

Effekte im Flaschenhals:  
Prozesse der Handlungsselektion  
aus ideomotorischer Perspektive

Dissertation

zur Erlangung des  
Doktorgrades der Philosophie (Dr. phil.)

vorgelegt

der Philosophischen Fakultät der Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg,  
Fachbereich Philosophische Fakultät I

von

Herrn Marko Paelecke

geb. am 14.11.1975 in Halle (Saale)

Gutachter:

Prof. Josef Lukas, Halle

Prof. Wilfried Kunde, Dortmund

Tag der Verteidigung: 08. Mai 2009



# Vorwort

Die in dieser Arbeit berichteten Experimente fanden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Die (Rück)Wirkung von Aktionseffekten auf die Aktionsgenerierung“ (HO 1301/6-1,2) statt. Antragsteller waren Prof. Dr. Joachim Hoffmann und Prof. Dr. Wilfried Kunde. Die Versuche wurden am Institut für Psychologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg durchgeführt.

Es ist mir eine Freude, an dieser Stelle öffentlich denen danken zu können, die meine Arbeit gefördert haben: vor allem meinem Betreuer Prof. Dr. Wilfried Kunde, ohne dessen unermüdliche Hilfe mit Rat und Tat ich diese Untersuchung nicht hätte durchführen können. Er hat mir nicht nur gestattet, die Experimente im Rahmen des DFG-Projektes durchzuführen und damit die Arbeit im vorliegenden Umfang erst ermöglicht, er hat mir auch durch beständige inhaltliche Anregung, allzeitige fachliche Anleitung sowie unermüdliche Diskussion einzelner Ergebnisse die experimentelle Kognitionsforschung nahe gebracht. Prof. Dr. Josef Lukas danke ich dafür, dass er sich bereit erklärt hat, die Begutachtung der vorliegenden Arbeit zu übernehmen.

Für das Gelingen dieser Arbeit zolle ich außerdem einer Reihe von Personen besonderen Dank: An der Umsetzung der Experimente und der Testung von Vorversionen waren Vladimir Lichev, Andre Spitaler und Sascha Szott beteiligt. Wesentliche Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und Erhebung der Daten leisteten Katrin Bittrich, Henrike Krauss, Franziska Land-

graf, Christine Möttig, Paula Schicktanz, Heike Schilbach, Stefanie Steinbiß und Katrin Zaltauskas. Allen weiteren Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe, Freunden und Kollegen am Institut danke ich für die Arbeitsatmosphäre, angenehme Zeit und für die großen und kleinen Hilfen.

Schliesslich gilt mein besonderer, tiefster Dank meiner Frau Yvonne. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nie fertiggestellt worden.

Halle, im Herbst 2008

Marko Paelecke

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Theoretischer Teil</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Handlungsselektion aus ideomotorischer Perspektive</b>	<b>7</b>
2.1	Effektkodes und Modelle antizipativer Handlungssteuerung	10
2.2	Empirische Evidenz für die ideomotorische Hypothese . . .	14
2.2.1	Einfluss wahrgenommener Handlungseffekte auf die Handlungssteuerung . . . . .	15
2.2.2	Einfluss antizipierter Handlungseffekte auf die Handlungssteuerung . . . . .	19
2.2.3	Charakteristika antizipierter Handlungseffekte . . .	23
2.3	Offene Fragen . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Effektkodeaktivierung und der Reaktionsauswahl-Flaschenhals</b>	<b>31</b>
3.1	Bisherige Arbeiten . . . . .	32
3.2	Das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode . . .	34
3.2.1	Reaktionsauswahl als Flaschenhals . . . . .	36
3.2.2	Modelle gradueller Ressourcen-Aufteilung . . . . .	37
3.2.3	Zwei-Prozess-Modelle der Reaktionsauswahl . . . . .	40
3.3	Lokalisierung experimenteller Faktoren . . . . .	42

3.3.1	Cross-task Kompatibilitätseffekte . . . . .	44
3.3.2	Locus-of-slack Prozedur . . . . .	47
3.3.3	Effect-propagation Prozedur . . . . .	49
<b>II</b>	<b>Empirischer Teil</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>Überblick über den Experimentalteil</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Antizipierte Effekte</b>	<b>57</b>
5.1	Experiment 1 . . . . .	57
5.1.1	Methoden . . . . .	59
5.1.2	Ergebnisse . . . . .	62
5.1.3	Diskussion . . . . .	64
5.2	Experiment 2 . . . . .	65
5.2.1	Methoden . . . . .	66
5.2.2	Ergebnisse . . . . .	68
5.2.3	Diskussion . . . . .	71
5.3	Experiment 3 . . . . .	72
5.3.1	Methoden . . . . .	73
5.3.2	Ergebnisse . . . . .	76
5.3.3	Diskussion . . . . .	78
5.4	Experiment 4 . . . . .	79
5.4.1	Methoden . . . . .	80
5.4.2	Ergebnisse . . . . .	82
5.4.3	Diskussion . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Induzierte Effekte</b>	<b>87</b>
6.1	Experiment 5 . . . . .	87
6.1.1	Methoden . . . . .	89
6.1.2	Ergebnisse . . . . .	92
6.1.3	Diskussion . . . . .	95

---

6.2	Experiment 6 . . . . .	98
6.2.1	Methoden . . . . .	99
6.2.2	Ergebnisse . . . . .	102
6.2.3	Diskussion . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Intendierte Effekte</b>	<b>107</b>
7.1	Experiment 7 . . . . .	107
7.1.1	Methoden . . . . .	114
7.1.2	Ergebnisse . . . . .	117
7.1.3	Diskussion . . . . .	120
<b>III</b>	<b>Abschlussdiskussion</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Integration der Befunde</b>	<b>127</b>
8.1	Theoretischer Teil . . . . .	128
8.2	Empirischer Teil . . . . .	131
<b>9</b>	<b>Implikationen für Modelle effektbasierter Handlungsauswahl</b>	<b>141</b>
9.1	Der Zeitverlauf der Effektkodeaktivierung . . . . .	142
9.2	Die Interaktion endogener und exogener Effektkodeaktivierung . . . . .	148
<b>10</b>	<b>Ausblick</b>	<b>153</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>





# Kapitel 1

## Einleitung

Das Thema der vorliegenden Arbeit sind die mentalen Vorgänge, die der Selektion von Handlungen dienen. Die im Folgenden vorgestellten theoretischen Überlegungen und die darauf aufbauende empirische Studie zielten auf die Beantwortung der Frage ab, zu welchem Zeitpunkt in der Handlungsplanung Zielvorstellungen von Bedeutung sind. Insbesondere sollte geprüft werden, inwieweit die Antizipation von Handlungseffekten Teil eines Prozesses ist, der in der kognitiven Psychologie üblicherweise mit Reaktionsauswahl bezeichnet wird.

Sowohl die Fragestellung als auch die empirische Herangehensweise ergaben sich aus der Verbindung zweier verschiedener Forschungstraditionen, des Informationsverarbeitungsansatzes auf der einen und der ideomotorischen Hypothese auf der anderen Seite. Während der in der kognitiven Psychologie vorherrschende Informationsverarbeitungsansatz in den letzten 30 Jahren detaillierte Befunde zur Makro- und Mikrostruktur funktional handlungsleitender Prozesse erbracht hat, akkumulierten in letzter Zeit zahlreiche, von der ideomotorischen Hypothese stimulierte Studien Hinweise auf die Natur der beteiligten Repräsentationen. Beide Ansätze liefern den theoretischen Rahmen für die vorliegende Arbeit; sie steuern jedoch nicht nur Annahmen zu den an der Handlungssteuerung beteiligten Prozessen

und Repräsentationen bei, sondern auch zu ihren jeweiligen Paradigmen.

Obwohl die Zielsetzung dieser Arbeit in der Beantwortung einer sich aus theoretischen Überlegungen ergebenden und abstrakt formulierten Frage liegt, fällt die Bestimmung des Untersuchungsgegenstandes womöglich leichter, wenn man sich zunächst einen Eindruck der empirischen Herangehensweise der vorliegenden Arbeit verschafft:

*Kompatibilitätseffekte* zwischen Handlungen und ihren Konsequenzen kennt jeder aus dem täglichen Leben. Ein geläufiges Beispiel ist ein normaler Küchenherd, welcher typischerweise über mehrere Brenner verfügt. Diese sind in der Regel in einem Viereck angeordnet, werden aber oft über Schalter bedient, die in einer horizontalen Linie angeordnet sind. Eine solche Anordnung führt jedoch dazu, dass der relative Ort der Handlung (die Betätigung des Schalters) nicht mit dem Ort des gewünschten Effekts (der zu erzeugenden Flamme) korrespondiert. Die Folgen einer solchen abstrakten Zuordnungsregel sind jedem bekannt: Sie muss mühsam gelernt werden und führt oft zu Bedienungsfehlern. In Wahlreaktionsaufgaben präzisieren Manipulationen dieser Zuordnungsregeln und der daraus resultierenden „Kompatibilität“ von Handlungen und Effekten signifikant Geschwindigkeit und Genauigkeit der Aufgabenbearbeitung.

Die in allen Experimenten verwendeten *Doppelaufgaben* haben ebenso offensichtliche Analogien im Alltag. Mehr oder weniger zeitgleich signalisieren unterschiedliche Stimuli mehrere erforderliche Reaktionen, die noch dazu unter hohem Zeitdruck zu erfolgen haben. Die zu beobachtenden Leistungseinbußen sind innerhalb der kognitiven Psychologie seit langem bekannt und entsprechend gut untersucht. Durch die erfolgte theoretische Unterfütterung haben sich Doppelaufgaben zu einem methodisch elaborierten Paradigma entwickelt, innerhalb dessen Prozessannahmen spezifisch überprüft werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurden nun beide Paradigmen kombiniert: Die in den Doppelaufgaben zu beobachtenden Leistungseinbußen dienen der relativen zeitlichen Verortung von Kompatibilitätseffekten von Handlungen und ihren Effekten. Dies ermöglicht letztlich die funktionale Erklärung

der beobachteten Kompatibilitätseffekte im Sinne einer Beeinflussung spezifischer Prozesse der Handlungsauswahl.

Im theoretischen Teil wird zunächst die ideomotorische Hypothese vorgestellt und ein Überblick über relevante empirischen Arbeiten zu den Kernannahmen gegeben. Im darauf folgenden Kapitel wird die Fragestellung expliziert und es werden bisherige Arbeiten vorgestellt. Weiterhin wird das gewählte Paradigma der psychologischen Refraktärperiode zusammen mit dominierenden Erklärungsmodellen eingeführt. Deren Kenntnis ist Voraussetzung für das Verständnis der verwendeten experimentellen Prozeduren, die im Anschluss vorgestellt werden.

Im empirischen Teil werden insgesamt sieben Experimente berichtet, welche alle auf dem Paradigma der psychologischen Refraktärperiode beruhen. Diese unterschieden sich grundlegend in hinsichtlich des Zeitpunkts der Effektpräsentation. In den Experimenten 1–4 erfolgte die Präsentation der Handlungseffekte immer erst nach begonnener Reaktionsausführung; in den Experimenten 5–7 hingegen wurden die Handlungseffekte zusätzlich perzeptuell stimuliert.

In der abschließenden Diskussion werden die empirischen Befunde der Arbeit integriert sowie hinsichtlich ihrer Implikationen für Modelle effektbasierter Handlungssteuerung diskutiert. Darüber hinaus werden im Ausblick Vorschläge für die weitere wechselseitige Anbindung der beiden Forschungsrichtungen, des Informationsverarbeitungsansatzes und der ideomotorischen Hypothese, gegeben.



# **Teil I**

## **Theoretischer Teil**



## Kapitel 2

# Handlungsselektion aus ideomotorischer Perspektive

Heute, 40 Jahre nach Neissers *Cognitive Psychology* (1967), genießt der kognitive Ansatz breite Anerkennung innerhalb der Psychologie. Auch die Forschung zur Handlungsselektion wird von Theorien der Informationsverarbeitung dominiert. Hinsichtlich der zentralen Frage nach den mentalen Zuständen, die intentionalen Handlungen vorausgehen, wird von einer Abfolge von Verarbeitungsprozessen ausgegangen, welche eingehende Informationen nach verborgenen Regeln verarbeiten und letztendlich in der Auswahl und Initiierung einer beobachtbaren Reaktion münden (Sanders, 1980, 1990, 1998; Massaro, 1990; Welford, 1968).

