“ Font dargestellt waren, was einer Darbietungshöhe von ca. 1,1 cm entspricht. Die Kästchen waren Quadrate mit einer Kantenlänge von 1,5 cm und wurden in einem Abstand von 1 cm voneinander präsentiert. Die Finger beider Hände der Versuchspersonen ruhten auf den markierten Tasten y, d, f, g, h, j, k und der „Punkt“-Taste einer QWERTZ-Tastatur (siehe Abb. 4). Der Daumen der dominanten Hand lag auf der Leertaste. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, so schnell wie möglich die entsprechende Taste zu drücken, wenn eines der Kästchen aufleuchtete, das heißt wenn das unausgefüllte blaue Quadrat auf dem Bildschirm ausgefüllt wurde. Jeder Tastendruck löste unmittelbar die Darbietung des nächsten Reizes, das heißt das Aufleuchten des nächsten Quadrates, aus, unabhängig davon ob die falsche oder richtige Taste gedrückt worden war. Das RSI betrug also im Gegensatz zu

Experiment 1 und 2 0 ms, die Ausführung durch die Versuchspersonen war *self-paced*. Jeder Tastendruck erzeugte einen Toneffekt, und zwar für je zwei Sequenzen einen Ton der C-Dur Tonleiter mit zusätzlicher Oktave und None, die den Tasten von links nach rechts aufsteigend zugeordnet waren. Für die anderen beiden Sequenzen erzeugte jeder Tastendruck stets den gleichen Ton, der die gleiche Klangfarbe hatte wie die Toneffekte der Experimentalbedingung, aber zwei Oktaven höher war. Dieser stets gleiche Toneffekt wird im Folgenden der Einfachheit halber als „Klick“ bezeichnet. Die Töne wurden über externe Lautsprecher präsentiert. Bei einem falschen Tastendruck wurde stattdessen ein kurzes Warnsignal aus dem PC-eigenen Lautsprecher dargeboten.

Die zu trainierenden Sequenzen waren jeweils eindeutig, das heißt es wiederholte sich kein Tastendruck innerhalb einer Sequenz. Ein Beispiel für eine Folge der Länge 6 ist g-k-y-,Punkt'-Leertaste-j, ein Beispiel für eine Sequenz der Länge 2 k-Leertaste. Die Permutation der Sequenzen erfolgte über die Tastenlokationen hinweg, indem von einer Versuchsperson zur nächsten jeder einzelne Tastendruck im Uhrzeigersinn um eine Position verschoben wurde, so dass sich aus der obigen Sechsersequenz für die darauf folgende Versuchsperson die Tastenfolge h-,Punkt'-d-Leertaste-y-k ergibt. Insgesamt entstehen auf diese Weise neun unterschiedliche Permutationen für jede Sequenz. Jeweils zwei Versuchspersonen bearbeiteten die gleichen Varianten. Die distinkten Toneffekte waren dabei jeweils unterschiedlichen Folgen zugeordnet. Bearbeiteten Versuchsperson A und B etwa die Sechsersequenzen P und Q und die Zweiersequenzen R und S, so waren für Versuchsperson A die Sequenzen P und R mit distinkten Toneffekten verknüpft, für Versuchsperson B die Sequenzen Q und S. Diese Manipulation diente dazu, fingerspezifische Effekte, die die Ergebnisse verzerren könnten, von vorneherein auszuschließen.

Ablauf

Die Versuchspersonen wurden zu Beginn des Experimentes durch einen am Bildschirm dargebotenen Text darüber informiert, dass sie im Folgenden kurze Sequenzen von Tastendrücken trainieren sollten. Die Anzeige und die Reaktionsanordnung wurden erklärt, und die Versuchspersonen wurden aufgefordert, sich nicht nur die vier durch aufleuchtende Kästchen vorgegebenen Sequenzen, sondern auch die gleichzeitig eingeblendeten Cue-Ziffern zu merken, weil sie die Abfolgen später auch „auswendig“, nur auf den Hinweisreiz hin, würden eingeben müssen.

Ein einzelner Durchgang sah folgendermaßen aus: Auf dem Bildschirm wurde der entsprechende Cue eingeblendet, gleichzeitig wurde das Startkästchen ausgefüllt. Wenn die Versuchsperson eine Taste gedrückt hatte, erklang unmittelbar der entsprechende Ton bzw. das Fehlersignal, und das

zweite Kästchen wurde ausgefüllt, und so weiter. Am Ende einer Sequenz gab es ein Intertrialintervall von 1300 ms, währenddessen zunächst an Stelle des Cues ein Fixationskreuz gezeigt wurde, das dann 300 ms vor dem Beginn des nächsten Trials verschwand. Nach diesem Intervall wurden der nächste Cue sowie das nächste Startkästchen eingeblendet. Die neun Quadrate blieben während der gesamten Trainingsphase auf dem Bildschirm.

Insgesamt gab es 8 Sitzungen zu je 240 Durchgängen, das heißt jede Sequenz wurde pro Sitzung 60 mal geübt. Die 240 Durchgänge verteilten sich auf 3 Blöcke. Am Ende jeden Blocks gab es eine Pause von 24 s, innerhalb derer für 10 s die mittlere Reaktionszeit und die Fehlerrate eingeblendet wurde. 4 s vor Beginn des nächsten Blockes erschien als vorbereitendes Warnsignal der Satz „Achtung, gleich geht es weiter!“. Am Ende jeder Sitzung gab es eine Testphase mit 40 Durchgängen, also 10 Durchgängen je Sequenz, in der nicht mehr für jeden Tastendruck ein Kästchen dargeboten wurde, sondern nur noch der sequenzspezifische Cue und das Startkästchen eingeblendet wurden. Dies sollte einerseits der Überprüfung des Sequenzwissens der Versuchspersonen dienen und sie andererseits dazu ermutigen, sich zunehmend von den tastenspezifischen Reizen unabhängig zu machen. Die Sitzungen 1 bis 3 fanden am ersten Tag des Experimentes statt, Sitzung 4 bis 6 am zweiten Tag und Sitzung 7 und 8 am dritten Tag. Zwischen den Sitzungen am gleichen Tag konnten die Versuchspersonen jeweils eine kurze Pause einlegen.

Die Initiierungszeiten wurden jeweils ab der Präsentation von Cue und Startkästchen bis zur Registrierung des ersten Tastendrucks gemessen. Die Interresponsezeiten wurden jeweils von der Registrierung eines Tastendruckes bis hin zum nächsten Tastendruck erfasst. Die Initiierungs- und Interresponsezeiten von Sequenzen, in denen ein oder mehrere Fehler gemacht worden waren, wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Testphasen

Die Testphasen am Ende jeder Trainingssitzung erbrachten aufgrund der geringen Trialzahl und der vergleichsweise hohen Fehlerzahlen keine Datenmenge, die für varianzanalytische Verfahren ausreichend gewesen wäre. Ihre Ergebnisse werden daher im Folgenden nicht berichtet. Sie stimmten jedoch im Trend mit den nachfolgend dargestellten Ergebnissen der Trainingssitzungen überein.

Trainingssitzungen

Fehler

Da ein einzelner Fehler innerhalb einer Sequenz häufig Folgefehler, etwa durch Korrekturversuche, nach sich zog, wurden die Fehler nicht für jede Sequenzposition einzeln ausgewertet. Stattdessen wurde jede Sequenz mit mindestens einem Fehler als falsch gewertet und von der RT-Auswertung ausgeschlossen. Die Fehlerauswertung bezieht sich daher ausschließlich auf die Häufigkeiten fehlerhafter Sequenzen, nicht falscher Tastendrücke.

Insgesamt wurde über alle Trainingssitzungen und Versuchspersonen hinweg in 12,8 Prozent ($s = 6.01$) aller Durchgänge mindestens ein Fehler gemacht. Eine ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Sitzung (1-8), Sequenzlänge (2 vs. 6) und Effekt (Ton vs. Klick) ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor Sitzung, $F(7, 119) = 4,35$, $p < .001$, die Anzahl der fehlerhaft eingegebenen Sequenzen nimmt über die Trainingsdauer hinweg ab. Der Effekt des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 17) = 59,60$, $p < .001$, in kurzen Sequenzen werden seltener Fehler gemacht als in langen Sequenzen. Dieses Ergebnis ist nicht weiter verwunderlich, da in einer langen Sequenz dreimal so viele Möglichkeiten für einen fehlerhaften Tastendruck vorhanden sind. Der Haupteffekt des Faktors Effekt ist nicht signifikant ($F < 1$), die Art der präsentierten Toneffekte hat keinen Einfluss auf die Anzahl fehlerhafter Sequenzen. Die Wechselwirkungen Sitzung x Sequenzlänge ($F(7, 119) = 1,40$), Sitzung x Effekt ($F(7, 119) = 1,01$), Sequenzlänge x Effekt ($F < 1$) sowie die Dreifachwechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge x Effekt ($F(7, 119) = 1,52$) verfehlten ebenfalls alle die Signifikanz (alle $ps \gg 0,05$).

Initiierungszeiten

Die Zeit, die von der Darbietung des ersten Kästchens bis zum ersten Tastendruck verstrich, wird als Maß für den Zeitaufwand der Sequenzinitiierung betrachtet. Die Initiierungszeiten wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Sitzung (1-8), Sequenzlänge (2 vs. 6) und Effekt (Klick vs. Ton) unterzogen (siehe Abb. 5 und 6). Es ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Sitzung, $F(7, 119) = 59,36$, $p < .001$. Die Sequenzen werden im Verlauf des Trainings immer schneller initiiert. Auch der Effekt des Faktors Sequenzlänge war signifikant, $F(1, 17) = 11,32$, $p < .01$. Kurze Sequenzen werden schneller initiiert als lange Sequenzen. Es gibt keine signifikante Hauptwirkung des Faktors Effekt ($F < 1$), Klicksequenzen und Tonsequenzen unterschieden sich global nicht im Bezug auf die Initiierungszeiten. Die Wechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge ist signifikant, $F(7, 119) = 3,70$, $p < .001$. Nach Abbildung 5 beurteilt, nimmt der Sequenzlängeneffekt mit zunehmender Trainingsdauer ab. Die signifikante Wechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge könnte allerdings auch auf eine Zunahme des Sequenzlängeneffektes von Sitzung 1 nach Sitzung zwei zurückzuführen sein. Eine weitere

ANOVA nur mit den Daten von Sitzung 2 bis 8 bestätigte aber eine signifikante Abnahme des Sequenzlängeneffektes über die Trainingsblöcke, $F(6, 102) = 4,43$, $p < .001$. Die Wechselwirkung Sitzung x Effekt ist ebenfalls signifikant, $F(7, 119) = 11,50$, $p < .001$. Die Wirkung der Toneffekte auf die Initiierungszeiten verändert sich über die Trainingsdauer hinweg. In den frühen Trainingssitzungen werden die Tonsequenzen etwas schneller als die Klicksequenzen initiiert, in den späten Sitzungen dreht sich dieses Muster um. Da dieses Ergebnis augenscheinlich durch den Faktor Sequenzlänge moderiert wird, folgt eine genauere Analyse weiter unten.

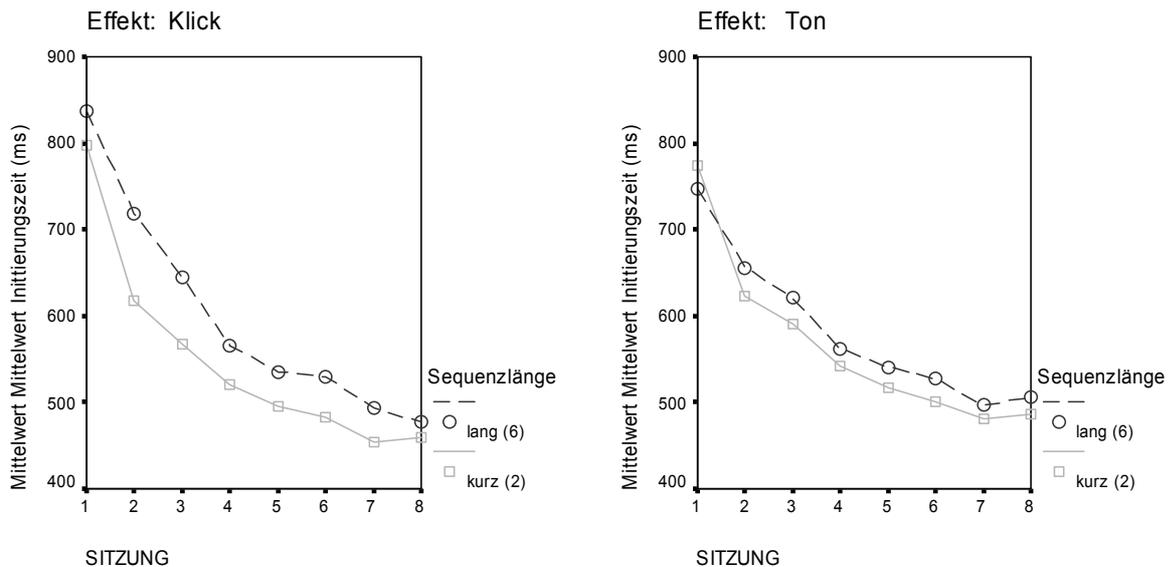


Abbildung 5 und 6: Initiierungszeiten über die Trainingsdauer, aufgeteilt nach Effekt und Sequenzlänge.

Die Wechselwirkung Sequenzlänge x Effekt ist nicht signifikant, $F(1, 71) = 1,63$, $p >> .05$. Auch die Dreifachwechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge x Effekt verfehlte die Signifikanz, $F(7, 119) = 1,74$, $p < .104$. Eine genaue Betrachtung des Verlaufes der Initiierungszeiten (siehe Abb. 5 und 6) legt allerdings eine differentielle Wirkung der Toneffekte bei den langen bzw. kurzen Sequenzen nahe. Es wurden daher zwei zusätzliche ANOVAs durchgeführt, jeweils mit den Faktoren Sitzung und Effekt, aber getrennt für die Sequenzen mit 6 und die mit 2 Elementen (Abb. 7 und 8).

Bei Sequenzlänge 2 ergab sich wiederum ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Sitzung, $F(7, 119) = 50,85$, $p < .001$, die Initiierungszeiten nehmen im Laufe des Trainings ab. Der Haupteffekt des Faktors Effekt ist nicht signifikant ($F < 1$). Die Wechselwirkung Sitzung x Effekt ist signifikant, $F(7, 119) = 2,17$, $p < .41$. Die Initiierungszeiten für Ton- und Klicksequenzen unterscheiden sich anfangs nicht, später im Training werden die Tonsequenzen etwas langsamer initiiert (Abb. 7).

Für Sequenzlänge 6 ergibt sich ein anderes Bild. Der Haupteffekt des Faktors Sitzung ist wiederum signifikant, $F(7, 119) = 55,27$, $p < .001$. Der Faktor Effekt hat wieder allein keinen

signifikanten Einfluss, $F(1, 17) = 1,50$, $p \gg .05$. Auch hier ist die Wechselwirkung Sitzung x Effekt signifikant, $F(7, 119) = 6,33$, $p < .001$, muss aber hier anders interpretiert werden als bei den kurzen Sequenzen: Lange Tonsequenzen werden früh im Training deutlich schneller initiiert als lange Klicksequenzen, dieser Unterschied verliert sich aber mit zunehmender Übung (Abb. 8).

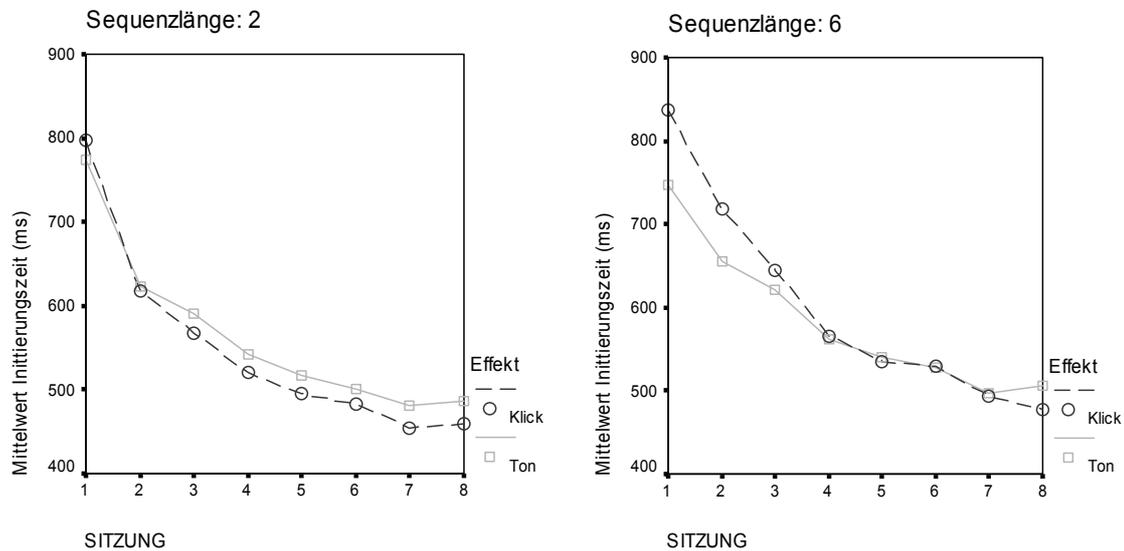


Abbildung 7 und 8: Initiiierungszeiten über die Trainingsdauer, aufgeteilt nach Sequenzlänge und Effekt.

Zur Überprüfung der Auswirkung der Toneffekte auf den Sequenzlängeneffekt wurden die Daten erneut aufgeteilt, und zwar wurden nun Klick- und Tonsequenzen getrennt analysiert (siehe Abb. 5 und 6).

Für die Klicksequenzen ergab sich wiederum ein signifikanter Übungseffekt, $F(7, 11) = 62,58$, $p < .001$. Sequenzlänge hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss, $F(1, 17) = 11,13$, $p < .01$. Lange Sequenzen werden langsamer initiiert als kurze. Die Wechselwirkung von Sequenzlänge und Sitzung ist ebenfalls signifikant, $F(7, 119) = 3,00$, $p < .01$. Der Sequenzlängeneffekt nimmt im Laufe der Übung ab (Abb. 5).