Die von Modellen der Informationsverarbeitung postulierten *Prozesse* lassen sich dabei anhand ihrer Verarbeitungsrichtung in zwei funktional unterschiedliche Klassen einteilen: Afferente („aufsteigende“) Wahrnehmungsprozesse dienen der Verarbeitung der gegebenen äußeren Reizverhältnisse. Nach der Identifizierung des Perzepts folgen efferente („absteigende“) Handlungsprozesse, die der Vorbereitung der motorischen Reaktion dienen (vgl. Sanders, 1990, 1998). Die Reaktionsauswahl dient, wie der Name nahe legt, der Auswahl einer dem identifizierten Stimulus angemessenen oder explizit

zugeordneten Reaktion aus einer Menge von Reaktionsmöglichkeiten; das Ergebnis, ein zunächst noch abstrakt kodiertes Handlungsziel, wird an die Stufe der Reaktionsprogrammierung weitergeleitet. Hier werden Merkmale der auszuführenden Reaktion festgelegt und in ein motorisches Programm kodiert. Schließlich folgen nach erfolgreicher Übersetzung der motorischen Kommandos in Muskelaktivität noch Prozesse der Ausführungsanpassung.

Die funktionale Trennung in Wahrnehmungs- und Handlungsprozesse spiegelt sich in der Annahme qualitativ unterschiedlicher *Repräsentationen* wieder: Auf der afferenten Seite finden sich perzeptuelle Codes, die physische Eigenschaften der Reize bzw. der Umwelt mehr oder weniger anschaulich repräsentieren (siehe hierzu auch Pylyshyn, 2002). Auf der efferenten Seite der Handlungsauswahl finden sich dagegen ausschließlich abstrakte Codes in Form motorischer Kommandos (Keele, 1968), Parameter (Rosenbaum, 1980) oder Programme (Schmidt, 1975), welche direkt die Aktivierung der Muskeln steuern sollen. Der Übergang zwischen beiden Repräsentationsformen erfolgt in der zentralen Stufe der Reaktionsauswahl, in der die sensorischen Information durch (oft nicht näher spezifizierte) Vermittlungsprozesse in motorische Kommandos „übersetzt“ werden müssen. Hier wird die grundsätzliche Verwurzelung informationsverarbeitender Ansätze in S-R theoretischen Konzeptionen erkennbar.

Hinsichtlich der Frage, welche Repräsentationen der Handlungssteuerung zugrunde liegen, basiert die vorliegende Arbeit jedoch auf einer grundlegend verschiedenen theoretischen Vorstellung. Ausgehend von der ideomotorischen Hypothese wird angenommen, dass die efferente Seite der Handlungssteuerung ebenfalls auf sensorischen Repräsentationen beruht, genauer gesagt den Repräsentationen der sensorischen Konsequenzen der efferenten Motorkommandos. Nun führen die meisten unserer Handlungen in irgendeiner Form zu wahrnehmbaren Veränderungen unserer Umwelt. Daher liegt es nahe, dass die sensorischen Repräsentationen dieser Handlungseffekte auch an den kognitiven Prozessen der Handlungssteuerung beteiligt sind. In traditionellen Modellen der Handlungssteuerung spielen Handlungseffekte jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Beispielsweise die-



nen im Reafferenzprinzip Abweichungen von antizipierten Effekten der Stabilisierung der Wahrnehmung (Holst & Mittelstaedt, 1950); in *Closed-loop* Modellen ermöglichen antizipierte Handlungseffekte die Kontrolle der Handlungsausführung (Adams, 1971).

Der ideomotorische Ansatz schreibt Handlungseffekten dagegen eine weitaus bedeutendere Rolle in der Handlungsselektion zu. Handlungen sind demnach ausschließlich in Form ihrer sensorisch erfahrbaren Konsequenzen repräsentiert. Aus dieser Perspektive ergibt sich letztlich keine Möglichkeit der Handlungsauswahl bzw. -initiation, die ohne eine Aktivierung dieser Repräsentationen auskommt. Diese Annahmen hinsichtlich der Repräsentation und Auswahl von Handlungen finden sich sowohl in historischen als auch in zeitgenössischen Theorien der Handlungssteuerung wieder (Greenwald, 1970c; Hoffmann, 1993; Hommel, 1996; Hommel, Müsseler, Aschersleben & Prinz, 2001; James, 1890; Lotze, 1852; Prinz, 1987).

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Historie der ideomotorischen Hypothese geben (für eine umfangreiche Darstellung siehe Stock & Stock, 2004). Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit der Frage nach empirischer Evidenz hinsichtlich der Kernannahme der ideomotorischen Hypothese, dass die Antizipation sensorischer Handlungseffekte notwendig und hinreichend ist, um Handlungen hervorzubringen, die vorhersehbar genau diese sensorischen Konsequenzen haben. Der Schwerpunkt liegt auf Kompatibilitätseffekten zwischen Handlungen und distalen Effekten, die in Wahlreaktionsaufgaben entweder den Handlungen zeitlich vorausgehen oder ihnen folgen. Weiterhin werden Studien berichtet, die anhand dieser Paradigmen verschiedene Charakteristika effektbasierter Handlungsrepräsentationen isolieren konnten.

## 2.1 Effektkodes und Modelle antizipativer Handlungssteuerung

Intentionales Handeln impliziert, dass wir über Kenntnis der Konsequenzen unserer Handlungen verfügen. Ohne diese müssten wir darauf vertrauen, dass alle unsere Handlungen per Zufall zu den von uns gewünschten Effekten führen. *Prima facie* muss die Steuerung zielgerichteten Verhaltens das Wissen über die Effekte unserer Bewegungen in irgendeiner Form berücksichtigen.

Dieser Gedanke ist am konsequentesten in Modellen antizipatorischer Handlungssteuerung umgesetzt, die auf dem ideomotorischen Prinzip basieren. Dieses ist in seinen Annahmen deutlich radikaler als andere Modelle der Handlungssteuerung. Auf repräsentationaler Ebene werden hier die Handlungsziele nicht von den dazu erforderlichen Bewegungen separiert. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass Handlungen ausschließlich in Form ihrer zu erzielenden sensorischen Effekte kodiert sind; willkürliche Körperbewegungen sind entsprechend ausschließlich über Codes ihrer Effekte aufrufbar. Die kodierten sensorischen Effekte einer Bewegung können dabei sehr unmittelbar, proximal und körperbezogen sein, wie beispielsweise die propriozeptive Rückmeldung des Druckgefühls am Finger beim Drücken eines Schalters. Sie können aber auch distaler Natur, körperfern und umweltbezogen sein, wie beispielsweise das Aufleuchten des Lichts, wenn der Finger einen Lichtschalter betätigt. In jedem Fall sind die Repräsentationen der zu erzielenden Effekte prinzipiell unabdingbar für die Auswahl und Initiierung einer Handlung. Ebenso ist jede willentliche Bewegung, und sei es ein simpler Tastendruck, von Beginn an eine zielorientierte Handlung.

Antizipatorische Handlungssteuerung auf der Basis von Effektkodes wäre jedoch nicht möglich, wenn diese nicht mit denjenigen motorischen Kommandos verknüpft wären, die letztendlich die Bewegungen hervorrufen. Willentliche Verhaltenssteuerung ist demnach ein mindestens zweistufiger Prozess: Zunächst ist Kenntnis darüber erforderlich, welche Effekte mit welchen Handlungen erzielt werden können. Dazu wird in der Regel ein

automatischer Lernmechanismus angenommen; alle efferenten Muskelkommandos werden automatisch mit den wahrgenommenen Bewegungseffekten assoziiert. Wesentlich ist dabei, dass es sich um bidirektionale Assoziationen handelt, welche durch Erfahrung stabilisiert werden. Konstituierend für die Initiierung einer Handlung ist die Umkehrung dieser in der Lernphase gegebenen Kausalbeziehung: Während in der Lernphase motorische Efferenzen den sensorischen Afferenzen vorausgehen, geht bei der Initiierung einer gewollten Handlung die Aktivierung der Repräsentationen der Handlungseffekte der Aktivierung der damit assoziierten Muskelkommandos voraus. Die Antizipation der sensorischen Effekte wird somit zur kausalen Ursache, zum mentalen Ausgangspunkt, für die Ausführung einer Handlung, welche wiederum den gewünschten Handlungseffekt hervorbringt.

Die wissenschaftlichen Ursprünge des ideomotorischen Prinzips reichen mehr als 150 Jahre zurück. Bereits frühzeitig waren Psychologen an der Frage interessiert, wie Intentionen korrespondierende Handlungen hervorrufen, welche wiederum die Intentionen in die Tat umsetzen. In diesem Zusammenhang wird üblicherweise auf William James' Kapitel über den Willen in seinen *Principles of Psychology* (1890) verwiesen. James fasste seine introspektiven Beobachtungen in folgendem berühmten Grundsatz zusammen (S. 1112):

An anticipatory image, then, of the sensorial consequences of a movement, plus (on certain occasions) the fiat that these consequences shall become actual, is the only psychic state which introspection lets us discern as the forerunner of our voluntary acts.

James (1890) hat sicherlich das ideomotorische Prinzip popularisiert und auch radikaler formuliert, aber er war nicht dessen Begründer. Den Begriff „ideomotor“ übernahm er von Carpenter (1852), welcher damit ursprünglich Bewegungen bezeichnete, die mehr oder weniger automatisch ausgeführt wurden. Carpenter postulierte ausdrücklich, dass diese Handlungen ohne

willentlichen Impuls zustande kommen und einzig und allein durch eine Kette von Gedanken ausgelöst werden (Prinz, 1987). Die Grundlage seiner Theorie der Handlungssteuerung hatte James aus Überlegungen abgeleitet, die zuvor von Lotze (1852) und anderen formuliert wurden (Stock & Stock, 2004). In *Medizinische Psychologie* hatte Lotze für seine Zeit sehr elaboriert beschrieben, wie Handlungen repräsentiert sind und initiiert werden; nach Lotze ist Handlungssteuerung nur mittelbar: Intendierte Handlungen werden durch die Aktivierung ihrer früheren mentalen Antezedenzen initiiert, worauf das motorische System mit exakt denselben Handlungen reagiert. Das Phänomen willentlicher Handlungen *ohne* bewusste Kontrolle der ausführenden Mechanismen wird durch die (Wieder-)Herstellung jener psychischen Zustände ermöglicht, an die das motorische System fest gebunden ist.

Es wäre zu erwarten gewesen, dass diese Überlegungen als Ausgangspunkt einer weitergehenden theoretischen und vor allem empirischen Entwicklung des ideomotorischen Prinzips dienen (die handlungsinitiierende Funktion von Zielvorstellungen wurde zunächst nur auf der Basis introspektiver Beobachtungen postuliert). Dies war jedoch nicht der Fall. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts geriet das ideomotorische Prinzip unter der Dominanz von Behaviorismus und Gestaltpsychologie nahezu in Vergessenheit (Stock & Stock, 2004). Antizipierte Handlungseffekte waren zwar weiterhin Bestandteil in Theorien der Handlungssteuerung, beispielsweise zur Kontrolle der Bewegungsausführung in *Closed-loop* Modellen (für einen umfangreichen Überblick siehe Hommel, 1998b); sie „verloren“ jedoch für lange Zeit die Fähigkeit, Handlungen direkt aufzurufen.

Eine Weiterentwicklung des ideomotorischen Prinzips, vor allem hinsichtlich der empirischen Prüfbarkeit, begann erst 80 Jahre nach James. So verglich Greenwald (1970c) in einem Überblicksartikel eine aktualisierte Version des ideomotorischen Prinzips mit anderen Theorien der Handlungskontrolle, darunter *Serial-chaining* sowie *Closed-loop* Modelle. Obwohl neu formuliert, stimmt Greenwalds lerntheoretisch motivierter „Ideomotor mechanism“ mit der James’schen Konzeption in der wesentlichen Annahme überein: „... a current response is selected on the basis of its own anticipated

sensory feedback” (S. 95).

Greenwalds Wiedereinführung des ideomotorischen Prinzips legte zugleich den Grundstein für dessen Erweiterung zu einer umfassenden Theorie der Handlungssteuerung sowie zu deren empirischen bzw. experimentellen Überprüfung. Im Mittelpunkt der Forschung der letzten 20 Jahre standen dabei vor allem zwei Aspekte, die dem Erwerb effektbasierter Handlungsrepräsentationen zugrundeliegenden Lernmechanismen sowie effektbasierte Repräsentationsformate intendierter Handlungen.

*Erwerb von Handlungs-Effekt Assoziationen.* Wie bereits erwähnt setzt das ideomotorische Prinzip notwendigerweise voraus, dass Handlungen mit den ihnen kontingent folgenden Effekten assoziiert werden. In den letzten Jahren sind eine Reihe von Modellen hinsichtlich des Erwerbs solcher Assoziationen vorgestellt worden (“Ideo-motor mechanism”, Greenwald, 1970c; „Antizipative Verhaltenskontrolle“, Hoffmann, 1993; “Action-concept model”, Hommel, 1996; “2-phase model of action control”, Elsner & Hommel, 2001; “Anticipative learning model”, Ziessler, Nattkemper & Frensch, 2004). An dieser Stelle ist es aus Platzgründen nicht möglich, die einzelnen Lernmechanismen im Detail vorzustellen. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass ein zunehmender Konsens darüber besteht, dass bidirektionale Assoziationen zwischen Handlungen und ihren Effekten mehr oder weniger automatisch entstehen. Hierzu genügt es, dass die Bewegungen gemeinsam mit ihren sensorischen Effekten auftreten, unabhängig von der Relevanz der Effekte (Elsner & Hommel, 2001, 2004).

*Repräsentationsformat antizipierter Handlungseffekte.* Viele zeitgenössische Modelle der Handlungssteuerung gehen von einem Einfluss antizipierter Handlungseffekte auf die Planung und Ausführung von Handlungen aus (siehe beispielhaft Rosenbaum, 1991; Jeannerod, 2006). Deutlich weitreichender sind jedoch die Annahmen des ideomotorischen Prinzips, dass a) die über bidirektionale Assoziationen mit den Handlungen verknüpften sensorischen Effekte das alleinig zugängliche Repräsentationsformat willentlicher Körperbewegungen darstellen, und b) die Aktivierung der Repräsentationen dieser sensorischen Handlungseffekte genau die Bewegung initiiert, welche

üblicherweise und mit hoher Wahrscheinlichkeit diese Effekte hervorruft.

Die Frage der Repräsentationsgrundlage von Handlungen steht im Mittelpunkt der *Common coding* Theorie, welche von einer rein perzeptuellen Kodierung sowohl der Endprodukte perzeptueller Prozesse als auch der kognitiven Antezedenzen intendierter Handlungen, in Form assoziativ verknüpfter Ereignismerkmale, ausgeht (Hommel, 1996; Hommel et al., 2001; Prinz, 1990, 1997). Empirische Unterstützung erhält der *Common coding* Ansatz vor allem aus Studien, in denen direkte und bilaterale Interaktionen zwischen Reizverarbeitung und Handlungsplanung demonstriert werden konnten (für einen Überblick siehe Hommel et al., 2001). Empirische Evidenz für die Aktivierung entsprechender effektbasierter Repräsentationen im Rahmen der Auswahl und Initiierung von Handlungen stammt vornehmlich aus experimentellen Paradigmen, in denen im experimentellen Kontext zusätzliche Handlungseffekte eingeführt wurden, die dann vor oder nach der Handlungsausführung präsentiert werden. Im Folgenden sollen die beiden Ansätze vorgestellt werden, welche in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden.

## **2.2 Empirische Evidenz für die ideomotorische Hypothese**

Es waren zwei wichtige Erweiterungen des ideomotorischen Prinzips, die eine empirische bzw. experimentelle Überprüfung ermöglichen: Zum einen hat bereits James (1890) postuliert, dass nicht nur die Vorstellung der Handlung selbst bzw. ihrer proximalen Effekte, sondern auch die Antizipation ihrer distalen Wirkungen in der Umwelt zur Aktivierung der Handlung führen. Dies bedeutet, dass die sensorischen Repräsentationen von Handlungen sowohl proximale, körperbezogene als auch distale, körperferne Handlungseffekte umfassen. Wenn man beispielsweise einen Lichtschalter betätigt, um das Licht einzuschalten, dann gehören zur Repräsentation dieser Handlung

sowohl die Bewegung der Hand zum Lichtschalter und die Betätigung des Schalters, als auch das Aufleuchten des Lichts. Die Vorstellung sowohl effektor-spezifischer als auch -unspezifischer Handlungsrepräsentationen findet sich heutig im *Common coding* Ansatz wieder (Prinz, 1990, 1997; Hommel et al., 2001). Der zweite Schritt in Richtung einer empirischen Überprüfung des ideomotorischen Prinzips waren die Überlegungen und Experimente Antony Greenwalds zur Handlungsinduktion.

### **2.2.1 Einfluss wahrgenommener Handlungseffekte auf die Handlungssteuerung**

Greenwalds grundlegender Gedanke war der folgende: Wenn die Auswahl einer Handlung ausschließlich durch die Aktivierung sensorischer Repräsentationen erfolgt – Greenwald (1970) sprach von “anticipatory images of response feedback” (S. 85) – dann sollte deren externe Stimulation die Auswahl der Handlung erleichtern bzw. beschleunigen. Sofern sich nach ausreichender Übung die Repräsentation einer Handlung zumindest teilweise der äußerlichen Wahrnehmung genau dieser Handlung annähert, sollten Reize, welche diesen Handlungseffekten perzeptiv hinreichend ähnlich sind, die Auswahl bzw. Initiierung der korrespondierenden Bewegung fördern.

Tatsächlich konnten in mehreren Experimenten Hinweise auf eine Handlungsinduktion bei Vorliegen einer solchen, von Greenwald (1972) mit “ideomotor compatibility” bezeichneten Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Stimuli und Reaktionen gefunden werden (Greenwald, 1970a, 1970b). Versuchspersonen sollten auf einen visuell oder auditiv präsentierten Buchstaben reagieren, indem sie den Buchstaben entweder nachsprachen oder aufschrieben. Im Ergebnis wurde auf einen visuell präsentierten Buchstaben schneller durch Schreiben reagiert (im Vergleich zum Sprechen), während Reaktionen auf auditiv präsentierte Buchstaben schneller durch Sprechen erfolgten (im Vergleich zum Schreiben). Diese Interaktion wurde von Greenwald (1970a) dahingehend interpretiert, dass manuelle Schreibreaktionen zumindest teil-

weise visueller Effektrepräsentationen bedürfen und Sprechreaktionen entsprechend auditiver Repräsentationen, auf die schneller zugegriffen werden kann, wenn sie zuvor durch Stimuli gleicher Modalität aktiviert wurden.

Die Überlegungen und Befunde Greenwalds zur ideomotorischen Kompatibilität stellten den ersten wichtigen Schritt in Richtung einer empirischen Validierung des ideomotorischen Prinzips dar. Konzeptuell weisen sie jedoch noch einige Schwächen auf, die bereits von Greenwald (1970a) diskutiert wurden. So ließen sich die Reaktionszeitkosten, wie sie mit Stimuli und Reaktionen unterschiedlicher Modalitäten beobachtet wurden, alternativ durch zusätzlich notwendige Enkodierungsprozesse erklären, beispielsweise einer phonetischen Umkodierung im Falle eines visuell präsentierten Buchstaben und einer vokalen Reaktion. Ein weiteres konzeptuelles Problem von Experimenten zur ideomotorischen Kompatibilität besteht in der definitionsgemäßen Beschränkung auf bewegungsimmanentes Feedback. Die beobachtete Verkürzung der Reaktionszeiten gegenüber Wahlreaktionsaufgaben mit arbiträren Zuordnungsregeln könnte somit auf zuvor erworbenen Assoziationen zwischen den Reizen und Reaktionen beruhen, die nicht auf von der ideomotorischen Hypothese postulierten Lernmechanismen beruhen. Greenwald selbst hat vorgeschlagen, diese Beschränkung durch die Einführung zusätzlicher Handlungseffekte im experimentellen Kontext zu umgehen: "Transfer from previous learning is, of course, avoidable in principle by establishing novel, arbitrary response-feedback relations, giving the subject appropriate practice, then testing for response facilitation using the novel feedback stimuli as test stimuli in a reaction time procedure" (S. 91).

Dieser Vorschlag wurde letztlich in Hommels (1996) Interferenzparadigma umgesetzt. In einer vorangehenden Lernphase hatten Versuchspersonen auf die Buchstaben O und X mit einem linken bzw. rechten Tastendruck zu reagieren. Entscheidend war, dass jede Reaktion von zusätzlichen Handlungseffekten, einem hohen oder tiefen Ton, gefolgt war. Die Versuchspersonen wurden lediglich darauf hingewiesen, dass die Töne nicht informativ und daher zu ignorieren seien. Nach ausreichender Übung folgte dann die eigentliche Testphase. Die Instruktion war mit der Lernphase identisch. Zusätzlich



zu den Buchstaben wurde nun jeweils einer der beiden zufällig ausgewählten Töne präsentiert. Dadurch ergaben sich kompatible Durchgänge in dem Sinne, dass die Töne mit dem vom Buchstaben signalisierten Tastendruck assoziiert waren, sowie inkompatible Durchgänge, in denen der Ton mit der alternativen Reaktion assoziiert war. Wenn sich Greenwalds Überlegungen zur ideomotorischen Kompatibilität auf arbiträre Zuordnungen von Handlungen und Effekten übertragen lassen, sollte die Darbietung des Tons parallel zu dem Buchstaben mit der Auswahl der Reaktion interferieren. Tatsächlich fand sich in den Reaktionszeiten ein entsprechender Kompatibilitätseffekt, das heißt, Reaktionen erfolgten schneller bei gleichzeitiger Präsentation von Tönen, die kompatibel zu den geforderten Reaktionen waren. Dieses von Hommel unter Verwendung verschiedener Reize und Reaktionen mehrfach replizierte Ergebnis zeigt, dass Handlungen durch die Wahrnehmung auch artifizieller Handlungseffekte gebahnt werden, selbst wenn die Effekte ursprünglich nicht mit den Reaktionen assoziiert sind.

Dennoch besteht auch beim Inferenzparadigma das Problem, dass sich die Befunde womöglich durch klassische Stimulus-Stimulus Konditionierung erklären lassen. Da die Zuordnungsregel der Reaktionen zu den Stimuli in der Lern- und Testphase jeweils identisch war, besteht eine Konfundierung bezüglich der zu erlernenden Beziehung zwischen Reaktionen und Effekten auf der einen sowie zwischen aufgabenrelevanten (Buchstabe) und -irrelevanten Reizen auf der anderen Seite. Demnach würde der Ton nicht die assoziierte Reaktion bahnen, sondern lediglich die Wahrnehmung des Buchstabens beschleunigen. Diesem Einwand wurde im Transferparadigma von Elsner und Hommel (2001) begegnet. Es gleicht dem Interferenzparadigma in seiner Aufteilung in eine Lern- und eine Testphase. Um jedoch die Entstehung von Stimulus-Effekt Assoziationen zu verhindern, werden in der Lernphase keine diskriminativen Stimuli verwendet. Stattdessen zeigt ein einziger nicht-diskriminativer Reiz an, dass eine der zwei möglichen Reaktionen frei zu wählen ist. Beide Reaktionen führen kontingent zur Darbietung von Handlungseffekten. In der Testphase werden diese Effekte als imperative Stimuli einer Wahlreaktionsaufgabe verwendet. Die kritische Manipulation

besteht in der Variation der Zuordnung der Stimuli (der bisherigen Handlungseffekte) zu den Reaktionen, wodurch sich erwerbskonsistente sowie erwerbsinkonsistente Zuordnungen der Reize zu den Reaktionen ergeben.