Etwas anders stellen sich die Ergebnisse für die Tonsequenzen dar (Abb. 6): Zwar ergibt sich wiederum ein signifikanter Übungseffekt, $F(7, 119) = 47,46$, $p < .001$, aber der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist weit von der Signifikanz entfernt ($F < 1$). Die Initiierungszeiten von langen und kurzen Tonsequenzen unterscheiden sich nicht, das heißt, es ergibt sich hier kein signifikanter Sequenzlängeneffekt. Auch hier zeigt sich eine signifikante Wechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge, $F(7, 119) = 2,30$, $p < .05$, die sich jedoch ausschließlich auf das Datenmuster in der ersten Trainingssitzung zurückführen lässt. Eine erneute Analyse ohne Sitzung 1 ergab für die Klicksequenzen weiterhin eine hochsignifikante Wechselwirkung Sequenzlänge x Sitzung ($F(6, 102) = 5,19$, $p < .001$), für die Tonsequenzen verschwindet die Wechselwirkung jedoch ($F < 1$).

Interresponsezeiten

Die Interresponsezeiten wurden jeweils vom Beginn eines Tastendruckes bis zum Beginn des nächsten Tastendruckes gemessen. Für die Zweiersequenzen geht jeweils nur eine Messung in die hier analysierten mittleren Interresponsezeiten ein (T2), für die Sechsersequenzen sind es fünf Messungen (T2, T3, T4, T5 und T6).

Die mittleren Interresponsezeiten wurden ebenfalls einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Sitzung (1-8), Sequenzlänge (2 vs. 6) und Effekt (Ton vs. Klick) unterzogen (siehe Abb. 9). Es ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für Sitzung, $F(7, 119) = 92,87$, $p < .001$. Die Sequenzen werden im Laufe des Trainings immer schneller ausgeführt. Der Effekt des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 17) = 57,10$, $p < .001$. Ein einzelner Tastendruck innerhalb einer langen Sequenz wird im Schnitt langsamer ausgeführt als innerhalb einer kurzen Sequenz. Der Faktor Effekt hatte keinen signifikanten Einfluss ($F < 1$). Es gibt hinsichtlich der Interresponsezeiten keinen Unterschied zwischen Ton- und Klicksequenzen. Die Wechselwirkung Sitzung x Sequenzlänge ist nicht signifikant, $F(7, 119) = 1,23$, $p >> .05$. Auch keine der übrigen Wechselwirkungen ist signifikant (alle $F_s < 1$).

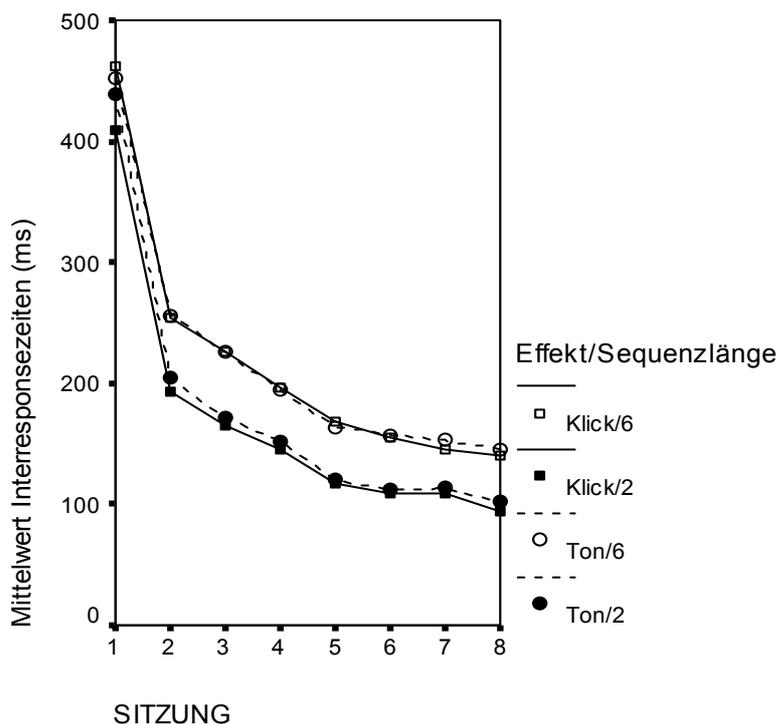


Abbildung 9: Mittlere Interresponsezeiten, aufgeteilt nach Effekt und Sequenzlänge über die Trainingssitzungen hinweg.

Zusätzliche Analysen, wie sie für die Initiierungszeiten berichtet wurden, wurden für die Interresponsezeiten ebenfalls durchgeführt, erbrachten aber keine zusätzlichen Ergebnisse.

Diskussion

Zunächst stimmten die Ergebnisse gut mit den in Abschnitt 1.7. berichteten Befunden mit Paradigmen zur Untersuchung motorischer Trainingsprozesse überein: Lange Initiierungszeiten im Verhältnis zu kürzeren Interresponsezeiten lassen auf eine zumindest teilweise Vorprogrammierung der Sequenzen nach dem Signalreiz schließen. Die Abnahme der Initiierungszeiten im Laufe des Trainings steht im Einklang mit Überlegungen zur vereinfachten Vorprogrammierung durch Chunking-Prozesse. Dafür sprechen auch die stark abnehmenden Interresponsezeiten. Lange Sequenzen werden langsamer initiiert als kurze Sequenzen, wie es auch Sternberg et al. (1978), Klapp (1995) und andere berichten. Dieser Sequenzlängeneffekt in den Initiierungszeiten reduziert sich durch Training, was wiederum auf zunehmendes Chunking besonders bei den langen Sequenzen schließen lässt. Auch in den Interresponsezeiten zeigt sich ein Sequenzlängeneffekt. Derartige Befunde wurden ebenfalls schon häufig berichtet (z. B. Sternberg et al., 1978; Rosenbaum et al., 1984) und legen nahe, dass noch während der Ausführung einer Sequenz nachfolgende Elemente vorbereitet werden. Im Gegensatz zum Sequenzlängeneffekt in den Initiierungszeiten wurde der Sequenzlängeneffekt in den Interresponsezeiten nicht durch das Training beeinflusst. Parallel zur Ausführung ablaufende Vorbereitungsprozesse scheinen daher durch Training zumindest weniger leicht beeinflussbar zu sein als vor Beginn der Ausführung stattfindende Prozesse.

Der differentielle Einfluss der Toneffekte steht weitgehend im Einklang mit den eingangs formulierten Hypothesen: Die Initiierungszeiten liegen bei den langen Tonsequenzen von Beginn an niedriger als bei den langen Klicksequenzen. Erst nach drei Trainingssitzungen oder 180 Übungsdurchgängen pro Sequenz gleichen sich die Initiierungszeiten der Klicksequenzen denen der Tonsequenzen vollständig an. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der Vorstellung überein, dass die Toneffekte die Verknüpfung von Einzelementen innerhalb einer Bewegungssequenz erleichtern. Nach einer gewissen Trainingsdauer kann der gleiche Erfolg auch ohne zusätzliche Effekte erreicht werden.

Bei den kurzen Sequenzen zeigt sich dieses Ergebnis nicht, im Gegenteil, kurze Tonsequenzen werden später im Training sogar etwas langsamer initiiert als kurze Klicksequenzen. Dieses Ergebnis lässt sich aufgrund der bisher dargestellten Daten nicht befriedigend erklären. Spekulativ könnte man zunächst annehmen, dass Folgen von zwei Tastendrücker nicht in gleicher Weise „Sequenzcharakter“ haben wie längere Tastenfolgen. Diese Annahme ist auch aus der Literatur bekannt und wurde bereits von Sternberg et al. (1978), sowie von Verwey (1999) zur Erklärung inhomogener Ergebnismuster herangezogen. Darüber hinaus lässt sich vermuten, dass die Verknüpfung eines Tastendruckes mit einem einzigen Nachfolger weniger anspruchsvoll ist

als der Aufbau einer Repräsentation einer Sequenz mit sechs Elementen, und dass die hilfreiche Wirkung der Toneffekte hier deshalb nicht ins Gewicht fällt.

Warum die Initiierungszeiten der kurzen Tonsequenzen später im Training aber höher sind als die der kurzen Klicksequenzen lässt sich mit diesen Überlegungen nicht erklären. Eine nahe liegende ad hoc Interpretation ist, dass die Toneffekte einerseits beim Aufbau einer verhaltenssteuernden Repräsentation helfen können, andererseits nach dem IM-Prinzip vor jeder Sequenzausführung mitaktiviert werden müssen. Sollte es sich bei dieser Aktivierung um einen zeitaufwändigen Prozess handeln, so könnte dies die langsamere Initiierung der Tonsequenzen erklären. Folgt man diesem Erklärungsansatz, müsste man zwei Prozesse annehmen, die sich gegenläufig auf die Initiierungszeiten auswirken: Ein beschleunigender Prozess, der die Verknüpfung von Einzelementen zu Sequenzrepräsentationen vereinfacht, und ein verzögernder Prozess, der auf der zeitaufwändigen Aktivierung antizipierter Effekte vor der Initiierung beruht. In diesem Fall wäre auch bei längeren Sequenzen nach entsprechend ausgiebigem Training eine verzögerte Initiierung von Ton- gegenüber Klicksequenzen zu erwarten.

Wiederum im Einklang mit den eingangs gemachten Vorhersagen steht das völlige Ausbleiben eines Sequenzlängeneffektes in den Initiierungszeiten bei den Tonsequenzen. Offenbar wird der Abruf der Bewegungsfolgen durch die Toneffekte so vereinfacht, dass längere Sequenzen genauso schnell initiiert werden können wie kürzere. Dieses Ergebnis ist auch nicht durch einen *tradeoff* zwischen Initiierung und Ausführung zu erklären, da die mittleren Ausführungsraten für Ton- und Klicksequenzen sich nicht unterscheiden.

Das völlige Ausbleiben einer Auswirkung der Toneffekte bei den Interresponsezeiten lässt zunächst vermuten, dass die Prozesse der Ausführung und parallelen Vorbereitung nachfolgender Elemente von Aktionseffekten unabhängig sind. Es gibt aber eine Reihe von paradigmatischen Eigenheiten in Experiment 3, die eine vorsichtige Interpretation dieses Ergebnisses erforderlich machen. Zunächst ist die Art des Trainings im vorliegenden Experiment nicht vollständig mit der von älteren Arbeiten wie denen von Sternberg et al. oder Klapp vergleichbar: Während in diesen Experimenten den Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Ausführung keinerlei Reizinformation zur Verfügung stand, wurden in Experiment 3 während der gesamten Trainingsdauer weiterhin visuelle Reize für jeden einzelnen erforderlichen Tastendruck dargeboten. Zwar lassen Interresponsezeiten von 150 bis 180 ms später im Training darauf schließen, dass die Versuchspersonen die Sequenzen tatsächlich vorprogrammierten und daraufhin reizunabhängig abarbeiteten, es lässt sich aber nicht ausschließen, dass die ständige Darbietung weiterer visueller Reize einer gewisse Rhythmisierung bei der Ausführung hervorgerufen hat (vgl. Grosjean, Rosenbaum & Elsinger, 2001). Dies könnte eine weitere Steigerung der

Ausführungsgeschwindigkeit verhindert haben. Ähnliches gilt für die Darbietung der auditorischen Toneffekte, seien sie spezifisch (Töne) oder unspezifisch (Klicks): Es ist möglich, dass die Versuchspersonen bei der Ausführung darauf warteten, dass der Effekt des aktuellen Tastendrucks die Wahrnehmungsschwelle überstieg, bevor sie den nächsten Tastendruck initiierten. Dies würde ebenfalls zu einer Homogenisierung der Interresponsezeiten über die Sequenzen hinweg geführt haben.

Ein weiteres methodisches Problem steht im Zusammenhang mit der Kontingenz von Aktionseffekten. In Experiment 1 spielte eine kontingente Verknüpfung von Aktionen und Effekten eine entscheidende Rolle für die Wirkung der Toneffekte. In Experiment 3 war keine vollständige Kontingenz zwischen Aktionen und Effekten gegeben: Da die Tasten-Effekt-Zuordnung innerhalb jeder einzelnen Versuchsperson variiert wurde, erzeugten verschiedene Tasten in manchen Durchgängen einen stets kontingenten Ton und in anderen Durchgängen einen Klick. Vollständige Kontingenz zwischen Aktionen und Effekten, wie sie mit einer Variation der Aktionseffekte zwischen verschiedenen Versuchspersonengruppen zu erreichen wäre, würde daher möglicherweise zu einer stärkeren Akzentuierung der in Experiment 3 gefundenen Effekte führen.

Experiment 4 war unter anderem darauf ausgerichtet, diesen Einwänden Rechnung zu tragen. Darüber hinaus sollte eine konkrete Annahme, die sich aus dem IM-Prinzip und den Ergebnissen der bisher berichteten Experimente ableiten lässt, explizit geprüft werden: Wenn es tatsächlich der Fall ist, dass Bewegungssequenzen ausschließlich durch ihre sensorischen Effekte repräsentiert sind, und nur über die Aktivierung dieser Effekte abgerufen werden können, dann müsste ein reizgesteuerter Erwerb einer Motorsequenz wie in Experiment 1, 2 und 3 einen Umweg darstellen. Eine direktere Möglichkeit zum Erlernen einer Bewegungsfolge als das Reagieren auf strukturiert dargebotene Reize sollte das aktive und intentionale Herstellen von strukturierten Effektsequenzen sein. In Experiment 4 trainierten die Versuchspersonen daher explizit, Abfolgen von Toneffekten zu erzeugen.

2.4. Experiment 4

Experiment 4 war in seinen Grundzügen ähnlich angelegt wie Experiment 3: Die Versuchspersonen trainierten Tastendrucksequenzen über einen bestimmten Zeitraum hinweg, kürzere wurden mit längeren Sequenzen kontrastiert, und als abhängige Variablen wurden Initiierungs- und Ausführungszeiten gemessen. Es gab aber einige wesentliche paradigmatische Unterschiede: Zunächst trainierte jede Versuchsperson nur zwei Tastendrucksequenzen, eine Folge der Länge 3 und eine der Länge 6. Die Zuordnung der Effekte zu den Tastendrücken wurden zwischen den Versuchspersonen variiert. Mit diesen Änderungen sollten sowohl die oben erwähnten Probleme mit dem Sequenzcharakter von Zweiersequenzen umgangen, als auch sichergestellt werden, dass jede Versuchsperson über das gesamte Experiment hinweg vollständig kontingente Aktionseffekte erlebte. Außerdem wurde das Experiment in eine Trainings- und eine Testphase unterteilt, wobei in der Testphase keine tastenspezifischen Reize mehr dargeboten wurden. Die beiden Sequenzen, die bearbeitet werden mussten, waren für alle Versuchspersonen dieselben. Diese Veränderung sollte die genaue Betrachtung von Chunking-Prozessen ermöglichen.

Die entscheidende Veränderung gegenüber Experiment 3 betraf aber das Reizmaterial. In den Kontrollgruppen wurden den Versuchspersonen als tastenspezifische Reize die Buchstaben A bis F auf dem Bildschirm dargeboten, denen sechs Reaktionstasten von links nach rechts zugeordnet waren. In der Experimentalgruppe erzeugte wiederum jeder Tastendruck einen Ton. Dieser Gruppe wurden außer den sequenzspezifischen Cues keinerlei visuelle Reize dargeboten. Sie erlernten die Sequenzen, indem sie Ton für Ton vorgegebene Folgen „nachspielten“, also gezielt Effektsequenzen erzeugten.

Methode

Versuchspersonen

An Experiment 4 nahmen insgesamt 42 Versuchspersonen teil. Aus Gründen, die weiter unten erläutert werden, musste eine Reihe von Versuchspersonen von der Auswertung ausgeschlossen und ersetzt werden. In der Experimentalgruppe wurden 5 Versuchspersonen ersetzt, in der Gruppe „Keine Effekte“ wurde eine Versuchsperson ersetzt und in der Gruppe „Klick“ wurden 6 Versuchspersonen ersetzt. Im Endeffekt umfasste jede der drei Gruppen 10 Versuchspersonen. In Gruppe „Toneffekt“ waren 8 weibliche und 2 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 26 Jahre ($s = 6,4$). In Gruppe „Keine Effekte“ waren 7 weibliche und 3 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 25 Jahre ($s = 3,4$). In Gruppe „Klick“ waren 6

weibliche und 4 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 25 Jahre ($s = 4,5$). Alle Versuchspersonen waren Psychologiestudenten im Grundstudium, die durch ihre Teilnahme eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten.

Reize und Reaktionen

Das Experiment wurde auf einem MS-DOS kompatiblen PC durchgeführt. Der Bildschirmhintergrund war schwarz und alle dargebotenen Reize grau oder rot. In den Kontrollgruppen wurden in der oberen Bildschirmhälfte die Buchstaben A, B, C, D, E und F in einem grauen 18 Punkt „Times New Roman“ Font als tastenspezifische Reize dargeboten. Oberhalb davon wurden in allen Gruppen die Buchstaben X und Y in rot in einem 60 Punkt Times New Roman Font als sequenzspezifische Reize dargeboten. In der Experimentalgruppe wurden keine visuellen tastenspezifischen Reize dargeboten. Stattdessen hörten die Versuchspersonen in der Trainingsphase über externe Lautsprecher dargebotene Töne, die sie mit entsprechenden Tastendrücken nachspielen sollten. Die sechs Reaktionstasten erzeugten wiederum aufsteigend von links nach rechts die ersten sechs Töne einer C-Dur Tonleiter (c, d, e, f, g, h). In Kontrollgruppe „Klick“ wurde statt der tastenspezifischen Töne wieder bei jedem Tastendruck der gleiche Ton dargeboten, der die gleiche Klangfarbe hatte wie die Töne in der Experimentalgruppe aber 2 Oktaven höher war. Dieser Kontrollton wird im Folgenden der Einfachheit halber wieder als „Klick“ bezeichnet. Die Reaktionstasten waren die Tasten s, d, f, j, k und l einer deutschen QWERTZ-Tastatur. Die Zeige-, Mittel- und Ringfinger beider Hände der Versuchspersonen ruhten auf diesen Tasten. Jeder Tastendruck löste in der Experimentalgruppe unmittelbar die Darbietung des entsprechenden Tones aus, in Gruppe „Klick“ wurde unmittelbar der Klick präsentiert.