Im konkreten Beispiel (Elsner & Hommel, 2001, Experiment 1) reagierten die Versuchspersonen in der Erwerbsphase mit einem linken oder rechten Tastendruck, welche jeweils einen hohen oder tiefen Ton erzeugten. In der Testphase wurden die Versuchspersonen der Gruppe mit erwerbskonsistenter Zuordnung von Reizen und Reaktionen aufgefordert, auf einen hohen Ton die linke Taste sowie auf einen tiefen Ton die rechte Taste zu drücken. In der Gruppe mit erwerbsinkonsistenter Zuordnung war die Zuordnungsregel von Reizen zu Reaktionen genau umgekehrt und daher inkonsistent zu den in der Lernphase erworbenen Handlungs-Effekt Assoziationen. Sofern die Präsentation der Effekte als Reize in der Testphase die in der Lernphase assoziierten Tastendrücke aktiviert, würde in der Gruppe mit erwerbskonsistenter Zuordnungsregel die richtige Reaktion, in der Gruppe mit erwerbsinkonsistenter Zuordnungsregel jedoch die alternative Reaktion gebahnt. Diese Annahme konnte bestätigt werden, dass heißt die Reaktionszeiten fielen in der erstgenannten Gruppe signifikant kürzer aus. Darüber hinaus konnte dieser Konsistenzeffekt in einer Extinktions-Bedingung repliziert werden, in der Tastendrücke der Testphase keine Töne produzierten. Dies schließt die alternative Erklärung aus, dass in der Testphase lediglich Assoziationen zwischen Reizen und Effekten entstanden sind, vergleichbar zur Lernphase im Interferenzparadigma. Der beobachtete Einfluss der Zuordnungsregel kann demnach als Indikator für die Reaktionsaktivierung durch bestehende oder erworbene Handlungs-Effekt-Assoziationen dienen.

Zusammenfassend stützen diese Befunde die zwei Kernannahmen des ideomotorischen Prinzips: Assoziationen zwischen Handlungen und ihren Effekten entstehen automatisch; die Wahrnehmung dieser Effekte wiederum aktiviert die korrespondierende Handlung. In den letzten Jahren haben sich das Interferenz- und das Transferparadigma daher zu akzeptierten Methoden etabliert, insbesondere in der Untersuchung der Lernmechanismen beim Erwerb effektbasierter Handlungsrepräsentationen. Beispielhaft sei-

en Arbeiten zu Entwicklungsaspekten (Eenshuistra, Weidema & Hommel, 2004), der Generalisierung bestehender Handlungs-Effekt-Assoziationen auf andere Ereignisse (Hommel, Alonso & Fuentes, 2003), der Rolle von Intentionen (Ziessler et al., 2004) und neuronalen Korrelaten (Elsner et al., 2002) genannt.

### **2.2.2 Einfluss antizipierter Handlungseffekte auf die Handlungssteuerung**

Aktivierende bzw. hemmende Einflüsse wahrgenommener Handlungseffekte stellen nicht den einzigen empirischen Beleg für die Annahme dar, dass jeder willentlichen Handlung eine Antizipation ihrer Effekte vorausgeht. Tatsächlich kann vor dem Hintergrund der bislang berichteten Befunde nicht ausgeschlossen werden, dass beispielsweise distale Effekte nur dann Teil von kognitiven Handlungsrepräsentationen sind, wenn sie kontinuierlich perzeptuell stimuliert werden. Um die von der ideomotorischen Hypothese angenommene endogene Aktivierung von Effektrepräsentationen empirisch zu stützen, ist es daher notwendig, den Einfluss von Handlungseffekten zu demonstrieren, die den Handlungen nicht vorausgehen, sondern zeitlich folgen.

Ein diesbezüglicher Vorschlag wurde von Kunde (2001) unterbreitet. Die logische Grundlage seines experimentellen Paradigmas bilden die Kernannahmen der ideomotorischen Hypothese, dass Handlungen in Form ihrer sensorischen Effekte repräsentiert sind und diese Repräsentationen im Rahmen der Handlungssteuerung aktiviert werden. Weiterhin postuliert Kunde, dass eine endogene Aktivierung sensorischer Repräsentationen in ihrer Wirkung prinzipiell vergleichbar sein sollte mit der Aktivierung durch wahrgenommene, das heißt sensorisch tatsächlich präsen- ter Handlungseffekte. Ließe sich ein entsprechender Einfluss demonstrieren, würde dies notwendigerweise implizieren, dass im Rahmen der Handlungsauswahl Effektkodes noch vor Beginn einer Handlung endogen aktiviert werden.

Aufbauend auf diesen Überlegungen sollte es möglich sein, Interferenzen zwischen Handlungen und den ihnen nachfolgenden Effekten zu finden, wenn Handlungen und Effekte hinsichtlich bestimmter überlappender Dimensionen Merkmale teilen. In Wahlreaktionsaufgaben sind Kompatibilitätseffekte gut dokumentiert, die sich aus einer dimensional Merkmalsüberlappung der Stimuli mit den Reaktionen ergeben (S–R Kompatibilität). Sie resultieren selbst dann, wenn die geteilten Merkmale für die aktuelle Aufgabe vollkommen irrelevant sind. So gelingt es beispielsweise schneller und fehlerfreier, auf einen lateralisiert dargebotenen hohen oder tiefen Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck zu reagieren, wenn der Ton auf der Seite der geforderten Reaktion präsentiert wird (Simon, 1967). Die dominierenden theoretischen Modelle der S–R Kompatibilität attribuieren solche Effekte auf eine automatische Aktivierung von Reaktionsmerkmalen durch korrespondierende Merkmale der Stimuluskonfiguration (Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990; Hommel, 1997). Diese Bahnung ist von Vorteil, sofern die aktivierte Reaktion der geforderten Reaktion entspricht und führt entsprechend zu schnelleren Reaktionszeiten und geringeren Fehlerraten. Entsprechend abträglich ist dagegen die Aktivierung der alternativen Reaktion, da sie zugunsten der geforderten Reaktion inhibiert werden muss. Aus Sicht der ideomotorischen Hypothese sollte sich diese Logik ebenso auf die Kompatibilität zwischen Handlungen und ihren nachfolgenden Effekten anwenden lassen. Sofern Handlungen und Effekte auf einer Merkmalsdimension überlappen, sollte eine endogene Aktivierung sensorischer Repräsentationen von Handlungseffekten im Rahmen der Handlungsauswahl automatisch die korrespondierenden Reaktionen bahnen.

Solche Kompatibilitätseffekte zwischen Reaktionen und ihren kontingenten Effekten (R–E Kompatibilität) konnten von Kunde (2001, Experiment 1) verifiziert werden. Versuchspersonen hatten in einer vierfach-Wahlreaktionsaufgabe auf einen zentral präsentierten Farbkreis mit einer von vier horizontal angeordneten Reaktionstasten zu reagieren. Zwischen den Stimuli und den Reaktionen bestand somit keine Merkmalsüberlappung. Jeder Tastendruck führte zu distinkten visuellen Effekten, nämlich dem Aufleuchten

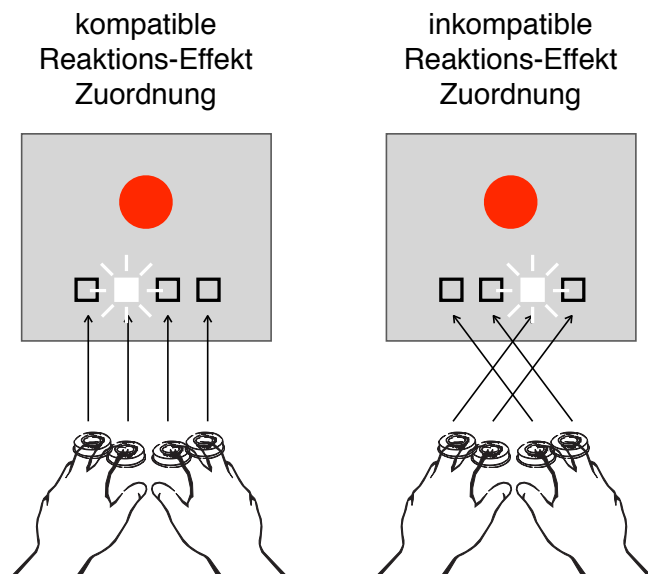


Abbildung 2.1: Kompatible und inkompatible Zuordnungen von Reaktionen und Effekten bei Kunde (2001, Experiment 1).

eines von vier Quadraten, die horizontal auf dem Bildschirm angeordnet waren, welcher auch der Reizpräsentation diente. Die kritische Variation bestand in der Zuordnung der Reaktionen (den Tastendrücken) zu den Effekten (dem Aufleuchten der Quadrate). In einem kompatiblen Block korrespondierte die Position der Effekte mit den Tasten, während in einem inkompatiblen Block Reaktionen und Effekte über Kreuz verschaltet wurden (siehe Abbildung 2.1).

Aus ideomotorischer Perspektive war zu erwarten, dass sich mit laufender Lernerfahrung im Experiment automatisch Assoziationen zwischen den verschiedenen Reaktionen und ihren distalen Effekten, dem Aufleuchten

der Quadrate, aufbauen. Für die Auswahl der Reaktion sollte dann das Aufleuchten der Quadrate antizipiert werden, gleichbedeutend mit der endogenen Aktivierung der entsprechenden sensorischen Repräsentationen. Sofern diese Aktivierung, analog zu tatsächlich präsenten Stimuli, die räumlich korrespondierende Reaktion bahnt, sollte bei kompatibler Reaktions-Effekt Zuordnung die geforderte Reaktion gebahnt werden; bei einer inkompatiblen Zuordnung würde dagegen eine alternative Reaktion gebahnt. Die Ergebnisse entsprachen diesen Vorhersagen, das heißt die Reaktionen erfolgten schneller, wenn der Ort der Reaktion dem der darauf folgenden Effekte entsprach. Interessanterweise lagen die Reaktionszeitunterschiede in der für S-R Kompatibilitätseffekte typischen Größenordnung von rund 20 ms.

Aus Studien zur S-R Kompatibilität ist bekannt, dass Kompatibilitätseffekte nicht auf räumliche Merkmale beschränkt sind. Beispielsweise bahnen visuelle Stimuli hoher Intensität kräftige Reaktionen sowie weniger intensive Stimuli sanfte Reaktionen (Mattes, Leuthold & Ulrich, 2002); ebenso werden kurze Tastendrucke schneller initiiert nach kurzer Stimulusdarbietung, lange Tastendrucke dagegen nach langer Darbietung (Kunde & Stöcker, 2002). Vergleichbare Befunde fanden sich auch für R-E Kompatibilitätseffekte. Versuchspersonen hatten in zweifach-Wahlreaktionsaufgaben auf einen Farbkreis hin eine spezielle Drucktaste entweder sanft oder kräftig zu drücken (Kunde, 2001, Experiment 2) oder Tastendrucke kurzer bzw. langer Dauer auszuführen (Kunde, 2003, Experiment 1). Jeder Tastendruck produzierte im Anschluß einen Ton, wobei die Zuordnung von Reaktionen und Effekten blockweise variiert wurde. Bei kompatibler Zuordnung korrespondierte die Intensität bzw. Dauer der Effekte mit den Tastendrucke, während diese Beziehung bei inkompatibler Zuordnung invertiert war. In beiden Experimenten bestätigten die Ergebnisse die Erwartungen, das heißt Reaktionen erfolgten schneller und mit weniger Fehlern bei kompatibler Zuordnung.

Zusammenfassend stützen diese Befunde die Kernannahmen der ideomotorischen Hypothese. Zuverlässig eintretende distale Handlungseffekte werden automatisch mit den vorausgehenden Handlungen verknüpft. Bereits

während der Handlungsplanung, noch vor Beginn der Ausführung der Handlung, werden die sensorischen Repräsentationen dieser Handlungseffekte aktiviert. Bemerkenswerterweise üben die Handlungseffekte einen Einfluss aus, obwohl sie für die auszuführende Aufgabe vollkommen irrelevant sind, was die funktionale Bedeutung der Antizipation von Handlungseffekten unterstreicht.

### 2.2.3 Charakteristika antizipierter Handlungseffekte

Kompatibilitätseffekte zwischen Reaktionen und nachfolgenden Reaktions-effekten stellen offenbar einen geeigneten Indikator für die von der ideomotorischen Hypothese angenommene Antizipation von Handlungseffekten dar. Darüber hinaus ermöglichen sie als inferentielles Instrument auch weitergehende Schlussfolgerungen hinsichtlich des Repräsentationsformats antizipierter Handlungseffekte sowie des Verlaufs der Aktivierung dieser Repräsentationen im Laufe der Handlungsplanung und -ausführung.

#### Repräsentationsformat antizipierter Handlungseffekte

Sensorische Ereignisse können mental in unterschiedlicher Form repräsentiert sein. Beispielsweise kann die Farbe Rot mental so gespeichert werden, dass sie dem ursprünglichen Perzept gleicht. Sie kann aber auch abstrakt kodiert werden, so dass keine phänomenale Ähnlichkeit gegeben ist (hinsichtlich der Debatte über den repräsentationalen Status visueller Vorstellungen siehe auch Pylyshyn, 2002). Insofern die ideomotorische Hypothese von einer Antizipation sensorischer Effekte ausgeht, stellt sich die Frage nach dem Format dieser Handlungsrepräsentationen.

*Handlungsrepräsentationen sind wahrnehmungsanalog.* William James (1890) war von der wahrnehmungsanalogen Natur (“anticipatory *image*”) handlungsleitender Effektrepräsentationen überzeugt. Vorläufige empirische Evidenz für diese Annahme fand sich in R-E Kompatibilitätseffekten zwischen dauervariablen Handlungen und Effekten (Kunde, 2003; Kiesel

& Hoffmann, 2004). Neben dem Einfluss der Zuordnungsregel fand sich in den Reaktionszeiten auch ein Haupteffekt für die Dauer der Effekte. Tastendrucke wurden schneller ausgewählt bzw. initiiert, wenn sie kurze statt lange Töne erzeugten. Dies spricht für ein wahrnehmungsanaloges Format der antizipierten Effekte, insofern die Vorstellung eines Ereignisses kurzer Dauer schneller möglich ist. Wären die Effekte dagegen in einem abstrakten Format kodiert, sollte es keinen Unterschied zwischen Effekten kurzer oder langer Dauer geben.

*Handlungsrepräsentationen sind modalitätsspezifisch.* Ein weiteres Indiz für ein wahrnehmungsanaloges Format von Effektrepräsentationen wäre, wenn diese ihre ursprüngliche sensorische Modalität beibehalten würden. Hinweise darauf ergaben sich in einer bislang unveröffentlichten Studie (siehe auch Paelecke & Kunde, 2005). In Doppelaufgaben hatten Versuchspersonen in jedem Durchgang zunächst auditive oder visuelle Stimuli zu memorieren. Die Zweitaufgabe bestand in einer Wahlreaktion auf einen Farbkreis durch sanften bzw. kräftigen Tastendruck, welche von auditiven oder visuellen Effekten korrespondierender oder nicht-korrespondierender Intensität gefolgt wurden. Am Ende eines Durchgangs erfolgte ein Wiedererkennungstest für die zu Beginn präsentierten Stimuli. Neben der Zuordnungsregel von Reaktionen und Effekten wurde die Modalität der Stimuli der Erstaufgabe sowie der Effekte der Zweitaufgabe vollständig gekreuzt. Im Ergebnis fanden sich Interferenzen zwischen beiden Aufgaben, wie sie nur bei modalitätsspezifischer Repräsentation der Handlungseffekte zu erwarten waren: Die Gedächtnisleistung fiel geringer aus, wenn die zu erinnernden Stimuli und die Effekte die gleiche Modalität aufwiesen.

*Handlungsrepräsentationen können auch abstrakt sein.* Die oben berichteten Befunde deuten auf ein wahrnehmungsanaloges Repräsentationsformat antizipierter Effekte hin. Offensichtlich gibt es jedoch auch Handlungen, deren Ziele nicht perzeptueller, sondern eher konzeptueller Natur sind. Für solche durch ihre Bedeutung definierten Handlungsziele sind einfache perzeptuelle Merkmale weit weniger von Bedeutung. Es ist also durchaus wahrscheinlich, dass sich R-E Kompatibilitätseffekte auch für konzeptuelle



Merkmalsüberlappungen zwischen Reaktionen und Effekten finden lassen sollten. Diese Vermutung konnte in einer Studie von Koch und Kunde (2002) bestätigt werden. Versuchspersonen reagierten auf eine auf einem Bildschirm dargebotene Zahl durch das Aussprechen arbiträr zugeordneter Farbwörter (z.B. „blau“). Der Beginn der vokalen Reaktion triggerte die Präsentation von Farbwörtern auf dem Bildschirm, die entweder kongruent (*BLAU*) oder inkongruent (z.B. *GRÜN*) zur Reaktion waren. Die Wörter wurden einer Gruppe von Versuchspersonen in der Farbe präsentiert, die sie bezeichneten (z.B. *BLAU* in blau), in einer anderen Gruppe dagegen immer in neutralem Grau. In beiden Gruppen fand sich ein vokaler R–E Kompatibilitätseffekt, das heißt Reaktionen erfolgten schneller bei kompatibler Zuordnung der Farbwörter im Vergleich zur inkompatiblen Zuordnung. Zwar war dieser Effekt in der Gruppe mit farbig präsentierten Effektwörtern numerisch größer als in der Gruppe mit ausschließlich grauen Farbwörtern. Das in der letzteren Gruppe nichtsdestotrotz ein signifikanter Effekt beobachtet wurde, obwohl sich die Merkmalsüberlappung nicht auf physische Effektmerkmale, sondern lediglich deren inhaltliche Bedeutung bezog, weist darauf hin, dass Effektrepräsentationen nicht auf perzeptuelle Merkmale beschränkt sind, sondern auch in abstrakter Form kodiert werden können.

### **Verlauf der Aktivierung von Effektrepräsentationen**

James (1890) und in der Folge auch Greenwald (1970c) gingen in ihren Formulierungen der ideomotorischen Hypothese davon aus, dass Handlungen, sofern sie nicht aktiv inhibiert werden, durch die Vorstellung ihrer sensorischen Effekte nicht nur ausgewählt, sondern letztlich auch initiiert werden. Aus den bisherigen Studien zur R–E Kompatibilität gibt es bereits Hinweise darauf, wie die damit verbundene Aktivierung der Effektrepräsentationen zeitlich verläuft.

*Die Aktivierung von Effektrepräsentationen ist zeitaufwändig.* S–R Kompatibilitätseffekte nehmen, sofern die Stimulusmerkmale für die betreffende Aufgabe irrelevant sind, mit zunehmender Reaktionszeit ab (De Jong, Liang

& Lauber, 1994; Eimer, Hommel & Prinz, 1995). Dies wird üblicherweise mit dem Zerfall der stimulusbezogenen Aktivierung dieser Merkmale erklärt, in dem Sinne, dass später ausgeführte Reaktionen weniger beeinflusst werden (Kornblum, Stevens, Whipple & Requin, 1999). Kompatibilitätseffekte zwischen Handlungen und ihren Effekten weisen dagegen einen anderen Aktivierungsverlauf auf. Verteilungsanalysen (Ratcliff, 1979) ergaben, dass die Größe dieser Kompatibilitätseffekte mit zunehmender Reaktionszeit nicht ab- sondern zunimmt, unabhängig davon, ob die Effekte den Handlungen vorausgehen (Brass, Bekkering & Prinz, 2001; Hommel, 1996) oder ihnen folgen (Kunde, 2001). Dies kann als vorläufige Evidenz dafür angesehen werden, dass die Aktivierung von Effektrepräsentationen zeitaufwändig ist, wodurch die Reaktionsvorbereitung von inkompatiblen Handlungseffekten umso stärker beeinflusst wird, je länger die Effektkodeaktivierung dauert bzw. je später die Reaktion erfolgt.

*Die Aktivierung von Effektrepräsentationen überdauert die Handlungsauswahl.* Wenn Handlungen tatsächlich ausschließlich in Form ihrer Effekte repräsentiert sind, dann müsste die Aktivierung dieser Effektkodes bis zum Beginn der Handlungsausführung aufrechterhalten bleiben – andernfalls ginge die Handlung womöglich noch vor der Ausführung „verloren“. Ein Einfluss der R–E Kompatibilität sollte sich daher auch in späten Phasen der Handlungssteuerung, das heißt nach der Auswahl einer Handlung, finden lassen. Erste Hinweise darauf ergaben sich in Wahlreaktionsaufgaben, in denen die Versuchspersonen die Reaktion frei wählen und erst auf ein Start-Signal hin ausführen sollten (Kunde, 2001, Experiment 3). Obwohl die Auswahl der Reaktion damit vor dem Erscheinen des Start-Signals abgeschlossen war, fanden sich ein Einfluss der R–E Kompatibilität in den Reaktionszeiten.

Innerhalb eines Reaktionsvorbereitungsparadigmas wurde diese Frage von Kunde, Koch und Hoffmann (2004) weitergehend untersucht. Versuchspersonen hatten auf einen Farbkreis mit sanften oder kräftigen Tastendrücken zu reagieren, die wiederum leise bzw. laute Töne erzeugten; die Kompatibilität der Zuordnung wurde geblockt variiert. Zusätzlich erschien vor dem Stimulus ein Hinweisreiz, welcher in den meisten Durchgängen

die erforderliche Reaktion valide ankündigte. Je nach Länge des Intervalls zwischen Hinweisreiz und Stimulus ermöglichte dies die mehr oder weniger vollständige Vorbereitung der Reaktion. Für den Fall eines validen Hinweisreizes ergeben sich in diesem Paradigma drei Vorhersagen: Sofern die angenommene Aktivierung der Effektrepräsentationen nach der Auswahl der Reaktion zerfällt, sollten R-E Kompatibilitätseffekte mit zunehmendem Vorbereitungsintervall kleiner werden und letztlich ganz verschwinden. Falls sich dagegen die Aktivierung auch nach der Reaktionsauswahl fortsetzt, sollte die Größe der R-E Kompatibilitätseffekte bei frühzeitiger Vorbereitung zwar geringer ausfallen, jedoch nicht null sein. Die Ergebnisse entsprachen der letzteren Erwartung, das heißt auch bei validem Hinweisreiz und hinreichender Vorbereitungszeit fanden sich reliabel R-E Kompatibilitätseffekte. Aktivierte Effektrepräsentationen sind demnach selbst dann noch wirksam, wenn die Auswahl einer Handlung bereits abgeschlossen ist.

*Aktivierte Effektrepräsentationen beeinflussen die Ausführung von Handlungen.* Die ideomotorische Hypothese enthält – über die Auswahl und Initiierung hinaus – keine detaillierten Vorhersagen hinsichtlich eines Einflusses bereits aktivierter Effektrepräsentationen auf die physische Umsetzung einer Handlung. Zwei der oben berichteten R-E Kompatibilitätseffekte bieten sich jedoch an, einen möglichen Einfluß auf die Ausführung von Handlungen zu untersuchen. Bei dauervariablen Reaktionen kann die Dauer des Tastendrucks, bei druckvariablen Reaktionen der Druckverlauf erfasst werden. Entsprechende Analysen fanden in beiden Fällen einen Einfluß der nachfolgenden Effekte auf die Ausführung der Reaktionen, der sich jedoch von denen auf die Reaktionszeit unterschied (Kunde, 2003; Kunde et al., 2004). Während die Reaktionszeiten von der Kompatibilität der Effekte zu den Reaktionen beeinflusst wurden, in dem Sinne, dass Reaktionen bei nachfolgenden kompatiblen Effekten schneller erfolgten, fand sich hinsichtlich der Ausführungsparameter der Reaktionen ein Kontrasteinfluß der Effekte. So fiel der gemessene Maximaldruck bei nachfolgenden lauten Tönen verglichen mit leisen Tönen geringer aus, unabhängig davon, ob ein sanfter oder kräftiger Tastendruck gefordert war (Kunde et al., 2004). Ebenso

verkürzte sich die gemessene Dauer der Tastendrucke bei nachfolgenden langen Tönen im Vergleich zu kurzen Tönen (Kunde, 2003). Da in allen Fällen die Töne erst nach dem Abschluss der Reaktionen präsentiert wurden, können diese Kontrasteffekte nicht durch die Rückmeldung und -wirkung der wahrgenommenen Effekte im Sinne einer Feedback-Schleife erklärt werden.

Stattdessen stützen diese Befunde die Annahme einer Integration proximaler und distaler Handlungseffekte verschiedener sensorischer Modalitäten (Aschersleben & Prinz, 1997). Die Intensität bzw. Dauer der herzustellenden proximalen Effekte, die sich letztlich in den Maßen der Reaktionsausführung niederschlagen, wird demnach im Hinblick auf die Intensität eines intermodalen Effektbündels angepasst. Wenn beispielsweise ein geforderter kräftiger Tastendruck vorhersehbar nur einen leisen Ton produziert, erfolgt die Ausführung mit größerem Tastendruck, um dadurch eine konstante Intensität integriert über die proximalen und distalen Effekte hinweg zu gewährleisten.