In der Trainingsphase verstrich zwischen einem abgegebenen Tastendruck und der Darbietung des nächsten tastenspezifischen Reizes (Buchstabe oder Ton) ein Reaktions-Stimulus-Intervall (RSI) von 800 ms. Der sequenzspezifische Hinweisreiz wurde, während eine Sequenz bearbeitet wurde, ununterbrochen am oberen Bildschirmrand gezeigt. Jede Versuchsperson erlernte in der Trainingsphase 2 unterschiedliche Tastendrucksequenzen. Die kurze Sequenz war für alle Versuchspersonen j-s-k, dies entspricht Tastendrücken mit Z-r-M, wobei Großbuchstaben für die Finger der linken Hand und Z, R und M für Zeige-, Mittel- und Ringfinger stehen. Die lange Sequenz war für alle Versuchspersonen s-j-f-k-d-l beziehungsweise r-Z-z-M-m-r.

In der Testphase wurden in allen Gruppen keine tastenspezifischen Reize sondern nur noch der sequenzspezifische Hinweisreiz dargeboten. In der Experimentalgruppe und Gruppe „Klick“ wurden außerdem weiterhin spezifische (Töne) oder unspezifische (Klick) Aktionseffekte dargeboten.

Ablauf

Vor allen Phasen des Experimentes wurden die Versuchspersonen durch einen am Bildschirm dargebotenen Text instruiert. Für die Versuchspersonen in der Experimentalgruppe begann das Experiment mit einer kurzen Einführung, in der keine Daten erhoben wurden, sondern sie die Gelegenheit hatten, sich durch freies Drücken der sechs Reaktionstasten mit den Tasten-Ton-Beziehungen vertraut zu machen. Sie konnten diese Phase nach eigenem Ermessen selbst beenden. Üblicherweise geschah dies innerhalb von 1 bis 2 Minuten.

In der zweiten Phase des Experimentes sollte die Reiz-Reaktions-Zuordnung eingeübt werden. Zu diesem Zweck bearbeiteten alle Versuchspersonen eine serielle Wahlreaktionsaufgabe mit zufälliger Reizabfolge. Die Versuchspersonen in der Kontrollgruppe sahen in jedem Durchgang einen einzelnen grauen Buchstaben auf dem Bildschirm, auf den sie so schnell wie möglich mit der durch die Instruktion zugeordneten Taste reagieren sollten. Die Versuchspersonen in der Experimentalgruppe hörten Töne, die sie mit dem entsprechenden Tastendruck so schnell wie möglich erneut erzeugen sollten. In der Kontrollgruppe wurde der nächste Reiz jeweils unmittelbar nach dem Tastendruck präsentiert, in der Experimentalgruppe wurde ein RSI von 1000 ms eingeführt, da Vorversuche ergeben hatten, dass eine unmittelbare Präsentation des nächsten Reiz-Tones nach der Darbietung des vorher erzeugten Effekt-Tones die Unterscheidung der Töne sehr schwierig machte. Die Einführungsphase zum Mapping-Erwerb umfasste 2 Blöcke mit je 60 Durchgängen.

In der Trainingsphase wurden die Reize nun in den zwei oben wiedergegebenen Abfolgen dargeboten. Die Versuchspersonen wurden darüber informiert, dass sie zwei Tastendrucksequenzen lernen sollten, und dass die eine von beiden die Bezeichnung X und die andere Sequenz die Bezeichnung Y trage. Sie wurden darauf hingewiesen, dass es in dieser Phase in erster Linie um den korrekten Erwerb der Sequenzen und weniger um möglichst schnelle Reaktionen gehen sollte, und dass es später notwendig sein würde, die Sequenzen ohne tastenspezifische Reize, also „auswendig“ zu beherrschen. Ein einzelner Durchgang sah folgendermaßen aus: Nach der Darbietung eines Fixationskreuzes an der Cue-Position für 1500 ms wurde der sequenzspezifische Hinweisreiz (X oder Y) dargeboten, der dann bis zum Ende der Sequenz auf dem Bildschirm blieb. Gleichzeitig erklang in der Experimentalgruppe der erste Ton bzw. wurde in den Kontrollgruppen der erste tastenspezifische Buchstabe gezeigt. Drückte die Versuchsperson daraufhin die richtige Taste, wurde in der Experimentalgruppe der entsprechende Effekt-Ton dargeboten, in den Kontrollgruppen verschwand der tastenspezifische Buchstabe. Nach einem RSI von 800 ms wurde der nächste Ton bzw. der nächste Buchstabe dargeboten. Wenn die Sequenz beendet war, wurde wiederum für 1500 ms ein Fixationskreuz eingeblendet, während alle anderen Reize vom Bildschirm verschwanden. Wenn eine falsche

Taste gedrückt wurde, wurde am unteren Bildschirmrand für 50 ms das Wort „Fehler!“ eingeblendet. In der Experimentalgruppe wurde auch bei einem falschen Tastendruck der zur gedrückten Taste gehörige Ton dargeboten. Die Trainingphase umfasste 2 Blöcke mit je 60 Sequenzdarbietungen. Pro Block wurde jede Sequenz 30-mal geübt, wobei die Reihenfolge der Darbietung zufällig war. Die Versuchspersonen hatten also 60 Durchgänge Zeit, um sich jede der zwei Sequenzen einzuprägen. Am Ende jedes Blocks wurde für 5 s die Fehlerrate der Versuchsperson eingeblendet.

Zu Beginn der anschließenden Testphase wurden die Versuchspersonen darauf hingewiesen, dass Schnelligkeit bei der Eingabe der Sequenzen nun ebenso wichtig sei wie Genauigkeit. In jedem Durchgang wurde nun nur noch der sequenzspezifische Reiz (X oder Y) dargeboten, woraufhin die Versuchsperson so schnell wie möglich und in einem Zug die komplette Tastenfolge eingeben sollte. Tastenspezifische Reize wurden nicht mehr dargeboten. In der Experimentalgruppe erzeugte weiterhin jeder Tastendruck den entsprechenden Ton, in Gruppe „Klick“ erzeugte nach wie vor jeder Tastendruck einen Klick. Wenn eine falsche Taste gedrückt wurde, wurde am unteren Bildschirmrand für 50 ms das Wort „Fehler!“ in roter Farbe in einem 14 Punkt „Arial“-Font dargeboten. Zwischen den Durchgängen wurde wieder für jeweils 1500 ms ein Fixationskreuz an der Cue-Position dargeboten. Die Testphase umfasste 6 Blöcke, die jeweils aus 60 Durchgängen, also 30 Durchgängen je Sequenz bestanden. Die Abfolge war wiederum zufällig. Am Ende jedes Blocks wurde für 5 s die Fehlerrate und die mittlere Reaktionszeit für den vergangenen Block dargeboten. Danach konnte die Versuchsperson durch einen Tastendruck selbständig den nächsten Block starten.

Die Initiierungszeiten wurden jeweils ab der Präsentation des Cue bis zur Registrierung des ersten Tastendrucks gemessen. Die Interresponsezeiten wurden jeweils von der Registrierung eines Tastendruckes bis hin zum nächsten Tastendruck erfasst. Die Initiierungs- und Interresponsezeiten von Sequenzen, in denen ein oder mehrere Fehler gemacht worden waren, wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Trainingsphase

Da in der Trainingsphase keine Geschwindigkeitsinstruktion vorgegeben war, ist eine sinnvolle Auswertung der Reaktionszeiten nicht möglich. Als Maß für den Erwerb der beiden Sequenzen in den drei Gruppen sollen daher die Fehler herangezogen werden. Abbildung 10 zeigt die mittleren Fehlerraten über alle Tastendrucke hinweg, aufgeteilt nach dem Trainingsblock und den Bedingungen. Die Daten wurden einer Varianzanalyse mit Messwiederholung unterzogen, mit

den Faktoren Übungsblock und Gruppe. Sowohl der Faktor Block ($F(1, 27) = 17,24, p < .001$) als auch der Faktor Gruppe ($F(2, 27) = 9,70, p < .001$) hatten einen signifikanten Einfluss. Global betrachtet nehmen die Fehlerzahlen über die Übung hinweg ab. In Gruppe „Toneffekte“ werden mehr Fehler gemacht als in den Gruppen „Keine Effekte“ und „Klick“. Die Wechselwirkung der Faktoren ist ebenfalls signifikant: $F(1, 27) = 12,09, p < .001$. Die Fehlerrate nimmt in Gruppe „Toneffekte“ stärker ab als in den beiden anderen Gruppen.

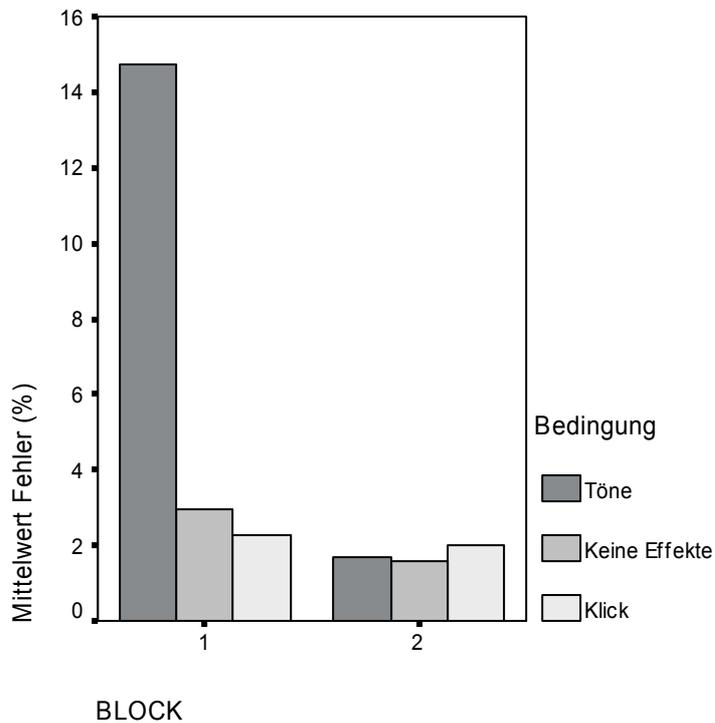


Abbildung 10: Fehlerraten in der Trainingsphase, aufgeteilt nach Block und Gruppe.

Eine zusätzliche Analyse, die nur mit den Gruppen „Kein Effekt“ und „Klick“ durchgeführt wurde, zeigte, dass diese Ergebnisse ausschließlich auf den Verlauf der Fehlerraten in Gruppe „Toneffekte“ zurückzuführen sind. Hier war weder der Einfluss des Faktors Block ($F(1, 18) = 3,14, p < .093$) noch der Einfluss des Faktors Gruppe ($F < 1$) signifikant. Auch die Wechselwirkung verfehlte die Signifikanz ($F(, 18) = 1,49, p >> .1$). In den beiden Gruppen ohne Toneffekte findet über die Übungsdauer hinweg keine Veränderung der Fehlerrate statt.

Testphase

Fehlerdaten

Wie in Experiment 3 wurde auch in Experiment 4 jede Sequenz, in der ein einzelner Fehler auftrat, von der reaktionszeitbezogenen Auswertung ausgeschlossen. Um zu verhindern, dass durch dieses Vorgehen zu geringe Trialzahlen in die varianzanalytischen Verfahren eingingen, wurden die Versuchspersonen aufgrund eines rigorosen Fehlerkriteriums in die Analyse

einbezogen oder davon ausgeschlossen: Die Datensätze von Versuchspersonen, die mehr als 10 Prozent aller Sequenzen fehlerhaft eingaben, gingen nicht in die Auswertung ein. Für viele Versuchspersonen war es offenbar sehr schwierig, diesem Fehlerkriterium gerecht zu werden, weshalb eine vergleichsweise hohe Anzahl von Teilnehmern ersetzt werden musste (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“). Ein derartiges Auswahlkriterium verbietet natürlich jegliche weitere Auswertung der Fehlerdaten. Es lässt sich aber sagen, dass es in den Daten keine Anzeichen für *Speed-Accuracy-Tradeoffs* gab.

Initiierungszeiten

Die Initiierungszeiten der Testphase wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Toneffekte, Keine Effekte, Klick) unterzogen (Abb. 11).

Der Faktor Übung hatte einen signifikanten Einfluss, $F(5, 135) = 17,51$, $p < .001$. Die Initiierungszeiten nehmen über die Zeit hinweg ab. Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 27) = 12,14$, $p < .002$. Der Haupteffekt des Faktors Gruppe verfehlte die Signifikanz, $F(2, 27) = 2,72$, $p < .084$. Die Wechselwirkung von Sequenzlänge und Gruppe ist marginal signifikant, $F(2, 27) = 2,97$, $p < .068$, was darauf hindeutet, dass der Sequenzlängeneffekt in den drei Gruppen unterschiedlich ausgeprägt ist. Es gibt keine signifikante Wechselwirkung zwischen Übung und Sequenzlänge ($F < 1$).

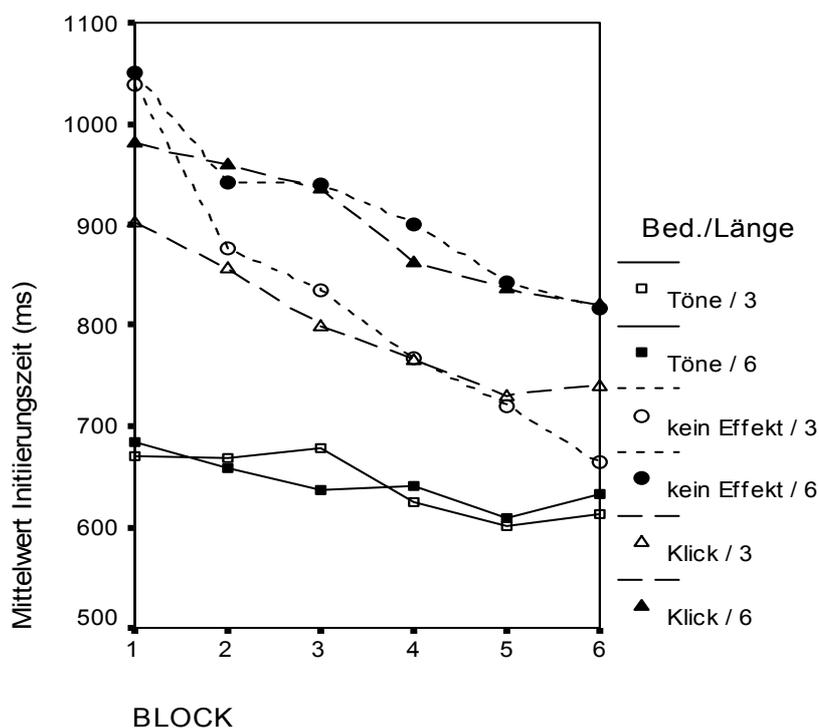


Abbildung 11: Initiierungszeiten, aufgeteilt nach Gruppe und Sequenzlänge, über die Blöcke der Testphase.

Der Sequenzlängeneffekt verändert sich über die Zeit hinweg nicht. Auch die Dreifachwechselwirkung von Übung, Sequenzlänge und Gruppe ist nicht signifikant ($F < 1$).

Zur näheren Prüfung der marginal signifikanten Wechselwirkung von Sequenzlänge und Gruppe wurden weitere Analysen für alle drei Gruppen getrennt durchgeführt. Sie bestätigten, was deskriptiv deutlich ist (siehe Abb. 11): Es besteht ein signifikanter Sequenzlängeneffekt in den Gruppen „Keine Effekte“ ($F(1, 9) = 7,87, p < .02$) und „Klick“ ($F(1, 9) = 16,01, p < .003$), aber in Gruppe „Toneffekte“ unterscheiden sich die Initiierungszeiten für kurze und lange Sequenzen nicht signifikant, $F < 1$.

Ausführungszeiten

Für jede Versuchsperson wurden wiederum mittlere Interresponsezeiten für jede Faktorkombination berechnet. Diese Daten wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Toneffekte, Keine Effekte, Klick) unterzogen (Abb. 12). Es ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Übung, $F(5, 135) = 66,50, p < .001$. Die Interresponsezeiten nehmen über die Zeit hinweg ab.

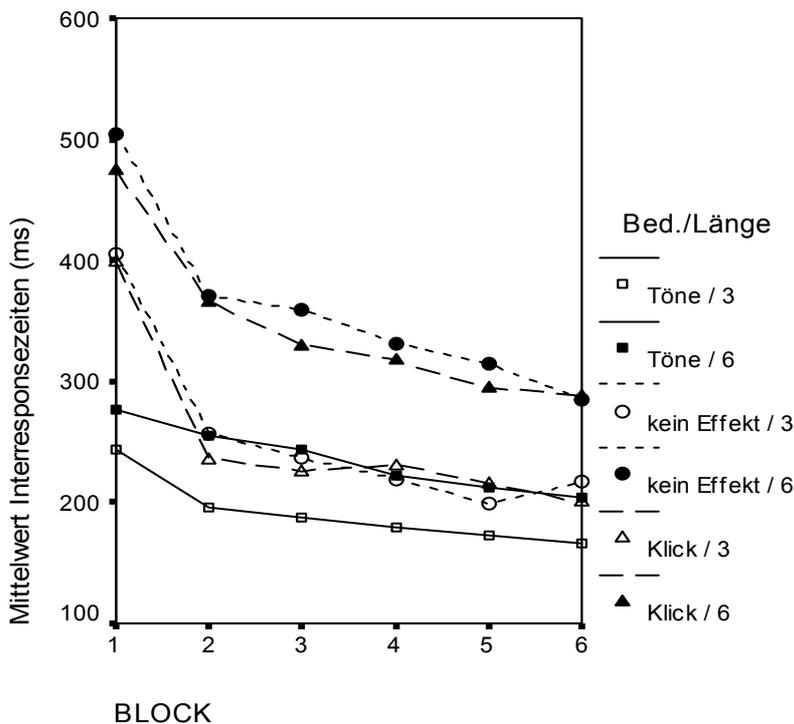


Abbildung 12: Mittlere Interresponsezeiten, aufgeteilt nach Sequenzlänge und Gruppe, über die Blöcke der Testphase.

Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 27) = 41,63, p < .001$. Tastendrucke innerhalb von kurzen Sequenzen werden im Schnitt schneller ausgeführt als

Tastendrucke innerhalb von langen Sequenzen. Der Haupteffekt des Faktors Gruppe ist nicht signifikant, $F(2, 27) = 1,36$, $p \gg .1$. Der numerisch vorhandene Unterschied zwischen den Gruppen „Keine Effekte“ und „Klick“ und der Experimentalgruppe ist statistisch nicht bedeutsam. Zwischen Übung und Gruppe besteht eine signifikante Wechselwirkung, $F(10, 135) = 2,14$, $p < .025$. Die Interresponsezeiten nehmen in den Gruppen „Keine Effekte“ und „Klick“ etwas stärker ab als in der Experimentalgruppe, wobei dies in erster Linie auf den ersten Block der Testphase zurückzuführen ist (Abb. 10). Die Wechselwirkung von Sequenzlänge und Gruppe ist ebenfalls signifikant, $F(2, 27) = 3,50$, $p < .045$. Der Unterschied in den mittleren Interresponsezeiten zwischen langen und kurzen Sequenzen ist in den Gruppen „Keine Effekte“ und „Klick“ stärker ausgeprägt als in der Experimentalgruppe. Eine zusätzliche ANOVA ohne Gruppe „Toneffekte“ bestätigte diese Interpretation: Hier ist die Wechselwirkung Sequenzlänge x Gruppe nicht signifikant ($F < 1$). Die Wechselwirkung Übung x Sequenzlänge ist nicht signifikant, $F(5, 135) = 1,94$, $p < .091$. Der Sequenzlängeneffekt verändert sich über die Zeit hinweg nicht bedeutsam. Die Dreifachwechselwirkung Übung x Sequenzlänge x Gruppe ist ebenfalls nicht signifikant, $F(10, 135) = 1,36$, $p \gg .01$.

Diskussion

Auch in Experiment 4 zeigt sich ein nützlicher Einfluss der Toneffekte für den Erwerb der motorischen Sequenzen. Und dies obwohl die Aufgabe für die Versuchspersonen der Experimentalgruppe zunächst deutlich schwieriger zu sein scheint: In der Trainingsphase machen die Versuchspersonen in Gruppe „Toneffekte“ signifikant mehr Fehler als in den beiden Kontrollgruppen. Viele Versuchspersonen in der Experimentalgruppe berichteten im Anschluss an die Einführungs- oder die Trainingsphase spontan über Schwierigkeiten, mit den Tastendrücken gezielt bestimmte Töne zu erzeugen. Im Laufe der Übung nehmen die Fehlerzahlen in dieser Gruppe dann aber dramatisch ab. Die erhöhte Fehlerzahl in der Trainingsphase bedeutet auch, dass die Versuchspersonen in Gruppe „Toneffekte“ zu Beginn der Testphase deutlich weniger korrekt ausgeführte Durchgänge hinter sich hatten, was für Initiierungs- und Ausführungsgeschwindigkeit ein Nachteil sein sollte. Dies ist nicht der Fall: Vom Beginn der Testphase an initiieren die Versuchspersonen in der Experimentalgruppe die Sequenzen numerisch – aber nur marginal signifikant – schneller. In den Ausführungszeiten gibt es einen numerischen aber keinen statistisch bedeutsamen Vorteil für die Experimentalgruppe. Ein weiteres wesentliches Ergebnis von Experiment 3 konnte in Experiment 4 repliziert werden: In der Gruppe, die die motorischen Sequenzen über die Herstellung von Toneffekten erlernte, zeigt sich wiederum kein Sequenzlängeneffekt in den Initiierungszeiten, lange Sequenzen werden

ebenso schnell initiiert wie kurze Sequenzen. Dieses Resultat kann weder durch einen *Tradeoff* zwischen Initiierung und Ausführung bei den langen Sequenzen noch durch einen *Speed-Accuracy-Tradeoff* erklärt werden.

Im Vergleich zum vorangegangenen Experiment zeigen sich nun Unterschiede hinsichtlich des Sequenzlängeneffektes: Die übungsabhängige Abnahme des Sequenzlängeneffektes in den Kontrollbedingungen, die in Experiment 3 beobachtet wurde, tritt in Experiment 4 nicht auf. Dies ist angesichts der drastisch reduzierten Trainingsdauer aber nicht weiter verwunderlich: Aus den einschlägigen Arbeiten (z. B. Klapp, 1995; Verwey, 1999) ist bereits bekannt, dass ein sehr ausgiebiges Training erforderlich ist, um eine Reduktion des Sequenzlängeneffektes zu erzielen. Umso eindrucksvoller ist das Ausbleiben des Sequenzlängeneffektes in der Experimentalgruppe: Obwohl die Versuchspersonen in Gruppe „Toneffekte“ zu Beginn der Testphase im Schnitt eine geringere Zahl von korrekt ausgeführten Übungsdurchgängen hinter sich gebracht hatten, initiierten sie vom Beginn der Testphase an lange Sequenzen ebenso schnell wie kurze Sequenzen, und zwar auf einem zumindest numerisch schnelleren Niveau als die Versuchspersonen in den beiden Kontrollgruppen. Die Erzeugung von Toneffekten als Verhaltensziel scheint also im Vergleich zum Reagieren auf Buchstabenreize den notwendigen Trainingsaufwand zum Erwerb motorischer Sequenzen drastisch zu reduzieren.

Im Gegensatz zu Experiment 3 verringern die Toneffekte nun auch den Sequenzlängeneffekt in den Interresponsezeiten. Der Einfluss der Töne scheint sich also sowohl auf Prozesse, die vor der Initiierung ablaufen, als auch auf Vorbereitungsprozesse während der Sequenzausführung auszuwirken. Der Einfluss auf diese Prozesse wurde in Experiment 3 möglicherweise von den während des gesamten Experimentes dargebotenen tastenspezifischen Reizen unterbunden, so dass sich dort keine Effekte der Töne in den Interresponsezeiten zeigten.

Die Ergebnisse sind gut vereinbar mit der Annahme, dass Toneffekte das Zusammenfassen von einzelnen Tastendrücken zu Chunks begünstigen. Effektiv zusammengefasste Tastendrücke sollten sich nach den Überlegungen von Klapp (1995), Verwey (1999) und anderen schneller initiieren lassen. Außerdem scheint es plausibel, dass innerhalb eines in der Ausführung befindlichen Chunks nachfolgende Tastendrücke mit geringerem Aufwand vorbereitet werden können, was sich auf den Sequenzlängeneffekt in den Interresponsezeiten auswirken sollte. Beide Ergebnisse zeigen sich in Gruppe „Toneffekte“.

Um die Chunking-Interpretation inferenzstatistisch zu prüfen wurde mit den Interresponsezeiten der langen Sequenzen eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (Block 1-6), Sequenzposition (2-6) und Gruppe (Toneffekte, Keine Effekte, Klick) durchgeführt. Für die Chunking-Interpretation kritisch ist die Wechselwirkung Sequenzposition x Gruppe. Sie ist signifikant, $F(8, 108) = 2,63$, $p < .011$, das heißt, die Unterschiede zwischen den

Sequenzpositionen fallen in den einzelnen Bedingungen unterschiedlich aus. Deskriptiv sind diese Unterschiede in Abb. 13 a) bis c) nachvollziehbar: In Gruppe „Toneffekte“ zeigt sich in den ersten Blöcken der Testphase noch ein leichter Anstieg der Interresponsezeiten an Position T4, ein Indikator für die Initiierung eines zweiten Teilchunks bei den langen Sequenzen. Dieser Anstieg verschwindet im Laufe des Experimentes mehr und mehr, bis in den letzten Blöcken schließlich alle Interresponsezeiten auf dem gleichen Niveau angelangt sind, was als Hinweis darauf interpretiert werden kann, dass die ganze Sequenz zu einem einzigen Chunk zusammengefasst worden ist. Anders ist das Bild in den Kontrollgruppen: In Gruppe „Kein Effekt“ zeigt sich zwar ebenfalls ein Anstieg der Interresponsezeiten an Position T4, aber dieser Anstieg bleibt trotz insgesamt zunehmender Ausführungsgeschwindigkeit über das ganze Experiment hinweg erhalten.

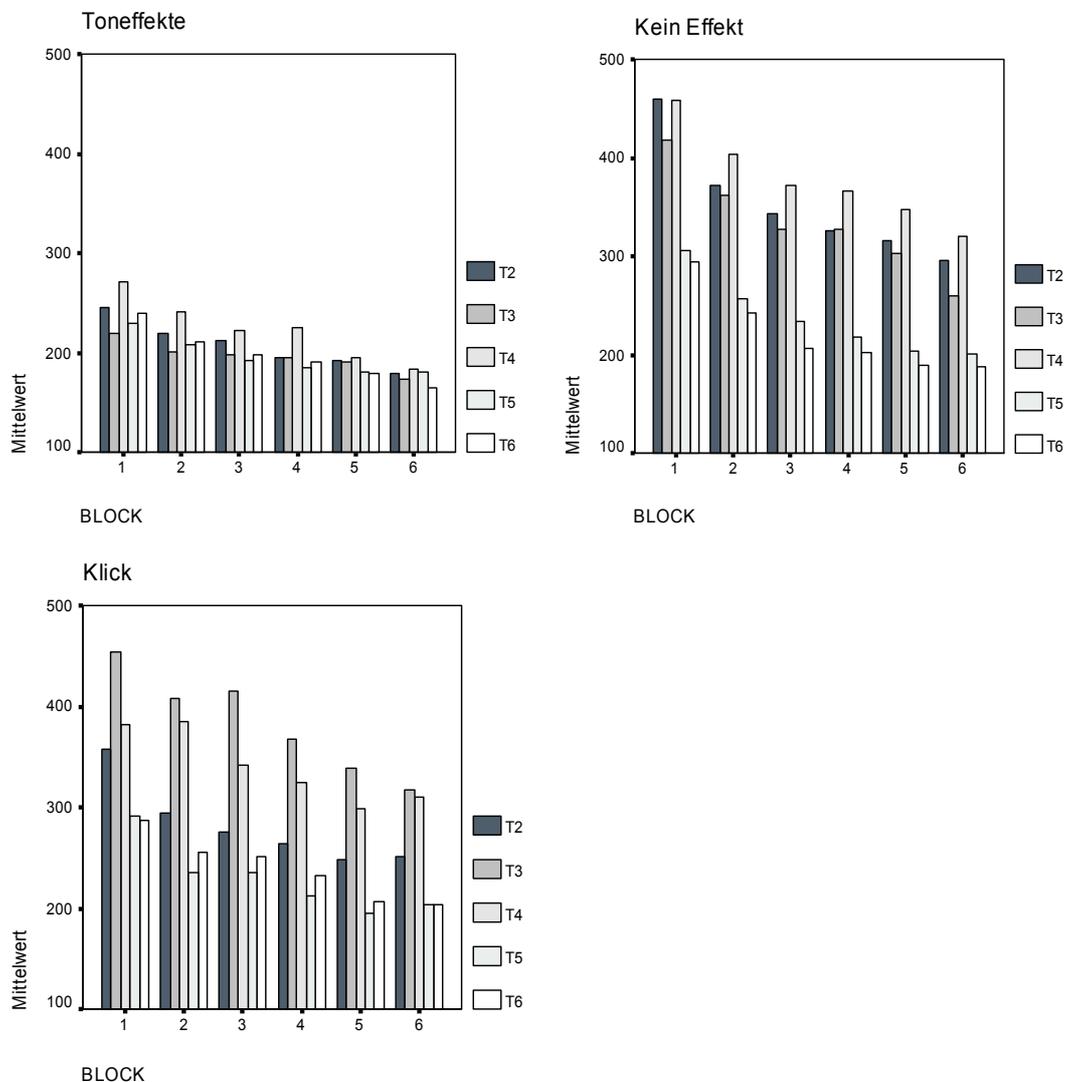


Abb. 13 a), b) und c): Interresponsezeiten der langen Sequenzen, aufgeteilt nach Gruppe und Block.

Dies deutet auf das Vorhandensein von zwei Chunks, von denen einer T1, T2 und T3 und der andere T4, T5 und T6 umfasst, hin. Ein wiederum anderes Muster ergibt sich für Gruppe

„Klick“: Hier bleibt über das gesamte Experiment hinweg ein Anstieg der Interresponsezeiten bei Position T3 bestehen. Hier scheinen nur Tastendruck 1 und 2 sowie die Tastendrucke 4, 5 und 6 effektiv miteinander verknüpft worden zu sein.

Das Ergebnismuster ist insgesamt gut mit der Hypothese vereinbar, dass Toneffekte die Verknüpfung von einzelnen Elementen einer Bewegungssequenz zu Chunks begünstigen. In Analogie zu Klapp (1995) kann man annehmen, dass diese Chunkbildung den Aufwand zur Initiierung einer Sequenz reduziert. Gleichzeitig scheinen die so entstandenen Repräsentationen die während der Ausführung ablaufenden Prozesse zur Vorbereitung nachfolgender Elemente zu vereinfachen, was das tendenziell reduzierte IRT-Niveau und die Reduktion des IRT-Sequenzlängeneffektes in der Experimentalgruppe erklären könnte.

Im Folgenden interessiert die zeitliche Dynamik der beobachteten Einflüsse. Wenn die Töne eine qualitative Veränderung der Vorbereitungsprozesse mit sich bringen, dann sollten sie sich auch noch bei längerer Vorbereitungszeit auswirken. Wenn sie tatsächlich nur beschleunigen, sollte der Effekt bei zunehmendem Vorbereitungsintervall (*stimulus onset asynchrony*, SOA) verschwinden, das heißt die Beschleunigung in der Experimentalgruppe sollte durch zusätzliche Vorbereitungszeit in der Kontrollgruppe ausgeglichen werden können. In diesem Fall wäre ein Verschwinden des Einflusses der Töne bei langem SOA zu erwarten. Wenn eine Variation des SOA sich nur auf den Effekt in den Initiierungs-, aber nicht auf den in den Ausführungszeiten auswirkt, spricht das dafür, dass die Initiierungs- und Ausführungsprozesse voneinander unabhängig sind und auf unabhängige Repräsentationen zurückgreifen, in die trotzdem jeweils die Toneffekte integriert werden können. Experiment 5 war gestaltet um den Einfluss des Vorinformationsintervalls zu untersuchen.

2.5. Experiment 5

Experiment 5 war vom Aufbau her praktisch mit Experiment 4 identisch, mit dem Unterschied, dass die Versuchspersonen in der Testphase in verschiedenen Durchgängen unterschiedlich lang vor dem eigentlichen Startsignal durch einen Hinweisreiz über die auszuführende Sequenz informiert wurden. Verglichen wurden wiederum eine Gruppe, die Toneffekte erzeugte und eine Gruppe, in der die Tastendrucke keine zusätzlichen Effekte hatten. Das Intervall zwischen Hinweisreiz und Startsignal (*stimulus onset asynchrony*, SOA) wurde zwischen 0 und 900 ms variiert.

Methode

Versuchspersonen

An Experiment 5 nahmen insgesamt 33 Versuchspersonen teil. Wie in Experiment 4 musste eine Reihe von Versuchspersonen von der Auswertung ausgeschlossen und ersetzt werden. In der Experimentalgruppe wurden 2 Versuchspersonen ersetzt, die das Fehlerkriterium nicht erreichten, in der Gruppe „Keine Effekte“ wurde eine Versuchsperson ersetzt, weil sich herausstellte, dass sie bereits unter der Experimentalbedingung am Experiment teilgenommen hatte. Die Experimentalgruppe umfasste 16, die Kontrollgruppe ohne Toneffekte 14 Versuchspersonen. In Gruppe „Toneffekt“ waren 14 weibliche und 2 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 22 Jahre ($s = 2,1$). In Gruppe „Keine Effekte“ waren 10 weibliche und 4 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 24 Jahre ($s = 3,5$). Alle Versuchspersonen waren Psychologiestudenten im Grundstudium, die durch ihre Teilnahme eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten.

Reize und Reaktionen

Anzeige und Reaktionstasten waren identisch mit Experiment 4, mit einer Ausnahme: In der Testphase wurde der sequenzspezifische Hinweisreiz in den Durchgängen mit einem SOA von mehr als 0 ms zunächst für die Dauer des SOAs grau dargeboten. Die Versuchspersonen waren instruiert, erst dann mit der Ausführung der Sequenz zu beginnen, wenn sich der Hinweisreiz rot färbte. Das SOA wurde in den Stufen 0, 100, 300, 500, 700 und 900 ms variiert, dementsprechend lang blieb der Hinweisreiz in den jeweiligen Durchgängen grau.

Ablauf

Einführungs- und Trainingsphase verliefen in Experiment 5 genauso wie in Experiment 4. Die Versuchspersonen in der Tongruppe bekamen anfangs wieder die Gelegenheit, sich kurz mit den

Aktions-Effekt-Beziehungen vertraut zu machen, anschließend bearbeiteten alle Versuchspersonen eine zufallsgesteuerte serielle Wahlreaktionsaufgabe, danach übten sie die beiden Sequenzen ein, indem sie auf Buchstaben reagierten oder Töne nachspielten. In der Testphase wurde in zufälliger Abfolge das SOA variiert. Um auch mit der zusätzlichen Faktorvariation noch genügend Datenpunkte zu erhalten, wurde die Trialzahl pro Block in der Testphase im Vergleich zu Experiment 4 verdoppelt: Die Versuchspersonen bearbeiteten 6 Blöcke mit je 120 Durchgängen, also 60 Durchgängen je Sequenz.

Die Initiierungszeiten wurden jeweils ab dem Zeitpunkt, zu dem sich der Cue rot färbte bis zur Registrierung des ersten Tastendrucks gemessen. Die Interresponsezeiten wurden jeweils von der Registrierung eines Tastendrucks bis hin zum nächsten Tastendruck erfasst. Die Initiierungs- und Interresponsezeiten von Sequenzen, in denen ein oder mehrere Fehler gemacht worden waren, wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Trainingsphase

Da in der Trainingsphase keine Geschwindigkeitsinstruktion vorgegeben war, wird hier wiederum auf die Auswertung der Reaktionszeiten verzichtet. Als Maß für den Erwerb der beiden Sequenzen in den zwei Gruppen sollen wieder die Fehler herangezogen werden. Abbildung 14 zeigt die mittleren Fehlerraten über alle Tastendrucke hinweg, aufgeteilt nach dem Trainingsblock und den Bedingungen.