### **2.3 Offene Fragen**

Ziel dieses Kapitels war die Präsentation empirischer Evidenz für die Kernannahme der ideomotorischen Hypothese, dass willentliche und zielgerichtete Bewegungen erschöpfend in Form ihrer sensorischen Effekte repräsentiert sind und nur durch die Aktivierung dieser Repräsentation ausgewählt und initiiert werden können. Diese Annahmen wurden lange in ihrem heuristischen Wert unterschätzt. Jedoch ermöglichen sie eine Interpretation effektbezogener Kompatibilitätseffekte, die sich unter Verwendung wahrgenommener als auch antizipierter distaler Handlungseffekte finden lassen, insofern die ideomotorische Hypothese sowohl von einem automatischen Lernprozess zur Kodierung selbst aufgabenirrelevanter distaler Handlungseffekte als auch der zwingenden Aktivierung der entsprechenden Effektkodes zur Rekrutierung der Reaktionen ausgeht.

Allerdings weist die ideomotorische Hypothese im Vergleich zu Model-

len der Informationsverarbeitung noch einige konzeptuelle Defizite auf. Der funktional der Handlungsauswahl zugrunde liegende Prozess, die Aktivierung der Repräsentationen der Handlungseffekte der intendierten Handlung, ist bislang kategorial und als Makrostruktur definiert; eine Analyse der Mikrostruktur bzw. die Spezifikation des strukturellen und zeitlichen Ablaufs der beteiligten Prozesse steht bislang noch aus. So stellen in Modellen der Informationsverarbeitung die Identifizierung, automatische Aktivierung und Verifizierung einer geforderten Reaktion sowie der Aufruf des motorischen Programms Subprozesse der Handlungsauswahl dar. Aktuelle Modelle antizipativer Handlungssteuerung sind dagegen – auch wenn sie prinzipbedingt weniger auf den Informationsfluss zwischen wahrnehmungs- und handlungsbezogenen Prozessen fokussieren – hinsichtlich der Mikrostruktur des Handlungsauswahlprozesses weit weniger elaboriert (für mögliche Gründe siehe Hommel et al., 2001; Prinz, 1997).

Immer wieder wird jedoch entweder implizit oder auch explizit davon ausgegangen, dass die Aktivierung von Effektrepräsentationen mit dem Prozess der Handlungsauswahl im engeren Sinne (*Response selection*) gleichzusetzen ist (siehe bspw. Elsner & Hommel, 2001). Dem muss aber nicht so sein. So könnte beispielsweise die Aktivierung von Effektrepräsentationen automatisch durch bestehende Stimulus–Effekt Assoziationen und damit noch vor der eigentlichen Handlungsauswahl erfolgen (für die Unterscheidung zwischen automatischer Reaktionsaktivierung vs. Handlungsauswahl siehe Hommel, 1998a; Lien, 2001; Lien & Proctor, 2002). Alternativ könnte die Antizipation der Handlungseffekte erst nach der Auswahl einer Handlung, während der Initiierung erfolgen, um beispielsweise die Richtigkeit der Ausführung sicherzustellen, wie es etwa von *Closed-loop* Modellen angenommen wird (Adams, 1971). Soweit Effektrepräsentationen in diesem Fall funktional nicht an der Handlungsauswahl beteiligt wären, würde dies den Erklärungsgehalt der ideomotorischen Hypothese deutlich einschränken.

Zusammenfassend lässt sich vor dem Hintergrund der in diesem Kapitel vorgestellten Studien konstatieren, dass Repräsentationen sensorischer Handlungseffekte einen signifikanten Einfluss auf die Generierung willentli-

cher Handlungen haben. Die explizite Beantwortung nach der funktionalen Äquivalenz von Effektantizipation und Handlungsauswahl erfordert jedoch eine weitergehende empirische Verankerung der als Indikator fungierenden Phänomene der Handlungs-Effekt Kompatibilität innerhalb der mentalen Chronometrie.

# Kapitel 3

## Effektkodeaktivierung und der Reaktionsauswahl-Flaschenhals

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beantwortung der Frage, zu welchem Zeitpunkt in der Handlungsplanung sensorische Handlungseffekte tatsächlich antizipiert werden. Aufgrund der im Abschnitt 2.2 skizzierten Befundlage kann man davon ausgehen, dass Repräsentationen distaler Handlungseffekte zwangsläufig aktiviert werden, selbst wenn die Effekte für die eigentliche Aufgabe irrelevant sind. Das bedeutet aber noch nicht zwingend, dass die Aktivierung dieser Repräsentationen, wie von der ideomotorischen Hypothese postuliert, auch ursächlich für die Auswahl und Initiierung von Handlungen ist (vgl. Abschnitt 2.3).

Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll daher in der empirischen Analyse des Zusammenhangs bzw. der Wechselwirkung von Effektkodeaktivierung und der Reaktionsauswahl liegen. Hierzu wurde ausgenutzt, dass bestimmte Prozesse der Reaktionsauswahl offenbar nur seriell ablaufen können, was speziell in Doppelaufgaben zu charakteristischen Leistungseinbußen führt. Die spezifischen Interaktionen dieser Leistungseinbußen mit Kompatibilitätseffekten zwischen Handlungen und ihren Effekten dienen der zeitlichen Verortung der Effektkodeaktivierung relativ zur Reaktionsauswahl.

In dem folgenden Kapitel werden zunächst bisherige Arbeiten zur Frage nach dem Zusammenhang von Effektkodeaktivierung und Reaktionsauswahl berichtet. Diesen Arbeiten ist gemeinsam, dass durch Variation der Kompatibilität von Reizen und Handlungseffekten versucht wurde, die Leistung in Doppelaufgaben zu beeinflussen. Anschließend wird das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode (PRP) vorgestellt, wie es im empirischen Teil der Arbeit verwendet wurde. Dieses Paradigma stellt ebenfalls eine Doppelaufgabensituation dar, in der mehr oder weniger gleichzeitig zwei Wahlreaktionsaufgaben zu bearbeiten sind. Die dabei zu beobachtenden Leistungseinbußen werden in dem derzeit dominierenden Erklärungsmodell anhand eines „Flaschenhals“ der Reaktionsauswahl erklärt. Diese Annahmen bilden die Grundlage für die Nutzung des PRP-Paradigmas zur Lokalisation experimenteller Manipulationen und damit für die Interpretation der Befunde des empirischen Teils dieser Arbeit.

### **3.1 Bisherige Arbeiten**

Theorien antizipativer Handlungssteuerung nehmen zumindestens implizit an, dass die Aktivierung von Effektrepräsentationen funktional dem Prozess der Handlungsauswahl informationsverarbeitender Modelle entspricht. Umso überraschender ist, dass die Frage nach dem zeitlichen Lokus der Aktivierung von Effektrepräsentationen bislang nicht Gegenstand empirischer Untersuchungen war. Vorläufige Schlüsse können jedoch aus einer Reihe von Studien gezogen werden, die sich mit den Randbedingungen des sogenannten Reaktionsauswahl-Flaschenhalses in Doppelaufgaben beschäftigt haben.

Ausgehend von seinem Modell der ideomotorischen Kompatibilität (siehe Abschnitt 2.2.1) postulierte Greenwald (1972), dass sich kapazitätslimitierte Prozesse der Reaktionsauswahl in Wahlreaktionsaufgaben vollständig umgehen lassen, wenn die Stimuli weitgehend den sensorischen Handlungseffekten der geforderten Reaktionen entsprechen. Solche „ideomotor-kom-



patiblen“ Aufgaben, wie beispielsweise das vokale Imitieren eines auditiv präsentierten Buchstabens oder die Bewegung eines Joysticks in Richtung eines Pfeils, würden “perfectly efficient timesharing” (Greenwald, 1972, S. 52) erlauben. Gemeint ist das simultane Ausführen weiterer Wahlreaktionsaufgaben, ohne dass es zu einer Verlangsamung einer der beiden Aufgaben oder einer Interferenz zwischen den Aufgaben kommt. Tatsächlich konnte Greenwald in mehreren Studien zeigen, dass die Reaktionszeiten zweier kombinierter, ideomotor-kompatibler Aufgaben in der Doppelaufgabenbedingung nicht signifikant länger waren als in der Einzelaufgabenbedingung (Greenwald, 1972; Greenwald & Shulman, 1973; Greenwald, 2003).

Greenwalds Befunde sind vor allem von der Arbeitsgruppe um Lien kontrovers diskutiert worden, insbesondere hinsichtlich der Interpretation residualer Doppelaufgabenkosten (Lien, Proctor & Allen, 2002; Lien, McCann, Ruthruff & Proctor, 2005b; Lien, Proctor & Ruthruff, 2003; Lien, McCann, Ruthruff & Proctor, 2005a). Auch die fehlgeschlagenen Versuche, *perfectly efficient timesharing* in Doppelaufgaben unter Verwendung nur einer ideomotor-kompatiblen Aufgabe zu replizieren (Klapp, Porter-Graham & Hoifeld, 1991; Lien et al., 2002), deuten darauf hin, dass Reaktionsauswahlprozesse selbst bei hoher Ähnlichkeit von Stimuli und Handlungseffekten Kapazitätsbeschränkungen unterliegen. Weiterhin scheint die erfolgreiche Replikation der Befunde Greenwalds an die minutiöse Einhaltung bestimmter Rahmenbedingungen geknüpft zu sein; hierzu gehören unter anderem eine geblockte Variation des Intervalls zwischen beiden Aufgaben sowie die explizite Instruktion paralleler Verarbeitung (Greenwald, 2004, 2005). Nichtsdestotrotz weist die deutliche Reduktion von Doppelaufgabenkosten, die in dieser Größenordnung auch mit hochgradig kompatiblen oder überlernten Stimulus-Reaktions-Zuordnungen nicht zu erzielen ist (für einen Überblick siehe Lien & Proctor, 2002), auf einen engen Zusammenhang von Effektkodeaktivierung und Reaktionsauswahl-Flaschenhals in Doppelaufgaben hin.

Im Hinblick auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit gilt es jedoch zu beachten, dass ideomotor-kompatible Wahlreaktionsaufgaben einen Son-

derfall der Handlungselektion darstellen, welcher eher dem Bereich der Imitation zuzuordnen ist (siehe hierzu auch Brass, 2000). Derzeit ist noch unklar, welche Prozesse im Vergleich zu Wahlreaktionsaufgaben mit arbiträren Stimulus-Reaktions-Zuordnungen verkürzt ablaufen oder gänzlich eliminiert sind (Lien et al., 2005b). In der vorliegenden Arbeit wird daher ein anderer Ansatz verfolgt. Anstatt zu versuchen, Doppelaufgabenkosten zu eliminieren, soll der Reaktionsauswahl-Flaschenhals genutzt werden, um den Zeitpunkt der Effektkodeaktivierung zu lokalisieren. Hierzu diene das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode (PRP), welches es ermöglicht, in Wahlreaktionsaufgaben experimentelle Manipulationen relativ zu verschiedenen Verarbeitungsprozessen zu lokalisieren.

## 3.2 Das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode

Das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode entstammt der Forschung zu Doppeltätigkeitssituationen (Überblick bei Heuer, 1996). Ursprünglich diene es der Untersuchung der zeitlichen Mikrostruktur der zu beobachtenden Leistungseinbußen (Vince, 1949; Welford, 1952, 1967). In den letzten Jahren ist es jedoch, basierend auf der Vorgehensweise von Pashler und Johnston (1989) sowie McCann und Johnston (1992), verstärkt zur zeitlichen Lokalisation experimenteller Manipulationen genutzt worden (Bausenhardt, Rolke, Hackley & Ulrich, 2006; Cleland, Gaskell, Quinlan & Tamminen, 2006; Jolicoeur & Dell'Acqua, 1999; Lien, Schweickert & Proctor, 2003; Magen & Cohen, 2002, 2005; Miller & Reynolds, 2003; Müller & Schwarz, 2007; Oriet & Jolicoeur, 2003; Reynolds & Besner, 2006; Schuch & Koch, 2004; Tombu & Jolicoeur, 2002; Vu & Proctor, 2006).