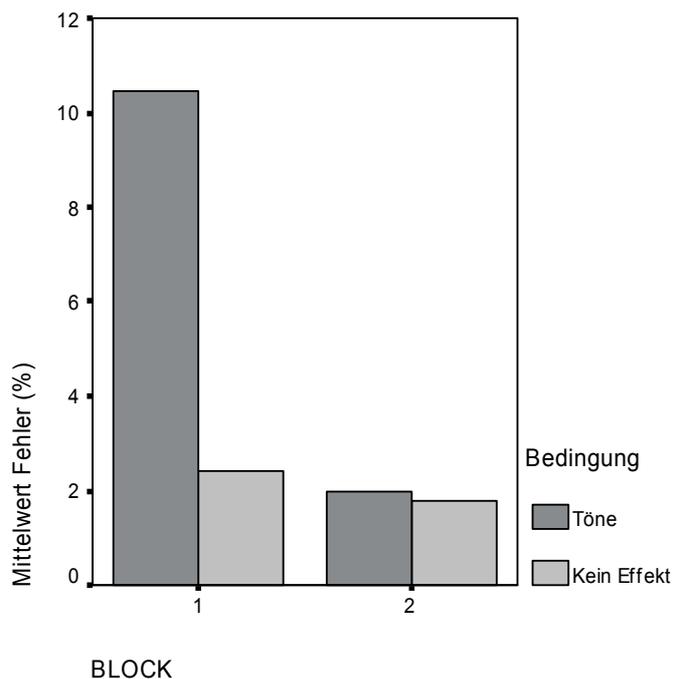


Abbildung 14: Fehlerraten in den zwei Gruppen, aufgeteilt nach den Blöcken der Trainingsphase.

Die Daten wurden einer Varianzanalyse mit Messwiederholung unterzogen, mit den Faktoren Übungsblock und Gruppe. Sowohl der Faktor Block ($F(1, 29) = 18,30, p < .001$) als auch der Faktor Gruppe ($F(1, 29) = 9,42, p < .005$) hatten einen signifikanten Einfluss. Global betrachtet nehmen die Fehlerzahlen über die Übungsdauer hinweg ab. In Gruppe „Toneffekte“ werden mehr Fehler gemacht als in den Gruppen „Keine Effekte“. Die Wechselwirkung der Faktoren ist ebenfalls signifikant: $F(1, 29) = 13,60, p < .001$. Die Fehlerrate nimmt in Gruppe „Toneffekte“ stärker ab.

Testphase

Fehlerdaten

Wie in Experiment 3 und 4 wurde auch in Experiment 5 jede Sequenz, in der ein einzelner Fehler auftrat, von der reaktionszeitbezogenen Auswertung ausgeschlossen. Da sich das Fehlerkriterium von 10 Prozent in Experiment 4 für viele Versuchspersonen als knapp zu schwierig erwiesen hatte, wurde das Kriterium in Experiment 5 auf 15 Prozent gelockert, nachdem sichergestellt werden konnte, dass trotzdem noch ausreichend viele Datenpunkte für varianzanalytische Verfahren zu Verfügung stehen würden. Wegen der Selektion aufgrund von Fehlerzahlen wurden die Fehlerdaten wiederum nicht detailliert ausgewertet. Es gab aber wieder keine Anzeichen für *Speed-Accuracy-Tradeoffs*.

Initiierungszeiten

Die Initiierungszeiten der Testphase wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), SOA (6 Stufen), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Toneffekte, Keine Effekte) unterzogen (Abb. 15). Der Faktor Übung hatte einen signifikanten Einfluss, $F(5, 140) = 30,25, p < .001$. Die Initiierungszeiten nehmen mit zunehmender Übung ab. Auch das SOA hat einen signifikanten Einfluss, $F(5, 149) = 333,16, p < .001$. Die Sequenzen werden umso schneller initiiert, je mehr Vorbereitungszeit zur Verfügung steht. Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 28) = 18,70, p < .001$. Kurze Sequenzen werden schneller initiiert als lange. Die beiden Bedingungen unterscheiden sich signifikant, $F(1, 28) = 7,55, p < .01$. Die Experimentalgruppe initiiert die Sequenzen schneller als die Kontrollgruppe. Übung interagiert signifikant mit Gruppe, $F(5, 149) = 7,91, p < .001$. Die Initiierungszeiten nehmen vor allem in den frühen Trainingsblöcken in der Kontrollgruppe stärker ab als in der Experimentalgruppe.

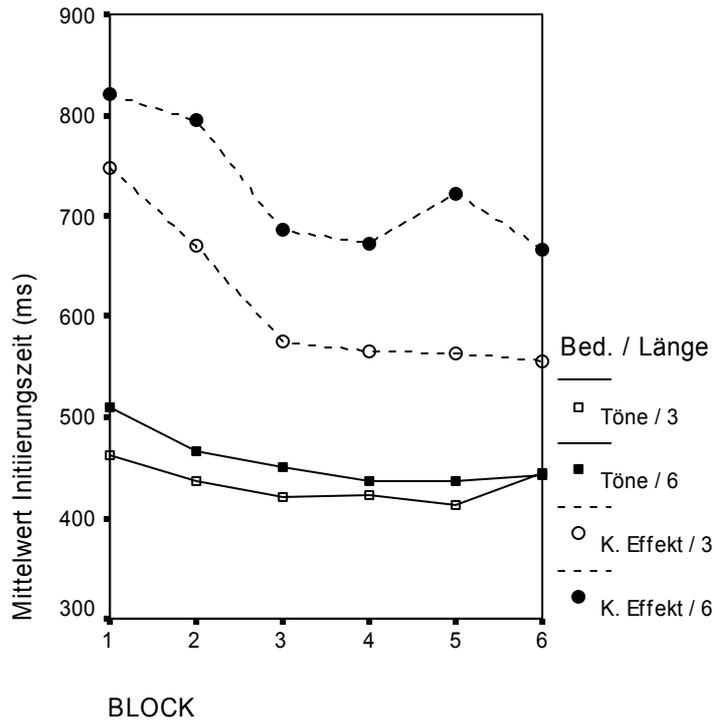


Abbildung 15: Initiiierungszeiten, aufgeteilt nach Gruppe und Block.

Die Wechselwirkung SOA x Gruppe ist signifikant, $F(5, 140) = 2,88, p < .017$. Der Initiiierungszeitunterschied zwischen Experimental- und Kontrollgruppe verringert sich mit zunehmender Vorbereitungszeit etwas (Abb. 16, eine eingehendere Analyse und Diskussion der SOA-Einflüsse findet sich weiter unten im Text).

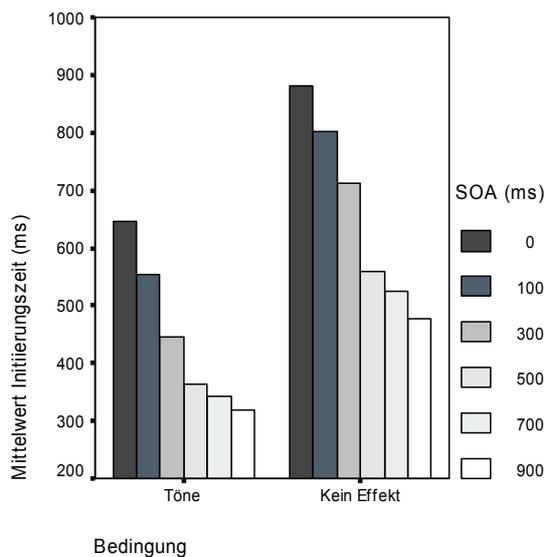


Abbildung 16: Initiiierungszeiten in den beiden Gruppen über die SOA-Stufen aufgeteilt.

Die Wechselwirkung von Sequenzlänge und Gruppe ist nicht signifikant, $F(1, 28) = 2,21, p > .1$, ebenso wie die Wechselwirkung Block x SOA, $F(25, 700) = 1,23, p > .1$. Die Wechselwirkung

Block x Sequenzlänge verfehlt die Signifikanz knapp, $F(5, 140) = 2,04$, $p < .076$. Zwei zusätzliche Analysen innerhalb der Gruppen ergab, dass dies auf eine signifikante Wechselwirkung Block x Sequenzlänge in der Experimentalgruppe zurückzuführen ist (siehe Abb. 15), $F(5, 75) = 4,68$, $p < .001$. In dieser Gruppe nimmt der Sequenzlängeneffekt im Laufe der Testphase ab. In der Kontrollgruppe ist dies nicht der Fall, $F < 1$. Keine der übrigen Zweifach-, Dreifach- und Vierfachwechselwirkungen erreichte die Signifikanz (alle p s $\gg .1$).

Ausführungszeiten

Für jede Versuchsperson wurden wiederum mittlere Interresponsezeiten für jede Faktorkombination berechnet. Diese Daten wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), SOA (6 Stufen), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Toneffekte, Keine Effekte) unterzogen (Abb. 17).

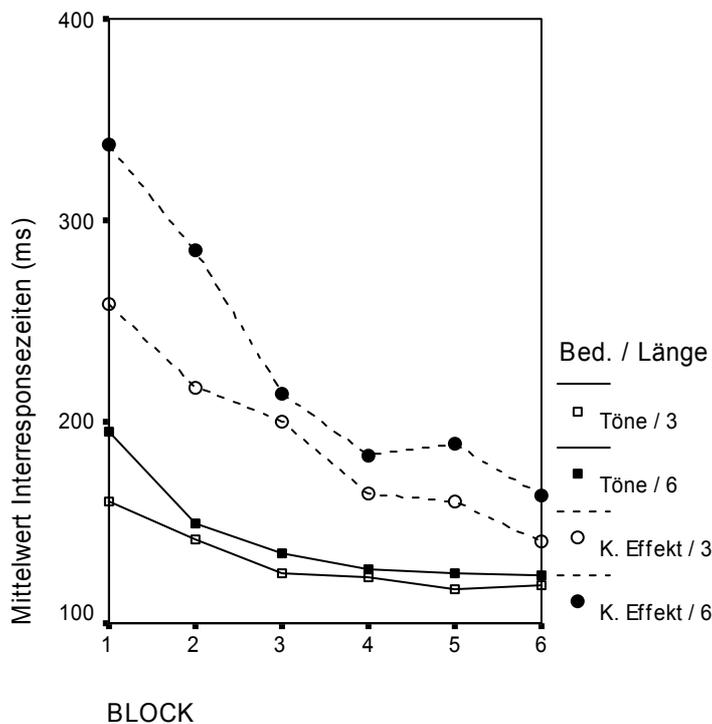


Abbildung 17: Mittlere Interresponsezeiten, aufgeteilt nach Gruppe, Sequenzlänge und Block.

Es ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Übung, $F(5, 140) = 37,89$, $p < .001$. Die Interresponsezeiten nehmen über die Zeit hinweg ab. Auch das SOA hat einen signifikanten Einfluss, $F(5, 140) = 8,21$, $p < .001$. Dieser Einfluss wird weiter unten näher qualifiziert. Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 28) = 27,22$, $p < .001$. Tastendrucke innerhalb von kurzen Sequenzen werden im Schnitt schneller ausgeführt als Tastendrucke innerhalb von langen Sequenzen. Gruppe hat ebenfalls einen signifikanten

Haupteffekt, $F(1, 28) = 7,98$, $p < .009$. In der Experimentalgruppe werden die Sequenzen im Schnitt schneller ausgeführt als in der Kontrollgruppe.

Zwischen Übung und Gruppe besteht eine signifikante Wechselwirkung, $F(5, 140) = 5,86$, $p < .001$. Die Interresponsezeiten nehmen in den Gruppen „Keine Effekte“ etwas stärker ab als in der Experimentalgruppe, was möglicherweise auf einen Bodeneffekt in der Experimentalgruppe zurückzuführen ist (Abb. 17).

Die Wechselwirkung SOA x Gruppe ist signifikant, $F(5, 140) = 3,70$, $p < .003$. Eine zusätzliche Analyse für beide Gruppen getrennt ergab, dass dies ausschließlich auf einen signifikanten Einfluss des Faktors SOA in der Experimentalgruppe zurückzuführen ist, $F(5, 75) = 13,61$, $p < .001$. In Gruppe „Toneffekte“ steigen die mittleren Interresponsezeiten in den Durchgängen mit Vorbereitungszeit mit zunehmendem SOA leicht an (siehe Abb. 18). In Gruppe „Kein Effekt“ hingegen wirkt sich die SOA-Variation nicht auf die Interresponsezeiten aus, $F(5, 65) = 1,13$, $p >> .1$.

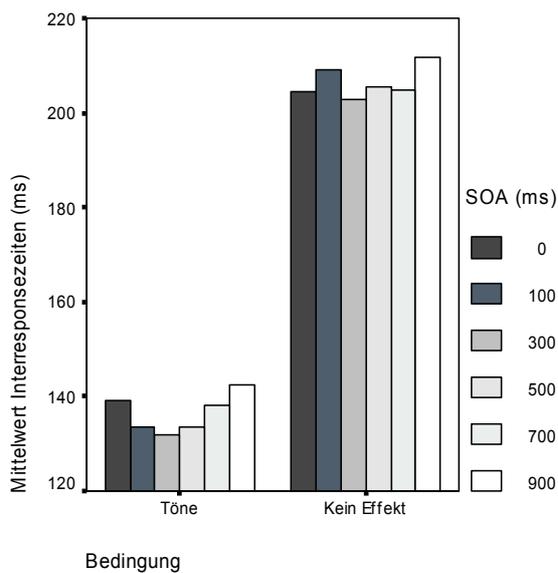


Abbildung 18: Mittlere Interresponsezeiten in beiden Bedingungen, aufgeteilt nach dem SOA.

Die Wechselwirkung von Sequenzlänge und Gruppe ist nicht signifikant, $F(1, 28) = 3,01$, $p < .098$. Die Wechselwirkung Übung x Sequenzlänge ist signifikant, $F(5, 140) = 14,09$, $p < .001$. Der Sequenzlängeneffekt in den Interresponsezeiten nimmt im Laufe der Übung ab. Keine der übrigen Zweifach-, Dreifach- und Vierfachwechselwirkungen erreichte die Signifikanz (alle $ps >> .1$).

Diskussion

Eine Reihe von Ergebnissen von Experiment 4 konnte in Experiment 5 repliziert werden: In der ersten Hälfte der Trainingsphase machten die Versuchspersonen der Experimentalgruppe erneut deutlich mehr Fehler als die der Kontrollgruppe. In der Testphase nahmen die Initiierungs- und Interresponsezeiten mit zunehmendem Trainingsstand ab. Kurze Sequenzen werden schneller initiiert und ausgeführt als lange Sequenzen, Initiierungs- und Interresponsezeiten nehmen in der Kontrollgruppe vor allem anfangs stärker ab als in der Experimentalgruppe. Das Niveau von Interresponse- und Initiierungszeiten der Tongruppe liegt in Experiment 5 signifikant unter dem der Gruppe ohne zusätzliche Effekte. Zwar zeigt sich ein signifikanter Sequenzlängeneffekt auch in der Experimentalgruppe, er nimmt dort aber im Verlauf der Übung immer weiter ab, während er in der Kontrollgruppe auf dem gleichen Niveau erhalten bleibt.

Wiederum sind also die Versuchspersonen in der Experimentalgruppe effektiver beim Erwerb und der Ausführung der Sequenzen, obwohl sie in der Trainingsphase deutlich weniger korrekte Sequenzausführungen absolviert haben. Die Tatsache, dass es zunächst schwieriger zu sein scheint, gezielt Töne zu erzeugen, als auf Buchstaben mit zugeordneten Tastendrücken zu reagieren, scheint den Aufbau einer verhaltenssteuernden Sequenzrepräsentation eher zu begünstigen als zu behindern. Dies könnte möglicherweise motivationale Ursachen haben: Weil es den Versuchspersonen schwerer fällt, die richtige Taste zu drücken, um einen bestimmten Ton zu erzeugen, investieren sie möglicherweise mehr Ressourcen in den schnellen Aufbau einer Gedächtnisrepräsentation der Sequenzen, die ihnen die Vorhersage des nächsten Tastendruckes sicher ermöglichen wird – unabhängig von der Fähigkeit, den vorgegebenen Ton korrekt reproduzieren zu können. Dies könnte das scheinbar paradoxe Ergebnis erklären. Die erhöhte Schwierigkeit der Lernphase und nicht die Toneffekte per se wären dann für die Gruppenunterschiede verantwortlich. Zwei Beobachtungen sprechen gegen diese Annahme: Zum einen wurde die Reduktion in den Initiierungszeiten der langen Sequenzen und das Verschwinden des Sequenzlängeneffektes mit Toneffekten auch in Experiment 3 beobachtet, in dem es keinen vergleichbaren Schwierigkeitsunterschied gab, da alle Sequenzen mit Hilfe von visuellen Reizen vermittelt wurden. Zum anderen kann diese Schwierigkeitshypothese nicht den Einfluss der Toneffekte in den SRT-Experimenten 1 und 2 erklären. Die unterschiedliche Schwierigkeit der Trainingsphase in Experiment 4 und 5 hat also möglicherweise eine Auswirkung, sie kann jedoch nicht für alle beobachteten Gruppenunterschiede verantwortlich sein.

Die Wirkung der SOA-Variation auf die Initiierungszeiten ist eindeutig: Der Unterschied in den Initiierungszeiten zwischen Ton- und Kontrollgruppe nimmt mit zunehmender

Vorbereitungszeit leicht aber signifikant ab. Ein Teil der beschleunigenden Wirkung der Töne kann also durch zusätzliche Vorbereitungszeit kompensiert werden. Auch bei einem SOA von 900 ms beträgt der Unterschied jedoch nach wie vor etwa 83 ms. Der tendenziell asymptotische Verlauf der Initiierungszeiten über die SOA-Stufen (Abb. 16) macht es unwahrscheinlich, dass eine weitere starke Annäherung von Experimental- und Kontrollgruppe durch mehr Vorbereitungszeit möglich ist.

Dieses Ergebnis ist gut mit der Zwei-Prozess-Vorstellung von Klapp (1995) in Einklang (siehe Abschnitt 1.7.4.) zu bringen: Ein Prozess (INT), der für die interne Konfiguration von Motorchunks verantwortlich ist, kann vorprogrammiert werden und hängt von der internen Komplexität der Chunks ab. Prozess INT kann auch in der Kontrollgruppe von der Vorbereitungszeit profitieren. Ein zweiter Prozess (SEQ) soll für die Gruppierung der einzelnen Motorchunks verantwortlich sein und hängt daher von ihrer Anzahl ab. SEQ kann erst nach dem eigentlichen Startsignal beginnen. Wenn man davon ausgeht, dass die Toneffekte das Zusammenfassen von einzelnen Tastendrücken zu Chunks begünstigen, sollte SEQ von der reduzierten Chunkzahl in der Tongruppe profitieren. Dieser Vorteil sollte sich, wie in den Daten zu sehen, auch bei längerer Vorbereitungszeit noch zeigen. Gleichzeitig spricht die Wechselwirkung von SOA und Gruppe dafür, dass auch Prozess INT von den Toneffekten profitiert, da bei kurzer Vorbereitungszeit noch ein zusätzlicher Vorteil für die Tongruppe beobachtet werden kann.

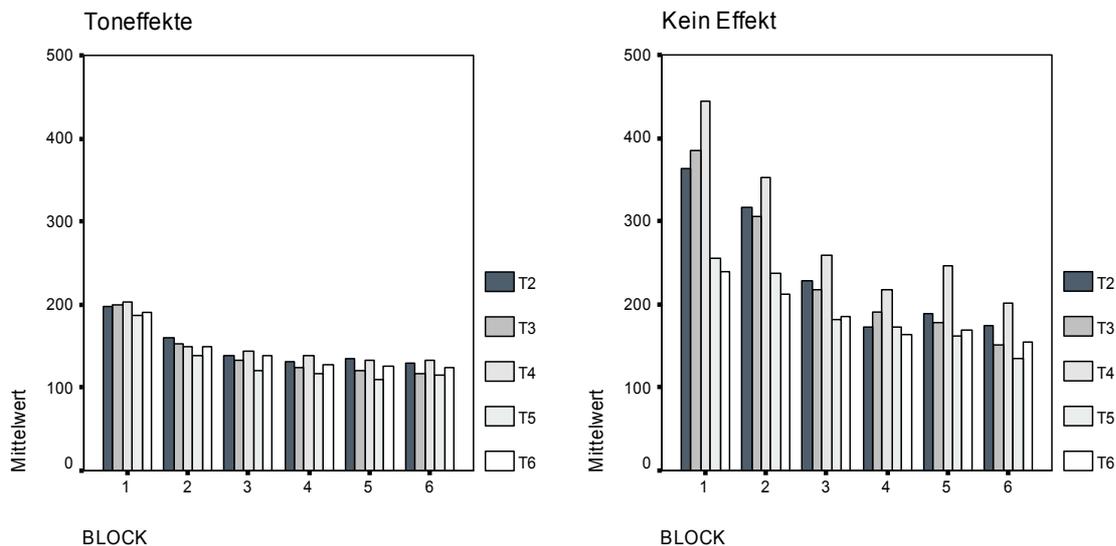


Abbildung 19 a) und b): Interresponsezeitprofile der langen Sequenzen für die beiden Gruppen über die Blöcke der Testphase.

Direkte Evidenz für erleichterte Chunking-Prozesse liefert wiederum die Analyse der IRT-Profile (Abb. 19). In Gruppe „Toneffekte“ sind die IRTs vom Beginn der Testphase an bereits sehr

homogen, in Gruppe „Kein Effekt“ ist bis zum letzten Block ein deutlicher Anstieg an Position T4 zu erkennen, was für die Initiierung eines zweiten Teilchunks an dieser Stelle spricht.

Eine entsprechende ANOVA mit den Daten der langen Sequenzen ergab für die kritische Wechselwirkung von Gruppe und Sequenzposition wieder einen signifikanten Effekt, $F(4, 112) = 6,85$, $p < .001$, die Unterschiede zwischen den IRTs an den verschiedenen Sequenzpositionen sind in Gruppe „Kein Effekt“ größer als in der Experimentalgruppe.

Zusammengenommen liefern Experiment 3 bis 5 überzeugende Evidenz dafür, dass die Toneffekte tatsächlich in die verhaltenssteuernden Repräsentationen integriert werden, die Initiierung und Ausführung motorischer Sequenzen zugrunde liegen. Sie begünstigen die Verknüpfung von einzelnen Bewegungselementen zu Chunks. Diese Chunks können dann sowohl schneller aufgerufen als auch flüssiger ausgeführt werden.

Experiment 6 sollte nun die Frage untersuchen, inwieweit spezifische Eigenschaften der Töne notwendig für den leistungsfördernden Einfluss der Bewegungseffekte sind. Die Tatsache, dass wir es gewohnt sind, Töne zu Melodien zu verknüpfen oder die längere Behaltensdauer des Echogedächtnisses könnten beispielsweise dazu beitragen, dass kontingent erzeugte Toneffekte in besonderem Maße auch die Verknüpfung der sie erzeugenden Tastendrücke erleichtern. In Experiment 6 wurde daher mit anderen, visuellen Aktionseffekten gearbeitet.

2.6. Experiment 6

Der prinzipielle Aufbau von Experiment 6 entsprach dem von Experiment 4 und 5: Das Experiment war wiederum in eine Einführungs-, eine Trainings- und eine Testphase unterteilt. In der Experimentalgruppe hatten die Versuchspersonen in der Trainingsphase die Aufgabe, dargebotene Reize durch entsprechende Aktionen erneut zu erzeugen, in der Kontrollgruppe erlernten sie die Sequenzen, indem sie auf Reize reagierten. Im Unterschied zu den bisher berichteten Experimenten waren Reize und Effekte in Experiment 6 aber Ziffern, und zwar die Ziffern 1 bis 6, die an der gleichen Bildschirmposition dargeboten wurden wie die Buchstabenreize in den bisherigen Kontrollgruppen. Auditive Effekte wurden nicht dargeboten.

Method

Versuchspersonen

An Experiment 6 nahmen insgesamt 31 Versuchspersonen teil. Wie in Experiment 4 und 5 musste eine Reihe von Versuchspersonen von der Auswertung ausgeschlossen und ersetzt werden. In der Experimentalgruppe wurden 10 Versuchspersonen ersetzt, von denen sehr viele das Fehlerkriterium von maximal 10 Prozent fehlerhafter Sequenzen nur knapp verfehlten, in der Gruppe „Keine Effekte“ wurden 2 Versuchspersonen ersetzt. Beide Gruppen umfassten 10 Versuchspersonen. In Gruppe „Effekt“ waren 9 weibliche und eine männliche Versuchsperson, das mittlere Alter betrug 23 Jahre ($s = 4,8$). In Gruppe „Keine Effekte“ waren 6 weibliche und 4 männliche Versuchspersonen, das mittlere Alter betrug 25 Jahre ($s = 3,2$). Alle Versuchspersonen waren Psychologiestudenten im Grundstudium, die durch ihre Teilnahme eine Prüfungsvoraussetzung erfüllten.

Reize und Reaktionen

Anzeige und Reaktionstasten waren identisch mit der der Kontrollgruppe in Experiment 4, mit einer Ausnahme: Statt der Buchstaben wurde in jedem Durchgang an der gleichen Position eine der Ziffern 1-6 dargeboten. Sie waren den sechs Reaktionstasten von links nach rechts aufsteigend zugeordnet. In der Experimentalgruppe sahen die Versuchspersonen in jedem Durchgang eine Ziffer, die sie dann durch den entsprechenden Tastendruck erneut erzeugten. Wurde eine falsche Taste gedrückt, wurde die dieser Taste zugeordnete Ziffer als Effekt dargeboten. In der Kontrollgruppe verschwand die Reiz-Ziffer, sobald eine Taste gedrückt wurde, und es wurden keine Effekte dargeboten, außer der üblichen Fehlermeldung bei einem falschen Tastendruck.

Ablauf

Einführungs- und Trainingsphase verliefen in Experiment 6 analog Experiment 4 und 5. Alle Versuchspersonen bearbeiteten zunächst eine zufallsgesteuerte serielle Wahlreaktionsaufgabe, danach übten sie die beiden Sequenzen ein, indem sie auf Buchstaben reagierten und dabei in der Experimentalgruppe die entsprechenden Effekte erzeugten. In der Testphase wurde in der Experimentalgruppe weiterhin für jeden Tastendruck die entsprechende Effekt-Ziffer für 50 ms dargeboten, für die Kontrollgruppe sah die Testphase genauso aus wie in Experiment 4 und 5. Wie in Experiment 4 umfasste sie 6 Blöcke mit je 60 Durchgängen. Die verwendeten Sequenzen waren ebenfalls die gleichen wie in Experiment 4 und 5.

Die Initiierungszeiten wurden jeweils ab der Präsentation des sequenzspezifischen Hinweisreizes bis zur Registrierung des ersten Tastendrucks gemessen. Die Interresponsezeiten wurden jeweils von der Registrierung eines Tastendruckes bis hin zum nächsten Tastendruck erfasst. Die Initiierungs- und Interresponsezeiten von Sequenzen, in denen ein oder mehrere Fehler gemacht worden waren, wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Ergebnisse

Trainingsphase

Da in der Trainingsphase wiederum keine Geschwindigkeitsinstruktion vorgegeben war, wird hier wieder auf die Auswertung der Reaktionszeiten verzichtet. Als Maß für den Erwerb der beiden Sequenzen in den zwei Gruppen sollen wieder die Fehler herangezogen werden. Abbildung 20 zeigt die mittleren Fehlerraten über alle Tastendrucke hinweg, aufgeteilt nach dem Trainingsblock und den Bedingungen.

Die Daten wurden einer Varianzanalyse mit Messwiederholung unterzogen, mit den Faktoren Übungsblock und Gruppe. Weder der Faktor Block noch der Faktor Gruppe hatten einen signifikanten Einfluss (beide $F < 1$). Die Fehlerzahlen nehmen über die Trainingsphase hinweg nicht signifikant ab, es gibt keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Auch die Wechselwirkung der beiden Faktoren ist nicht signifikant ($F < 1$).

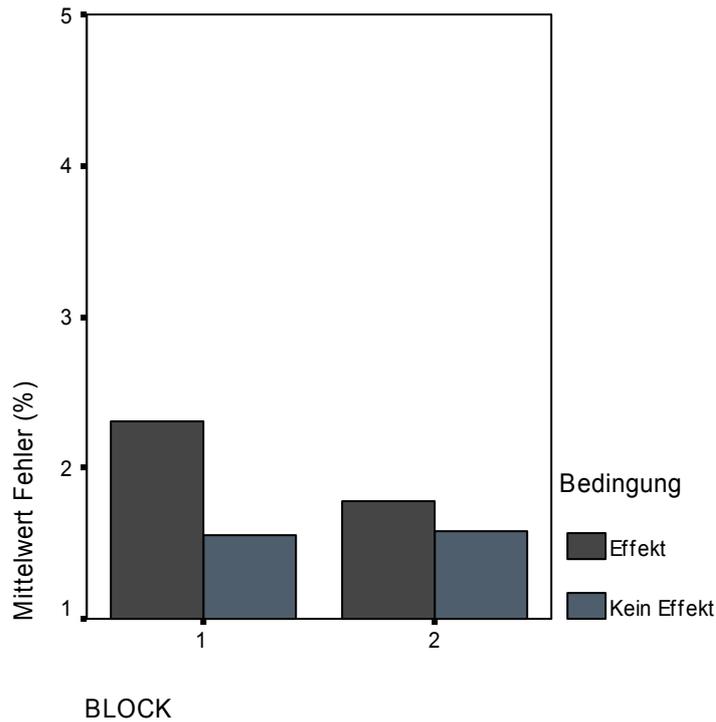


Abbildung 20: Fehlerraten in der Trainingsphase, aufgeteilt nach Block und Gruppe.

Testphase

Fehlerdaten

Wie in Experiment 3, 4 und 5 wurde auch in Experiment 6 jede Sequenz, in der ein einzelner Fehler auftrat, von der reaktionszeitbezogenen Auswertung ausgeschlossen. Wie in Experiment 4 wurden die Datensätze von Versuchspersonen, die mehr als 10 Prozent aller Sequenzen fehlerhaft eingaben, von der Auswertung ausgeschlossen. Für viele Versuchspersonen war es offenbar sehr schwierig, diesem Fehlerkriterium gerecht zu werden, weshalb besonders in der Experimentalgruppe eine vergleichsweise hohe Anzahl von Teilnehmern ersetzt werden musste (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“). Die Fehlerdaten werden wiederum nicht weiter ausgewertet, es gab wieder keine Anzeichen für *Speed-Accuracy-Tradeoffs*.

Initiierungszeiten

Die Initiierungszeiten der Testphase wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Effekte, Keine Effekte) unterzogen (Abb. 21).

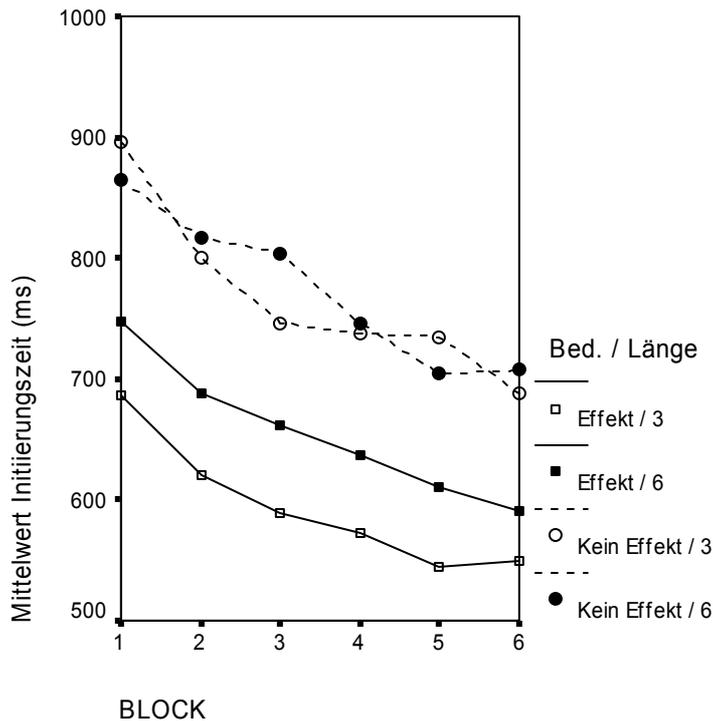


Abbildung 21: Initiierungszeiten, aufgeteilt nach Sequenzlänge, Gruppe und Block.

Der Faktor Übung hatte einen signifikanten Einfluss, $F(5, 90) = 14,58$ $p < .001$. Die Initiierungszeiten nehmen über die Zeit hinweg ab. Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge verfehlt die Signifikanz, $F(1, 18) = 2,96$, $p < .102$. Der Haupteffekt des Faktors Gruppe verfehlt ebenfalls die Signifikanz, $F(1, 18) = 2,41$, $p < .137$. Die Wechselwirkung von Übung und Gruppe ist nicht signifikant, $F < 1$. Es gibt keine signifikante Wechselwirkung zwischen Übung und Sequenzlänge $F(5, 90) = 1,34$, $p >> .1$. Der Sequenzlängeneffekt verändert sich über die Zeit hinweg nicht. Auch die Wechselwirkung von Gruppe und Sequenzlänge ist nicht signifikant, $F(1, 18) = 2,00$, $p > .1$. Die Dreifachwechselwirkung von Übung, Sequenzlänge und Gruppe ist ebenfalls nicht signifikant ($F < 1$).

Ausführungszeiten

Für jede Versuchsperson wurden wiederum mittlere Interresponsezeiten für jede Faktorkombination berechnet. Diese Daten wurden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Übung (6 Blöcke), Sequenzlänge (3 Elemente vs. 6 Elemente) und Gruppe (Effekte, Keine Effekte) unterzogen (Abb. 22).

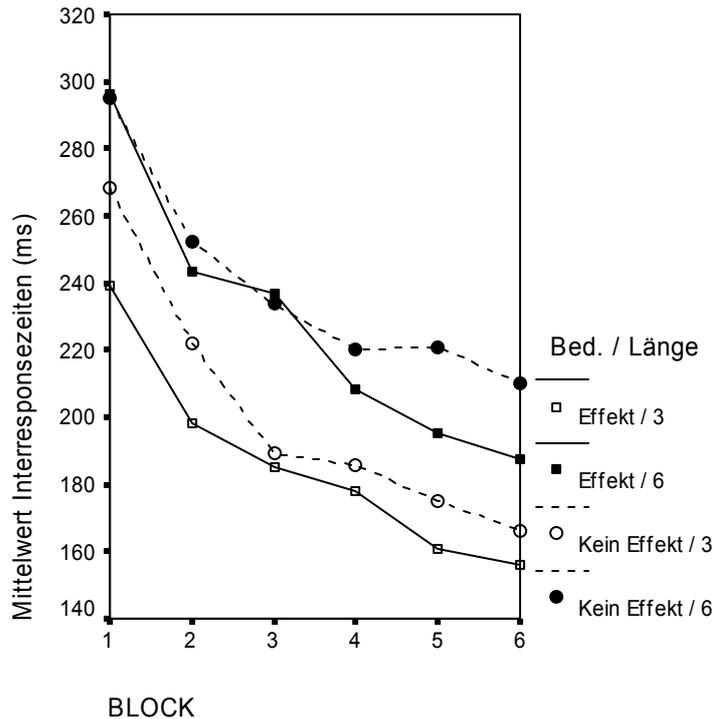


Abbildung 22: Mittlere Interresponsezeiten, aufgeteilt nach Sequenzlänge, Gruppe und Block.

Es ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Übung, $F(5, 90) = 50,78$, $p < .001$. Die Interresponsezeiten nehmen über die Zeit hinweg ab. Der Einfluss des Faktors Sequenzlänge ist ebenfalls signifikant, $F(1, 18) = 14,93$, $p < .001$. Tastendrucke innerhalb von kurzen Sequenzen werden im Schnitt schneller ausgeführt als Tastendrucke innerhalb von langen Sequenzen. Der Haupteffekt des Faktors Gruppe ist nicht signifikant, $F < 1$. Es gibt hinsichtlich der mittleren Interresponsezeiten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Keine der Zweifachwechselwirkungen ist signifikant, alle $F < 1$. Die Dreifachwechselwirkung Übung x Sequenzlänge x Gruppe ist ebenfalls nicht signifikant, $F(5, 90) = 2,10$, $p < .72$.