In einem PRP Experiment müssen Probanden auf zwei aufeinanderfolgende Stimuli jeweils so schnell wie möglich eine Wahlreaktion ausführen. Das Darbietungsintervall zwischen beiden Stimuli, die *Stimulus onset asyn-*

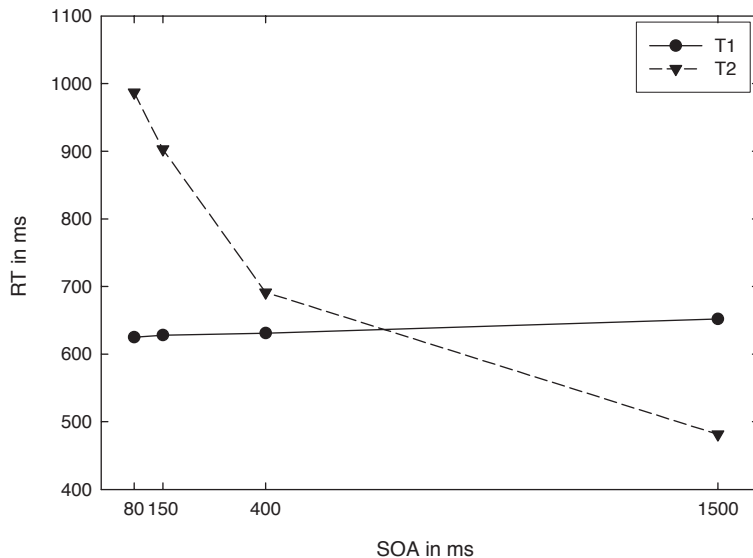


Abbildung 3.1: Die „Psychologische Refraktärperiode“ (idealisierte Daten). Probanden haben auf zwei kurz nacheinander präsentierte Stimuli zwei Reaktionen auszuführen. Der PRP-Effekt bezeichnet die Zunahme der Reaktionszeit (RT) auf den zweiten Stimulus bei Verkürzung der Stimulus Onset Asynchrony (SOA) zwischen beiden Aufgaben (T1 und T2).

*chrony* (SOA) wird zwischen den Durchgängen variiert, was zu einer unterschiedlichen zeitlichen Überlappung der beiden Aufgaben führt. Üblicherweise wird die Leistung in der Erstaufgabe kaum vom Grad der Überlappung beeinflusst; die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe sind dagegen bei kurzem SOA massiv verlängert (Abbildung 3.1). Diese Verzögerung wird seit Telford (1931) als „Psychologische Refraktärperiode“ bzw. PRP-Effekt bezeichnet. Bei langem SOA liegen die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe wiederum nur unwesentlich über denen vergleichbarer Einzelaufgaben.

### 3.2.1 Reaktionsauswahl als Flaschenhals

Wie der Name bereits andeutet, vermutete Telford (1931) als Ursache für den PRP-Effekt eine temporäre Reduktion der Reaktionsbereitschaft, vergleichbar mit der Refraktärphase postsynaptischer Neurone. Mittlerweile gibt es zahlreiche empirische Evidenz dafür, dass ein Verarbeitungsengpass („Flaschenhals“) bzw. begrenzte Verarbeitungsressourcen hinsichtlich der Reaktionsauswahl für den Großteil der Reaktionszeitkosten verantwortlich sind (Pashler, 1994a; Pashler & Johnston, 1998). So findet sich ein robuster PRP-Effekt bei der Kombination sehr einfacher Aufgaben, selbst wenn keine Konflikte zwischen den Stimulus- oder Reaktionsmodalitäten bestehen (zur Rolle der Modalitäten siehe Hazeltine, Ruthruff & Remington, in press). Auch die Verwendung einfacher, überlernter Aufgaben wie beispielsweise das Bremsen beim Autofahren (Levy, Pashler & Boer, 2006) oder exzessive Übung (Gottsdanker & Stelmach, 1971; Van Selst, Ruthruff & Johnston, 1999) führen nicht zum Verschwinden der Interferenz zwischen den Aufgaben. Manipulationen der Schwierigkeit der Reaktionsauswahl durch Variation der Anzahl der Reaktionsalternativen, der Stimulus-Reaktions-Zuordnung oder der Sequenz der Reize und damit der Reaktionen innerhalb der Aufgaben (Repetition vs. Alternation) haben dagegen einen deutlichen Einfluss auf die Größe des PRP-Effekts. Alle aktuellen Erklärungsmodelle teilen daher die Annahme des Engpasses hinsichtlich der Reaktionsauswahl und unterscheiden sich nur unwesentlich in der Vorhersage von Interaktionen des PRP-Effektes mit anderen experimentellen Manipulationen (für eine ausführliche Diskussion siehe Miller & Reynolds, 2003).

Unterschiede zwischen den Erklärungsmodellen gibt es zum einen hinsichtlich der Frage, inwieweit der Engpass struktureller (Pashler, 1984; Pashler & Johnston, 1989) oder strategischer Natur ist (Logan & Gordon, 2001; Meyer & Kieras, 1997). Bislang gibt es jedoch kaum empirische Hinweise für die von Meyer und Kieras (1998) vertretene Hypothese, dass sich ein strategisch bedingter Flaschenhals unter bestimmten Bedingungen eliminieren lässt, was für eine strukturell inhärente Beschränkung spricht (Ruthruff,

Pashler & Klaassen, 2001; Tombu & Jolicoeur, 2004). Weiterhin differieren die verschiedenen Theorien hinsichtlich der Ressourcenaufteilung zwischen den Reaktionsauswahlprozessen beider Aufgaben während des Engpasses.

Das dominierende Flaschenhalsmodell von Pashler (1984, 1994a) geht davon aus, dass reaktionsbezogene Prozesse die vorhandenen Ressourcen vollständig in Anspruch nehmen und daher strikt seriell ablaufen. Dies führt bei kurzem SOA zu einer Verarbeitungspause in der Zweitaufgabe (“cognitive slack”; Schweickert, 1978), bis die Reaktionsauswahl der Erstaufgabe abgeschlossen ist. Problematisch für die Annahme strikter Serialität reaktionsbezogener Prozesse sind jedoch die in einer Reihe von Studien gefundenen rückwärtsgerichteten Kompatibilitätseinflüsse von der Zweit- auf die Erstaufgabe, sofern diese gemeinsame reaktionsbezogene Merkmale aufweisen (Hommel, 1998a; Hommel & Eglau, 2002; Lien & Proctor, 2000; Logan & Gordon, 2001; Miller & Alderton, 2006). Solche inhaltsspezifischen Interferenzen zwischen den beiden Aufgaben werden auch als *Crosstalk* bezeichnet, insofern sie auf ein Übersprechen offensichtlich parallel ablaufender Prozesse hindeuten (Koch, in press). Von dem klassischen Flaschenhalsmodell lassen sich diese Befunde daher nicht ohne die zusätzliche Annahme einer zumindest teilweisen parallelen Verarbeitung erklären, da die Reaktionsauswahl der Zweitaufgabe nicht vor dem Abschluss der Reaktionsauswahl der Erstaufgabe beginnen kann.

### 3.2.2 Modelle gradueller Ressourcen-Aufteilung

Eine viable Alternative zum Flaschenhalsmodell bieten Ressourcenmodelle, die von einer kontinuierlichen, parallelen Reaktionsauswahl ausgehen, wobei sich beide Aufgaben im Engpass begrenzte Verarbeitungsressourcen graduell aufteilen (“graded capacity sharing”, Navon & Miller, 2002; Tombu & Jolicoeur, 2003). Die für das PRP-Paradigma charakteristische Verzögerung in der Zweitaufgabe wird dadurch erklärt, dass die Aufteilung der Ressourcen zunächst deutlich zugunsten der Erstaufgabe erfolgt (Tombu & Jolicoeur, 2002). In ihren Vorhersagen unterscheiden sich Kapazitätsmodelle

von Flaschenhalsmodellen (die sich letztlich als Spezialfall auffassen lassen, in welchem die Ressourcenaufteilung nach dem Alles-oder-Nichts Prinzip erfolgt) lediglich hinsichtlich der Reaktionszeiten in der Erstaufgabe. Bedingt durch die angenommene parallele Bearbeitung der Zweitaufgabe sollte es auch hier bei kurzem SOA zu Verzögerungen kommen. Die Vorhersage des Einflusses des SOAs auf die Erstaufgabe konnte von Tombu und Jolicoeur (2002) in einer eigenen Studie zwar bestätigt werden; in vielen anderen PRP-Experimenten sowie auch in den Experimenten der vorliegenden Arbeit zeigt sich jedoch dahingehend kein konsistentes Befundmuster.

Weiterhin gibt es eine Reihe von empirischen Befunden, die gegen eine flexible Ressourcenaufteilung zwischen beiden Aufgaben sprechen. So scheint es beispielsweise trotz expliziter Instruktion nicht möglich, die Verarbeitungskapazität annähernd gleichmäßig auf beide Aufgaben aufzuteilen (Pashler, 1994b; Ruthruff et al., 2001; Ruthruff, Pashler & Hazeltine, 2003). Ebenso ergaben mathematische Simulationen empirischer Reaktionszeitdaten durch Ressourcenmodelle eine residuale Verarbeitungskapazität für die Zweitaufgabe in einer Größenordnung von nur 10–20 Prozent (Tombu & Jolicoeur, 2002). Nicht nur die geringe Bandbreite der Distributionsquoten spricht gegen eine flexible Aufteilung der Ressourcen. Auch ist es angesichts dieser absolut gesehenen niedrigen Werte fraglich, inwieweit die parallel ablaufenden Prozesse tatsächlich funktionell der Reaktionsauswahl dienen; womöglich handelt es sich nur um eine unzureichende Hemmung stimulusbasierter Aktivierung der geforderten Reaktionen (Lien, Ruthruff, Hsieh & Yu, 2007).

Auch hinsichtlich der für die vorliegende Arbeit relevanten Interaktion des PRP-Effekts mit Kompatibilitätseffekten innerhalb der Erst- oder Zweitaufgabe entsprechen die vorliegenden Befunde nicht den Vorhersagen der Modelle gradueller Ressourcenaufteilung. So wäre beispielsweise zu erwarten, dass Manipulationen der Reaktionsauswahl in der Erstaufgabe bei kurzem SOA und entsprechender zeitlicher Überlappung der Aufgaben aufgrund der dann reduzierten Verarbeitungskapazität zu überproportionalen Verzögerungen führen. Ruthruff et al. (2003) fanden jedoch, dass der Ein-

fluss der Kompatibilität des S–R Mappings über verschiedene SOA-Stufen hinweg annähernd konstant bleibt. Bei kurzem SOA übertrugen sich die Kompatibilitätseffekte außerdem auf die jeweils nachfolgende Aufgabe, was für eine direkte, serielle Abfolge der Reaktionsauswahlprozesse spricht.

Letztendlich gibt es sowohl aus physiologischen als auch bildgebenden Studien Hinweise auf eine tatsächliche Unterbrechung von Reaktionsauswahlprozessen in der Zweitaufgabe. So fanden Osman und Moore (1993), dass nicht nur die Reaktion selbst, sondern auch das lateralisierte Bereitschaftspotential der Zweitaufgabe bezogen auf die Stimuli verzögert wird (siehe hierzu auch Lien et al., 2007). Dux, Ivanoff, Asplund und Marois (2006) konnten anhand zeitlich aufgelöster, funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) zeigen, dass es im PRP-Paradigma bei kurzem SOA zu einer Unterbrechung der Aktivierung im posterioren lateralen Präfrontalkortex (im Grenzbereich zwischen präfrontalem und prämotorischem Kortex, Brodman Areal 9) sowie im supplementär-motorischen Areal kommt. Der posteriore Präfrontalkortex wiederum wurde von Marois und Ivanoff (2005) in einem Review neurobiologischer Befunde zum PRP-Effekt als wesentliches neuronales Substrat des Flaschenhalses benannt.