Diskussion

Das Ergebnismuster von Experiment 6 unterscheidet sich deutlich von dem der vorangegangenen Experimente mit Toneffekten: Ein differentieller Einfluss der als Aktionseffekte dargebotenen Ziffern zeigt sich nicht. Bereits in der Trainingsphase ist kein bedeutsamer Unterschied in den Fehlerraten vorhanden, ein Hinweis darauf, dass die Zuordnung von Tastendrücker zu Ziffern für die Versuchspersonen leichter zu erwerben ist als die Zuordnung von Tastendrücker zu Tönen. In der Testphase interagiert der Faktor Gruppe mit keinem der übrigen Faktoren. Allerdings zeigt sich in der Tendenz ein leichter Vorteil der Effektgruppe bei den Initiierungszeiten (siehe Abb. 21), der mit zusätzlicher statistischer

Testpower möglicherweise signifikant würde. Dies spricht dafür, dass die Ziffern durchaus als Effekte mit den Tastendrücken verknüpft wurden, und dass sie bei der Initiierung der Sequenzen auch mitaktiviert wurden. Trotzdem scheinen visuell dargebotenen Ziffern spezifische Eigenschaften zu fehlen, die zu einer verbesserten Lernleistung hätten beitragen können. Dementsprechend fehlt in Experiment 6 auch der Einfluss der dargebotenen Effekte auf Chunking-Prozesse. Die kritische Interaktion von Sequenzposition und Gruppe ist in Experiment 6 nicht signifikant, $F < 1$.

Über die spezifischen Eigenschaften der Töne, die sich in den vorangegangenen Experimenten als Chunking-fördernd und damit leistungssteigernd ausgewirkt haben, kann hier nur spekuliert werden. Ein nahe liegender Erklärungsansatz bezieht sich auf die besondere zeitliche Integrierbarkeit von Tönen: Sie sind uns im Alltag viel eher als Melodien, also als verknüpfte Sequenzen geläufig, denn als Einzelereignisse. Darüber hinaus können wir Töne, wie bereits in Abschnitt 2.2. erwähnt, deutlich länger als visuelle Reize passiv speichern, sie stehen also länger für weitere Verarbeitung beziehungsweise Verknüpfung zur Verfügung. Diese besondere Verknüpfbarkeit erleichtert möglicherweise die Verkettung Ton-erzeugender Handlungen. Während in Experiment 6 jeder Effekt an der gleichen Stelle dargeboten wurde, sich die nacheinander dargebotenen Effektziffern also gegenseitig „maskierten“, waren die Tonsequenzen demnach noch sekundenlang zur Verknüpfung sowohl mit den sie erzeugenden Aktionen als auch miteinander verfügbar.

Daneben ziehen Töne unwillkürlich Aufmerksamkeit auf sich und können schwerer ignoriert werden als beispielsweise visuelle Reize. Es ist gut möglich, dass einige Versuchspersonen in Experiment 6 den Effekt-Ziffern keinerlei Beachtung schenkten, weil sie zur effektiven Bearbeitung der Aufgabe nicht notwendig waren.

3. Allgemeine Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zu zeigen, dass Aktionseffekte nicht nur an der Auswahl und Initiierung einzelner Bewegungen beteiligt sind, sondern auch eine entscheidende Rolle bei der Verkettung von Einzelbewegungen zu Sequenzen spielen.

Experiment 1 zeigte, dass distinkte Toneffekte, die kontingent mit den Aktionen in einer SRT-Aufgabe verknüpft sind, die Lernleistung gegenüber einer Gruppe ohne Toneffekte und einer Gruppe mit nicht-kontingenten Toneffekten verbessern. Die Ergebnisse von Experiment 1 legen nahe, dass die Toneffekte zum Aufbau einer verhaltenssteuernden Repräsentation beitragen.

Experiment 2 zeigte einerseits, dass die in Experiment 1 beobachtete Verbesserung des seriellen Lernens nicht auf den Einfluss von Reiz-Effekt-Kompatibilität zurückzuführen ist. Andererseits wurde deutlich, dass die Toneffekte neben Kontingenz noch andere Eigenschaften besitzen müssen, um sich auf die Lernleistung auszuwirken, namentlich Kompatibilität mit den Reaktionslokalationen. Auf welchen Ursachen der Einfluss von Reaktions-Effekt-Kompatibilität auf das Lernen beruht, bleibt zu klären. Denkbar ist, dass auch inkompatible Effekte mit den sie erzeugenden Reaktionen verknüpft werden, aber nicht zum seriellen Lernen beitragen können. Da die Ergebnisse von Experiment 2 aber keinerlei Einfluss der inkompatiblen Toneffekte zeigen, ist aufgrund der vorhandenen Daten die sparsamste Erklärung, dass inkompatible Effekte nicht oder nur sehr langsam mit den sie auslösenden Reaktionen verknüpft werden. Dass bestimmte assoziative Verknüpfungen leichter und andere schwerer erworben werden, ist ein in der Literatur zu Konditionierungsprozessen immer wieder beschriebenes Ergebnis (z. B. Seligman & Hager, 1972).

In beiden Experimenten kovariierten explizites und implizites Sequenzwissen. Das berichtete explizite Wissen war allerdings zumeist sehr fragmentarisch, was es unwahrscheinlich macht, dass es einen ursächlichen Zusammenhang zwischen dem in der Free Recall Aufgabe erfassten verbalisierbaren Sequenzwissen und dem Verlauf der Reaktionszeiten gibt. Es erscheint vielmehr plausibel, dass das verhaltensrelevante Wissen ideomotorischer Natur ist, dass also Ketten von sensorischen Reaktionsabbildern gelernt werden, die sowohl propriozeptiv-taktile als auch distale Effekte der Bewegungen einbeziehen. Da sich die Toneffekte in einer Lernumgebung mit „Second Order Conditional“-Abhängigkeiten auswirken, muss der ideomotorische Verkettungsprozess mindestens drei aufeinanderfolgende Reaktionsabbilder miteinander verknüpfen können.

Wenn die Toneffekte tatsächlich in eine verhaltenssteuernde Repräsentation integriert werden, die der Antizipation und Vorbereitung nachfolgender Bewegungen dient, sollte sich ihr Einfluss

auch in einer Lernsituation zeigen, in der die Versuchspersonen explizit aufgefordert werden, sich motorische Sequenzen anzueignen. Dass dies tatsächlich der Fall ist, zeigte Experiment 3: Der Sequenzlängeneffekt, also der Unterschied in den Initiierungszeiten zwischen kürzeren und längeren Bewegungsfolgen, verschwand, wenn distinkte Töne an die Tastendrücke geknüpft waren. Dies kann in erster Linie darauf zurückgeführt werden, dass lange Sequenzen zu Beginn des Trainings bereits schneller initiiert werden konnten. Mit unspezifischen Toneffekten zeigte sich dieser Einfluss nicht. Mit Blick auf die Literatur zum Erwerb kurzer Bewegungssequenzen lässt sich spekulieren, dass die Reduktion der Initiierungszeiten in den langen Tonsequenzen auf der Verknüpfung einzelner Bewegungselemente zu Chunks basiert, die dann auf einmal abgerufen werden können, was den Zeitaufwand für die Initiierung reduziert. In den mittleren Interresponsezeiten zeigte sich in Experiment 3 kein spezifischer Einfluss der Toneffekte, was mit paradigmatischen Eigenheiten zusammenhängen könnte: Bis zum Ende des Experimentes wurde für jeden einzelnen Tastendruck ein tastenspezifischer Reiz dargeboten. Dies könnte die Versuchspersonen zu einer generell rhythmisierten, durch Erwartung und Wahrnehmung des jeweils nachfolgenden Reizes „gebremsten“ Ausführung verleitet haben. Daneben war in Experiment 3 keine vollständige Kontingenz zwischen Tastendrücken und Toneffekten gegeben, da die Effektzurordnung innerhalb der Versuchspersonen variiert wurde, also die gleichen Tasten manchmal einen Ton, manchmal einen Klick erzeugten, je nachdem, welche Sequenz gerade auszuführen war. Aktions-Effekt-Kontingenz spielt aber, wie Experiment 1 zeigt, eine wichtige Rolle für die Wirkung der Toneffekte.

In Experiment 4 reagierten die Versuchspersonen der Experimentalgruppe nicht auf visuelle Reize, sondern stellten mit ihren Tastendrücken gezielt vorgegebene Töne her. Die Instruktion bezog sich also explizit auf das Erlernen herzustellender Effektsequenzen. Der Sequenzlängeneffekt zeigte sich in der Experimentalgruppe wiederum nicht, zusätzlich ergab sich ein numerischer Vorteil sowohl bei den Initiierungs- als auch bei den Interresponsezeiten. Dieser Vorteil war von Beginn der Testphase an zu beobachten, obwohl die Versuchspersonen der Experimentalgruppe aufgrund deutlich höherer Fehlerzahlen in der Trainingsphase weniger korrekte Sequenzausführungen absolviert hatten. Die Toneffekte reduzierten also den Trainingsaufwand für eine schnelle Initiierung und Ausführung beträchtlich, und zwar bereits in sehr frühen Lernphasen. Darüber hinaus konnte in Experiment 4 die Vermutung erhärtet werden, dass sich die Toneffekte auf Chunking-Prozesse auswirkten: Neben dem Ausbleiben des Sequenzlängeneffektes lieferte auch die Betrachtung von Interresponsezeit-Profilen und eine entsprechende inferenzstatistische Analyse Belege für eine effektivere Zusammenfassung von Einzelbewegungen zu Chunks in der Experimentalgruppe.

In Experiment 5 wurde zusätzlich zur Darbietung von Toneffekten die vor dem Startsignal zur Verfügung stehende Vorbereitungszeit variiert. Wiederum ergab sich ein Vorteil für die Tongruppe, sowohl für die Initiierungs- als auch für die Interresponsezeiten. Der Sequenzlängeneffekt wurde in Experiment 5 zwar in der Experimentalgruppe nicht völlig eliminiert, reduzierte sich jedoch in dieser Gruppe im Laufe der Testphase, im Gegensatz zur Kontrollgruppe ohne Toneffekte. Der Unterschied in den Initiierungszeiten zwischen Experimental- und Kontrollgruppe verringerte sich mit zunehmender Vorbereitungszeit (SOA), verschwand aber nicht. Dies legt nahe, dass sich die Toneffekte sowohl auf vor der Darbietung des Startsignals ablaufende Selektions- oder Vorbereitungsprozesse, als auch auf Prozesse auswirken, die erst mit der eigentlichen Initiierung in Gang gesetzt werden können. Die vorteilhafte Wirkung der Töne auf Selektions- oder Vorbereitungsprozesse kann in der Kontrollgruppe durch ausreichende Vorbereitungszeit offenbar teilweise kompensiert werden. Auch in Experiment 5 zeigte sich erneut ein Chunking-begünstigender Einfluss der Toneffekte, die Interresponsezeiten glichen sich einander schnell auf niedrigem Niveau an, was in der Kontrollgruppe nicht zu beobachten war.

Diese Befunde sind gut mit einer Zwei-Prozess-Vorstellung in Einklang zu bringen, nach der ein Prozess für die Kontrolle der internen Konfiguration von Motorchunks verantwortlich ist und von der internen Komplexität der Chunks abhängt, während ein zweiter Prozess für die Gruppierung der einzelnen Motorchunks verantwortlich ist und daher von ihrer Anzahl abhängt (Klapp, 1995). Beide Prozesse scheinen von den Toneffekten zu profitieren.

Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse von Experiment 3 bis 5 dafür, dass die Toneffekte die Zusammenfassung von Einzelbewegungen zu Motorchunks begünstigen, was sich sowohl auf die Initiierung als auch auf die Ausführung auswirkt. Analog der in Abschnitt 1.5.5. skizzierten Modellvorstellung von Greenwald (1970) kann man spekulieren, dass zunächst die Toneffekte mit den sie auslösenden Aktionen verknüpft werden, ein Prozess, der von Faktoren wie Kontingenz und Reaktions-Effekt-Kompatibilität beeinflusst wird. Im Anschluss werden die aus propriozeptiven, taktilen und auditorischen Konsequenzen zusammengesetzten Effektbilder seriell miteinander verkettet, wobei die Länge der untereinander verknüpften Einheiten mit zunehmender Übungsdauer zunimmt. Dieser Prozess muss nicht notwendigerweise zu einer bedeutsamen Verbesserung der Lernleistung führen, wie Experiment 6 zeigt: Ziffern als visuelle Handlungseffekte hatten nur einen schwachen numerischen Einfluss auf die Initiierungszeiten, statistisch lässt sich eine Wirkung der Effekt-Ziffern nicht nachweisen. Toneffekte scheinen also in besonderer Weise geeignet zu sein, einerseits mit Tastendrücken verknüpft zu werden und andererseits zu einer schnellen und effektiven Verknüpfung der Tastendrücke untereinander beizutragen. Wie bereits diskutiert, könnte das beispielsweise mit der Tatsache zusammenhängen,

dass wir es gewohnt sind, Töne als Tonsequenzen, als Melodien wahrzunehmen. Dies wird auch durch die im Vergleich zum visuellen Ultrakurzzeitgedächtnis lange Behaltensdauer im „Echogedächtnis“, also dem auditorischen UKZG, begünstigt. Abgesehen davon können visuelle Effekte in einem Paradigma wie dem hier benutzten relativ leicht ignoriert werden, während Töne automatisch Aufmerksamkeit auf sich ziehen.

Eine mögliche Alternativerklärung für die Ergebnisse von Experiment 1 und 2 wäre die Überlegung, dass die durch die Toneffekte entstehende zusätzliche Reizsequenz die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen auf die repetitive Natur des Stimulusmaterials lenkt, was zu einem verstärkten Erwerb „expliziten“ Sequenzwissens führen könnte. Dies scheint aber aufgrund verschiedener Ergebnisse nicht plausibel: Zunächst gibt es im Bezug auf das durch Nachbefragungen erfasste explizite Wissen der Versuchspersonen keine systematischen Vorteile für die Versuchspersonen der Experimentalgruppen. Darüber hinaus hörten die Versuchspersonen in der Gruppe mit nicht tastenkontingenten Toneffekten die gleiche Tonsequenz wie die Experimentalgruppe, dies führte jedoch nicht zu einer Verbesserung der Lernleistung. Schließlich zeigten sich Auswirkungen der Toneffekte auch in den Experimenten 3 bis 5, in denen es eine explizite Lerninstruktion gab, und von Anfang an auf die sequentielle Struktur des Materials hingewiesen wurde, also der inzidentelle Erwerb expliziten Wissens keine Rolle mehr spielen konnte. Dies spricht dafür, dass auch in seriellen Wahlreaktionsaufgaben in erster Linie ideomotorisches Wissen erworben wird, also Wissen über die Verknüpfungen zu erzeugender sensorischer Ereignisse. Es scheint plausibel, dass die Toneffekte den Aufbau einer stabilen Sequenzrepräsentation im Sinne des ideomotorischen Prinzips begünstigen, und dass die zunehmende Qualität einer ideomotorischen Sequenzrepräsentation auch die Entwicklung und Enkodierung expliziten Sequenzwissens erleichtert.

Mit einer ähnlichen Argumentation kann auch dem Einwand entgegengetreten werden, die durch die Toneffekte hervorgerufenen zusätzlichen Reizsequenzen in Experiment 3 bis 5 allein hätten, etwa im Sinne „tieferer Verarbeitung“, zu den beobachteten Leistungsverbesserungen geführt. Wie Experiment 1, sowie die Ergebnisse von Hoffmann et al. (2001, Experiment 1 und 2) zeigen, führt das Vorhandensein einer die Sequenzstruktur betonenden Tonsequenz alleine nicht zu einer Verbesserung der Lernleistung. Diese tritt nur dann ein, wenn die Toneffekte kontingent von den Tastendrücken erzeugt werden. Weitere Ergebnisse, die diese Interpretation unplausibel machen, ergaben zwei zusätzlich durchgeführte Experimente, die hier aus Platzgründen nur kurz angesprochen werden sollen: Eine Gruppe, die analog der Experimentalgruppe von Experiment 4 mit Toneffekten trainierte, der aber bereits zu Beginn der Testphase keine Effekte mehr dargeboten wurden, produzierte in der Testphase signifikant längere Initiierungszeiten als die Experimentalgruppe von Experiment 4. Das Wegfallen der Toneffekte zu Beginn der Testphase

erschwerte also die Auswahl und/oder die Vorprogrammierung der Sequenzen. Dies spricht sehr für eine antizipative Repräsentation, die sich auf die Vorbereitung der Sequenz auswirkt und zeigt gleichzeitig, dass der Nutzen der Toneffekte nicht allein auf zusätzlichem Feedback zur Fehlerkontrolle beruhen kann – sonst hätten auch die Ausführungszeiten vom Wegfallen der Toneffekte betroffen sein müssen. In einer weiteren Gruppe wurden die Toneffekte erst im 4. und 5. Block der Testphase nicht mehr dargeboten. Hier zeigte sich nur ein leichter numerischer, aber statistisch nicht bedeutsamer Anstieg der Initiierungs- und Interresponsezeiten in Block 4, in Block 5 nahmen beide Maße trotz der Abwesenheit von Toneffekten wieder signifikant ab. Die tatsächliche Darbietung der Toneffekte scheint also nicht mehr zwingend notwendig zu sein, nachdem eine stabile ideomotorische Repräsentation der Sequenzen entstanden ist.

Ein letzter denkbarer Einwand betrifft die stark unterschiedlichen Fehlerzahlen von Experimental- und Kontrollgruppen in den Trainingsphasen von Experiment 4 und 5: Gerade für musikalisch ungeübte Versuchspersonen erwies es sich zunächst als schwierig, gezielt bestimmte Töne mit bestimmten Tastendrücken zu erzeugen, was zu vergleichsweise hohen Fehlerzahlen im ersten Trainingsblock führte. Dies könnte eine kompensatorische Anstrengung ausgelöst haben, die die Versuchspersonen dazu brachte, mehr Aufwand in das schnelle Speichern der beiden zu lernenden Sequenzen zu investieren, um sich von Reizen und Effekten möglichst schnell unabhängig zu machen. Mehrere Befunde sprechen gegen diese Interpretation: Zunächst könnte sie nicht die Ergebnisse von Experiment 1, 2 und 3 erklären, in denen kein vergleichbarer Schwierigkeitsunterschied herrschte. Konkret wurde in Experiment 3 – in dem alle Sequenzen durch eindeutige visuelle Reize vorgegeben wurden – das Ausbleiben des Sequenzlängeneffektes ebenso beobachtet wie in Experiment 4 und – in eingeschränktem Maße – in Experiment 5. Weitere Hinweise liefert das im vorigen Absatz angesprochene zusätzliche Experiment: Wenn vom Beginn der Testphase an keine Toneffekte mehr dargeboten wurden, wirkte sich dies stark auf die Initiierungszeiten aus. Der Schwierigkeitsunterschied in der Trainingsphase allein kann die Ergebnisse von Experiment 4 und 5 also nicht erklären.

Insgesamt legen die Befunde nahe, dass die Eigenschaften redundanter sensorischer Effekte den Aufbau von Handlungsrepräsentationen an mindestens zwei Stellen beeinflussen: Zum einen beim Erwerb von Antizipationen über die sensorischen Konsequenzen von Bewegungen – hier können sich, wie Experiment 1 und 2 zeigen, beispielsweise Kontingenz und Kompatibilität auswirken – und zum anderen bei der Verkettung von Einzelaktionen zu Bewegungsfolgen. Hier wirkt sich offenbar die Reizmodalität und die Verknüpfbarkeit der erzeugten Effekte aus, wie etwa der Vergleich der Experimente 4 und 6 (Töne vs. Ziffern) zeigt. Über einen dritten Aspekt kann aufgrund der vorliegenden Daten nur spekuliert werden: Die Interaktion von Effekteigenschaften und den strukturellen Eigenschaften der zu erlernenden Bewegungsfolgen.

In den vorliegenden Experimenten waren statistische, relationale und raum-zeitliche Struktureigenschaften weitgehend kontrolliert, um den Einfluss der Aktionseffekte isoliert betrachten zu können. Die Tatsache, dass aber beispielsweise relationale, beziehungsweise raum-zeitliche Strukturen Chunking beeinflussen können (siehe Abschnitt 1.4.2 und 1.4.3.) lässt die Vorhersage zu, dass Töne, bei denen wir an das Vorhandensein relationaler und raum-zeitlicher Strukturen gewöhnt sind, man denke nur an eine Fuge von Bach, mit entsprechend strukturiertem Material eine noch ausgeprägtere Wirkung entfalten könnten. Zukünftige Experimente sollten zeigen, in welche Wechselwirkung gezielt variierte Struktureigenschaften mit entsprechenden Aktionseffekten treten können, und welche anderen Arten von Handlungseffekten sich im Bezug auf das Lernen motorischer Sequenzen als nützlich erweisen könnten.

Um den Bogen zurück zum Beginn dieser Arbeit zu schlagen: Die berichteten Ergebnisse zeigen, dass die Effekte, und damit üblicherweise auch die Ziele unseres willkürlichen Verhaltens eine zentrale Rolle nicht nur bei der Auswahl, sondern auch bei der Initiierung und Ausführung von Bewegungen sowie bei der Verkettung zu effektiven Bewegungsfolgen spielen. Konvergierende Evidenz für diese Interpretation kommt auch aus der funktionalen Hirnforschung: Bangert, Parlitz und Altenmüller (1998) konnten beispielsweise zeigen, dass sowohl bei geübten Pianisten als auch bei Anfängern nach kurzer Trainingszeit stets motorische und sensorische kortikale Regionen gemeinsam aktiviert sind, unabhängig davon, ob die Versuchspersonen Tonsequenzen hören, oder sie auf einem normalen oder sogar einem stummgeschalteten Klavier spielen. Bei den Anfängern zeigte sich diese Ko-Aktivierung allerdings nur dann, wenn sie in ihren Trainingssitzungen kontingente Tasten-Ton-Beziehungen erlebt hatten, bei stets zufälliger Tasten-Ton-Verknüpfung entwickelte sich keine sensorische Ko-Aktivierung – ein Ergebnis, das sehr gut mit der hier dargestellten Interpretation von Experiment 1 übereinstimmt. Die enge Verzahnung motorischer und sensorischer Aktivierung bei kontingenten Effekten steht im Einklang mit den hier vertretenen Vorstellungen über eine ideomotorische Repräsentation von Bewegungssequenzen. Traditionelle theoretische Vorstellungen über motorische Programmierung und motorisches Lernen sind im Lichte dieser Ergebnisse wenn nicht falsch, so doch zumindest unvollständig. Unsere Erwartungen über die sensorischen Konsequenzen unserer Handlungen sind aufs engste mit der Steuerung unseres motorischen Apparates verknüpft, und zwar nicht nur als Feedback zur Ergebniskontrolle, sondern auch bei der Vorbereitung und dem Abarbeiten motorischer Programme. Zukünftige theoretische Konzeptionen zur Motoriksteuerung und zum motorischen Lernen sollten der zentralen Bedeutung sensorisch repräsentierter Verhaltensziele Rechnung tragen.

4. Literaturverzeichnis

- Adams, J. A., Marshall, P. H., & Bray, N. W. (1971). Closed-loop theory and long-term retention. *Journal of Experimental Psychology*, *90* (2), 242-250.
- Attneave, F. (1974). *Informationstheorie in der Psychologie*. Bern: Huber.
- Baddeley, A. G., & Hitch, G. J. (1974). Working Memory. In Bower, G. (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 8, S. 47-90). San Diego, CA: Academic Press.
- Bangert, M., Parlitz, D., & Altenmüller, E. O. (1998). Audio-motor integration in beginner and expert pianists: A combined DC-EEG and behavioural study. In Elsner, N. & Wehner, R. (Hrsg.), *The Göttingen Neurobiology Report II*. Stuttgart: Thieme.
- Barber, P. & O'Leary, M. (1997). The Relevance of Salience: Towards an activational Account of Irrelevant Stimulus-Response Compatibility Effekts. In Hommel, B. & Prinz, W. (Hrsg.), *Advances in Psychology: Theoretical Issues in Stimulus-Response Compatibility* (S. 135-172). Amsterdam: Elsevier.
- Bernstein, N. A. (1947). [Über die Ausbildung von Bewegungen]. Auf Russisch erschienen beim Staatsverlag für Medizinische Literatur (Medgiz).
- Berry, D. C., & Broadbend, D. E. (1984). On the relationship between task performance and associated verbalizable knowledge. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, *36A*(2), 209-231.
- Buffart, H. & Leeuwenberg, E. (1983). Structural information theory. In Geissler, H. G., Buffart, E., Leeuwenberg, E., & Sarris, V. (Hrsg.), *Modern issues in perception* (S. 48-74). Amsterdam: North Holland.
- Cleeremans, A., & McClelland, J. L. (1991). Learning the structure of event sequences. *Journal of Experimental Psychology: General*, *120*(3) 235-253.
- Cohen, A., & Curran, T. (1993). On tasks, knowledge, correlations, and dissociations: Comment on Perruchet and Amorim (1992). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*(6) 1431-1437.
- Cohen, A., Ivry, R. I., & Keele, S. W. (1990). Attention and structure in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*(1) 17-30.
- Darwin, C. J., Turvey, M. T., & Crowder, R. G. (1972). An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: Evidence for brief auditory storage. *Cognitive Psychology*, *3*, 255-267.
- Destrebecqz, A., & Cleeremans, A. (2001). Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure. *Psychonomic Bulletin & Review*, *8* (2), 343-350.
- Fendrich, D. W., Healy, A. F., & Bourne, L. E. (1991). Long-term repetition effects for motoric and perceptual procedures. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *17*(1) 137-151.
- Fias, W. (2001). Two routes for the processing of verbal numbers: Evidence from the SNARC effect. *Psychological Research*, *65*(4), 250-259.
- Frensch, P. A., Buchner, A., & Lin, J. (1994). Implicit learning of unique and ambiguous serial transitions in the presence and absence of a distractor task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*(3) 567-584.

- Frensch, P. A., & Miner, C. S. (1995). Zur Rolle des Arbeitsgedächtnisses beim impliziten Sequenzlernen. / The role of working memory in implicit sequence learning. *Zeitschrift fuer Experimentelle Psychologie*, 42(4) 545-575.
- Goschke, T. (1998). Implicit learning of perceptual and motor sequences: Evidence for independent learning systems. In Stadler, M. A., Frensch, P. A., & et al. (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 401-444). Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications.
- Goschke, T., Friederici, A. D., & Kotz, S. A. (2001). Procedural learning in Broca's aphasia: Dissociation between the implicit acquisition of spatio-motor and phoneme sequences. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(3), 3703-88.
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, 1970; 77(2) 73-99.
- Grosjean, M., Rosenbaum, D. A., & and Elsinger, C. (2001). Timing and Reaction Time. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130 (2), 256-272.
- Hazeltine, E. (2002). The representational nature of sequence learning: Evidence for goal-based codes. In Prinz, W. & Hommel, B. (Hrsg.), *Common Mechanisms in Perception and Action - Attention and Performance Volume XIX* (S. 673-689). Oxford: University Press.
- Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly of the American Association for Health, Physical Education, & Recreation*, 31, 448-458.
- Hoffmann, J., & Koch, I. (1998). Implicit learning of loosely defined structures. In Stadler, M. A., Frensch, P. A., & et al. (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 161-199). Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications.
- Hoffmann, J., & Sebal, A. (1996). Reiz- und Reaktionsmuster in seriellen Wahlreaktionen. / Stimulus patterns and reaction patterns in serial choice-reaction tasks. *Zeitschrift fuer Experimentelle Psychologie*, 43(1) 40-68.
- Hoffmann, J., Sebal, A., & Stöcker, C. (2001). Irrelevant response effects improve serial learning in Serial Reaction Time tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27(2) 470-482.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, 55(4) 270-279.
- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, 59(3) 176-186.
- Howard, J. H., Mutter, S. A., & Howard, D. V. (1992). Serial pattern learning by event observation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(5) 1029-1039.
- Hunt, R. H., & Aslin, R. N. (2001). Statistical Learning in a Serial Reaction Time Task: Access to Seperable Statistical Cues by Individual Learners. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130 (4), 658-680.
- James, W. (1981). *The principles of psychology* (Bd. Vol. II). Cambridge, MA: Harvard University Press (orig. 1890).
- Jimenez, L., Mendez, C., & Cleeremans, A. (1996). Comparing direct and indirect measures of sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(4) 948-969.
- Keele, S., Ivry, R., Hazeltine, E., Mayr, U., & Heuer, H. (1998). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Technical Report 98-03, University of Oregon*.

- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.
- Keele, S. W. & Jennings, P. J. (1992). Attention in the representation of sequence: Experiment and theory. *Human Movement Science Special Issue: Sequencing and timing of human movement*, 11(1-2), 125-138.
- Keele, S. W., Jennings, P., Jones, S., Caulton, D., & et al. (1995). On the modularity of sequence representation. *Journal of Motor Behavior*, 27(1) 17-30.
- Keele, S. W., Jennings, P., & Jones, S., Caulton, D., & Cohen, A. (1995). On the modularity of sequence representation. *Journal of Motor Behavior*, 27(1), 17-30.
- Kelly, S. W., & Burton, A. M. (2001). Learning complex sequences: No role for observation? *Psychological Research*, 65(1), 15-23.
- Klapp, S. T. (1977). Response programming, as assessed by reaction time, does not establish commands for particular muscles. *Journal of Motor Behavior*, 9(4) 301-312.
- Klapp, S. T. (1995). Motor response programming during simple choice reaction time: The role of practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5) 1015-1027.
- Klapp, S. T. (1996). Reaction time analysis of central motor control. In Zelaznik, H. N. (Hrsg.), *Advances in motor learning and control* (S. 13-35). Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). The role of stimulus-based and response-based spatial information in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26 (4), 863-882.
- Kornblum, S. (1992). Dimensional overlap and dimensional relevance in stimulus-response and stimulus-stimulus compatibility. In Stelmach, G. E., Requin, J. , & et al. (Hrsg.), *Tutorials in motor behavior, 2. Advances in psychology, Vol. 87* (S. 743-777).
- Kunde, W. (im Druck). Temporal response-effect compatibility. *Psychological Research*.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 27(2), 387-394.
- Lewicki, P., Czyzewska, M., & Hoffman, H. (1987). Unconscious acquisition of complex procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13(4) 523-530.
- Lotze, R. H. (1852). *Medizinische Psychologie oder die Physiologie der Seele*. Leipzig: Waldmann'sche Buchhandlung.
- Mayr, U. (1996). Spatial attention and implicit sequence learning: Evidence for independent learning of spatial and nonspatial sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(2) 350-364.
- McKay, D. G. (1982). The problem of flexibility and fluency in skilled behavior. *Psychological Review*, 89, 483-506.
- Nattkemper, D., & Prinz, W. (1997). Stimulus and response anticipation in a serial reaction task. *Psychological Research*, 60(1-2) 98-112.
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19(1) 1-32.
- Öhmann, A., and Soares, J. J. F. (1998). Emotional Conditioning to MAsked Simuli: Expectancies for Aversive Outcomes Following Nonrecognized Fear-Relevant Stimuli. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 69-82.

- Perruchet, P., & Amorim, M. A. (1992). Conscious knowledge and changes in performance in sequence learning: Evidence against dissociation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*(4) 785-800.
- Rah, S. K., & Reber, A. S. (2000). Another wrinkle on the dual-task SRT experiment: It's probably not dual task. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7* (2), 309-313.
- Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *6*, 855-863.
- Reber, A. S. (1969). Transfer of syntactic structure in synthetic languages. *Journal of Experimental Psychology*, *81*(1), 115-119.
- Reber, A. S. (1976). Implicit learning of synthetic languages: The role of instructional set. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *2*(1), 88-94.
- Reed, J., & Johnson, P. (1994). Assessing implicit learning with indirect tests: Determining what is learned about sequence structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*(3) 585-594.
- Remillard, G., & Clark, J. M. (2001). Implicit learning of first-, second-, and third-order transition probabilities. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *27* (2), 483-498.
- Rose, D. J. (1988). Choosing between-movement sequences: Effect of response-choice similarity on the underlying programming operations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(4) 638-645.
- Rosenbaum, D. A., Inhoff, A. W., & Gordon, A. M. (1984). Choosing between movement sequences: A hierarchical editor model. *Journal of Experimental Psychology: General*, *113*(3) 372-393.
- Rosenbaum, D. A., Kenny, S. B., & Derr, M. A. (1983). Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *9*(1) 86-102.
- Rüsseler, J., & Roesler, F. (2000). Implicit and explicit learning of event sequences: Evidence for distinct coding of perceptual and motor representations. *Acta Psychologica*, *104*(1), 45-67.
- Schmidtke, V., & Heuer, H. (1997). Task integration as a factor in secondary-task effects on sequence learning. *Psychological Research*, *60*(1-2) 53-71.
- Seligman, M. E., & Hager, J. L. (1972). *Biological boundaries of learning*. East Norwalk, CT, US: Appleton-Century-Crofts.
- Semjen, A., & Gottsdanker, R. (1990). *Rapid serial movements: Relation between the planning of sequential structure and effector selection* (1990). Attention and performance 13: Motor representation and control (S. 409-427). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates.
- Shanks, D. R., & Lovibond, P. F. (2002). The role of awareness in Pavlovian conditioning: Empirical evidence and theoretical implications. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *28*(1), 3-26.
- Shanks, D. R., & St. John, M. F. (1994). Characteristics of dissociable human learning systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *17*(3) 367-447.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Champaign, IL: University of Illinois Press.
- Simon, J. R., & Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, *51*, 300-304.

- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs*, 74.
- Stadler, M. A. (1992). Statistical structure and implicit serial learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(2) 318-327.
- Stadler, M. A. (1993). Implicit serial learning: Questions inspired by Hebb (1961). *Memory and Cognition*, 21(6) 819-827.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 1969; 30 276-315.
- Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R. L., & Wright, C. E. (1978). The latency and duration of rapid movement sequences: Comparisons of speech and typewriting. In G. E. Stelmach (Hrsg.), *Information processing in motor control and learning* (S. 117-152). New York: Academic Press.
- Verwey, W. B. (1999). Evidence for a multistage model of practice in a sequential movement task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25 (6), 1693-1708.
- Verwey, W. B. (2001). Concatenating familiar movement sequences: The versatile cognitive processor. *Acta Psychologica*, 106(1-2), 69-95.
- Willingham, D. B., Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1989). On the development of procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(6) 1047-1060.
- Willingham, D. B., Wells, L. A., Farrell, J. M., & Stemwedel, M. E. (2000). Implicit motor sequence learning is represented in response locations. *Memory and Cognition*, 28(3), 366-375.
- Willingham, D. B. (1999). Implicit motor sequence learning is not purely perceptual. *Memory and Cognition*, 27(3) 561-572.
- Wulf, G., & Lee, T. D. (1993). Contextual interference in movements of the same class: Differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behavior*, 25(4) 254-263.
- Wulf, G., Schmidt, R. A., & Deubel, H. (1993). Reduced feedback frequency enhances generalized motor program learning but not parameterization learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(5) 1134-1150.
- Zießler, M. (1995). *Die Einheit von Wahrnehmung und Motorik*. Frankfurt am Main: Peter Lang.
- Zießler, M. (1998). Response-effect learning as a major component of implicit serial learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(4) 962-978.
- Zießler, M., Hänel, K., & Hoffmann, J. (1988). Die Programmierung struktureller Eigenschaften von Bewegungsfolgen. / Programming of the structural characteristics of movement sequences. *Zeitschrift fuer Psychologie*, 196(4) 371-388.
- Zießler, M., & Nattkemper, D. (2001). Learning of event sequences is based on response-effect learning: Further evidence from a serial reaction task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 27(3), 595-613.

Lebenslauf

Persönliche Informationen

- Name: Christian Stöcker
- Familienstand: Ledig
- Nationalität: Deutsch
- Alter: 30 Jahre
- Geburtsort: Würzburg
- Eltern: Dipl. Psych. Ingeborg Stöcker, geb. Menzler und Prof. Gerhard Stöcker

Ausbildung

- September 1979 bis Juli 1983 Goethe-Grundschule Würzburg
- September 1983 bis Juli 1992 Siebold-Gymnasium Würzburg; Abschluss: Abitur,
Notendurchschnitt 1,2
- Oktober 1992 bis August 1998 Studium der Psychologie an der Julius-Maximilians-
Universität Würzburg; Abschluss: Diplom, Gesamtnote „sehr gut“
- September 1995 bis Juli 1996 Auslandsjahr an der University of Bristol, Großbritannien

Berufserfahrung

Seit November 1998 Mitarbeiter des Lehrstuhls Psychologie III der Universität Würzburg