Ebenfalls unter Verwendung von fMRT fanden Jiang, Saxe und Kanwisher (2004) innerhalb des PRP-Paradigmas bei kurzem im Vergleich zu langem SOA keine vermehrte Aktivierung in Gehirngebieten, welche mit den für eine graduelle Ressourcenaufteilung notwendigen exekutiven Kontrollprozessen assoziiert sind. Einige der zwölf untersuchten Gehirnregionen, darunter der dorsolaterale und der ventrolaterale Präfrontalkortex, der anteriore zinguläre Kortex, das präsupplementär-motorische Areal und der intraparietale Sulcus, reagierten in der gleichen Studie sensitiv auf andere experimentelle Manipulationen, deren Einfluss auf die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe wiederum deutlich unter dem des PRP-Effektes lag. Nach Ansicht der Autoren spricht das Fehlen einer mit dem PRP-Effekt korrespondierenden, vermehrten Aktivierung in diesen Regionen bei kurzem SOA für ein passives *Queuing* der vom Engpass betroffenen Reaktionsauswahlprozesse. Zusammengefasst muss daher, entgegen den Annahmen von

Ressourcenmodellen, von einem zumindestens teilweise seriellen Ablauf reaktionsbezogener Prozesse ausgegangen werden.

### 3.2.3 Zwei-Prozess-Modelle der Reaktionsauswahl

Offensichtlich ist die Annahme einer graduellen Aufteilung kapazitätslimitierter Verarbeitungsressourcen hinsichtlich der Reaktionsauswahl in ihrer ursprünglichen Formulierung nicht haltbar. Wie oben bereits erwähnt gibt es jedoch eine Reihe neuerer Befunde, die ebenfalls das klassische Reaktionsauswahl-Flaschenhals-Modell in Frage stellen (Hommel, 1998a; Hommel & Eglau, 2002; Logan & Gordon, 2001; Miller & Alderton, 2006). Diese Studien haben gezeigt, dass bei dimensionaler Überlappung zwischen beiden Aufgaben die Reaktionszeit in der Erstaufgabe durch Reaktionsauswahlprozesse der Zweitaufgabe beeinflusst wird. So erfolgt beispielsweise die Reaktion in der Erstaufgabe schneller, wenn in der Zweitaufgabe eine hierzu räumlich kompatible Reaktion gefordert ist. Wenn – wie vom Flaschenhalsmodell angenommen – die Auswahl der Reaktion der Zweitaufgabe jedoch nicht vor Abschluss der Reaktionsauswahl in der Erstaufgabe beginnen kann, bleibt unklar, wie der zeitlich später ablaufende Prozess den vorangehenden beeinflussen kann.

Wie bereits Hommel (1998a) anmerkte, schließen solche rückwärts gerichteten Kompatibilitätseffekte die Existenz eines Flaschenhalses der Reaktionsauswahl nicht aus. Hommels Erklärung beruht auf der Unterscheidung reaktionsbezogener Prozesse in zwei Komponenten, der automatischen Reaktions-*Aktivierung* und der instruktionsbasierten Reaktions-*Auswahl*. Diese eigentliche Auswahl einer Reaktion erfolgt auf der Grundlage der instruierten und memorierten Reiz-Reaktions-Zuordnungsregeln und läuft seriell ab. Dies schließt jedoch laut Hommel nicht aus, dass – funktionell unabhängig und mehr oder weniger gleichzeitig – die parallel ablaufende Identifikation der Stimuli automatisch zur Aktivierung der assoziierten Reaktionen führt (“... response activation does not wait until selection starts but begins right after stimulus identification.”, S. 1381). Diese automatische



Aktivierung basiert offenbar nicht auf den memorierten Instruktionsregeln, sondern auf erlernten, direkten Stimulus-Reaktions-Assoziationen, die bereits nach kurzer Übung entstehen (Hommel & Eglau, 2002).

Weitere empirische Evidenz für die von Hommel (1998a) angenommene automatische, stimulus-basierte Aktivierung von Reaktionen fand sich bei Lien und Proctor (2000). In mehreren PRP-Experimenten wurde die Interaktion des Simon-Effekts (vgl. Abschnitt 2.2.2) mit dem SOA untersucht. In allen Experimenten waren sowohl in der Erst- wie in der Zweitaufgabe räumliche Reaktionen gefordert. Im Ergebnis kam es bei kurzem SOA zum Übersprechen des Simon-Effekts von der Zweit- auf die Erstaufgabe, das heißt, auch die Reaktion in der Erstaufgabe erfolgte schneller, wenn die Lokation des Stimulus der Zweitaufgabe hierzu räumlich kompatibel war. Demnach üben nicht nur die tatsächlich geforderte Reaktion, sondern auch aufgabenirrelevante Stimulusmerkmale der Zweitaufgabe einen Kompatibilitätseinfluss auf die Reaktion der Erstaufgabe aus (siehe hierzu auch Müsseler, Koch & Wühr, 2005).

Basierend auf diesen Befunden und den Vorarbeiten von Hommel (1998a) hat Lien (2001, siehe auch Lien & Proctor, 2002) ein interaktives Modell des PRP-Effektes vorgeschlagen, welches ebenfalls zwei Komponenten der Reaktionsauswahl annimmt, zum einen die Reaktionsaktivierung sowie zum anderen die finale Reaktionsauswahl (siehe Abbildung 3.2):

Die Reaktionsaktivierung durch Stimulus-Reaktions-Übersetzung kann automatisch und für beide Aufgaben parallel erfolgen. Die Aktivierung selbst erfolgt auf der Basis direkter Assoziationen zwischen Stimuli und Reaktionen, die bereits nach kurzer Lernerfahrung entstehen (Hommel & Eglau, 2002). Jedoch wirken auch aufgabenirrelevante Stimulusmerkmale reaktionsaktivierend, sofern bereits entsprechende Assoziationen bestehen oder vorher gebildet wurden (Lien & Proctor, 2000). Offensichtlich wird dies bei bestehender dimensionaler Überlappung zwischen den beiden Aufgaben. Hier kommt es zu Interferenzen zwischen den parallel ablaufenden Aktivierungsprozessen, dem sogenannten *Crosstalk*, da nun auch die der alternativen Aufgabe zugeordneten Stimuli reaktionsaktivierend wirken.

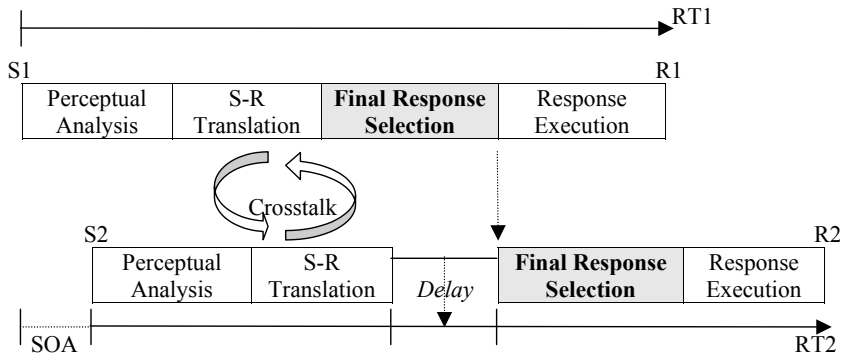


Abbildung 3.2: Liens (2001) Zwei-Komponenten-Modell der Reaktionsauswahl innerhalb des PRP-Paradigmas (Abbildung aus: *An interactive conception of the psychological refractory period effect*, M.-C. Lien, S. 148 ©2001 Purdue University)

Prinzipiell scheint eine automatische Reaktionsaktivierung jedoch unabhängig von der Kontingenz der Aufgaben zu sein (Lien et al., 2007).

Für die letztendliche Auswahl der Reaktion ist dann die zweite Komponente, die finale Reaktionsauswahl, verantwortlich. Diese stellt den eigentlichen Flaschenhals dar und kann zu einem Zeitpunkt nur für jeweils eine Aufgabe erfolgen. Im PRP-Paradigma kann die Reaktionsauswahl der Zweitaufgabe somit erst beginnen, wenn die Reaktionsauswahl der Erstaufgabe abgeschlossen ist. Selbst bei hoher Ähnlichkeit der Stimuli mit den geforderten Reaktionen bzw. deren Effekten oder massiver Übung lassen sich diese Kapazitätsbeschränkungen nicht umgehen (Lien et al., 2002).

### 3.3 Lokalisierung experimenteller Faktoren

Das interaktive PRP-Modell von Lien (Lien, 2001; Lien & Proctor, 2002) ist sehr mächtig, ermöglicht es doch die Beschreibung sowohl des Zeitverlaufs

der Informationsverarbeitung in Doppelaufgaben als auch der Beschaffenheit der Interferenz zwischen den Aufgaben. Die präzise Charakterisierung des Ablaufs der verschiedenen Verarbeitungsprozesse ist jedoch nicht nur für die Untersuchung der Doppelaufgaben-Interferenz an sich relevant, sondern ermöglicht außerdem konkrete Vorhersagen für die Interaktion experimenteller Manipulationen mit dem PRP-Effekt, welche es wiederum erlauben, Rückschlüsse auf den zeitlichen Ablauf der von den Manipulationen betroffenen Prozesse innerhalb der Aufgaben zu ziehen. Für die zeitliche Lokalisation experimenteller Faktoren relativ zu den spezifischen Verarbeitungsprozessen sind die darauf aufbauenden Prozeduren von entsprechender theoretischer Bedeutung.

In der vorliegenden Arbeit werden drei Prozeduren angewendet, um die Wirkung experimenteller Faktoren relativ zu den reaktionsbezogenen Verarbeitungsprozessen zu lokalisieren. Relativ neu ist in diesem Zusammenhang die Verwendung sogenannter "Cross-task" Kompatibilitätseffekte, die sich bei dimensionaler Überlappung zwischen den beiden Aufgaben finden (siehe bspw. Lien et al., 2005b). Weithin verbreitet sind dagegen die "Locus-of-slack" und "Effect-propagation" Prozedur, die bei inhaltlich unabhängigen Aufgaben anwendbar sind (für die Unterscheidung inhaltsspezifischer vs. prozessbasierter Interferenz zwischen den Aufgaben siehe Koch, in press; Koch & Jolicoeur, 2006).

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass alle drei Prozeduren auf der Annahme eines Flaschenhalses in der Informationsverarbeitung basieren, das heißt, das bestimmte Prozesse in der Zweitaufgabe erst beginnen, sobald sie für die Erstaufgabe abgeschlossen sind. Wie Miller und Reynolds (2003) darlegen, hängen diese Prozeduren damit letztlich nur von der schwächeren Annahme ab, dass Prozesse innerhalb des Flaschenhalses *üblicherweise* seriell ablaufen, nicht jedoch von der stärkeren Annahme, dass sie dies in jedem Fall müssen. Wie bereits dargestellt gibt es für die schwächere Annahme, insbesondere bei relativ ungeübten Wahlreaktionsaufgaben und unter Verwendung arbiträrer Stimulus-Reaktions-Zuordnungen, zahlreiche empirische Evidenz, so dass Flaschenhalsmodelle als angemessene Beschreibung

des Verarbeitungsablaufes innerhalb des PRP-Paradigmas angesehen werden können. Die darauf aufbauenden Prozeduren sind somit unabhängig von der Frage, ob die überwiegend serielle Verarbeitung Folge eines strukturellen Flaschenhalses oder strategisch ungleich verteilter Ressourcen ist.

### 3.3.1 Cross-task Kompatibilitätseffekte

Sogenannte *Cross-task* Kompatibilitätseffekte treten in Doppelaufgaben auf, wenn beide Aufgaben hinsichtlich aufgabenrelevanter Merkmale, wie beispielsweise der Lokation der Reaktionen, dimensional überlappen (eine Ausnahme scheinen hierbei nur ideomotor-kompatible Aufgaben zu bilden, siehe Lien et al., 2005b). Die Korrespondenz der betreffenden Merkmale wirkt sich auf die Aufgabenbearbeitung zeitlich gesehen nicht nur vorwärts, das heißt von der Erst- auf die Zweitaufgabe, sondern auch rückwärts, von der Zweit- auf die Erstaufgabe, aus (Lien & Proctor, 2000). Rückwärts gerichtete Korrespondenzeffekte hängen naturgemäß deutlich von der zeitlichen Überlappung der beiden Aufgaben ab und finden sich in nennenswerter Größe nur bei hinreichend kurzem SOA (Hommel, 1998a; Lien & Proctor, 2000). Dies deutet darauf hin, dass die Stimuli bei kurzem SOA noch vor der seriellen Reaktionsauswahl parallel die zugeordneten Reaktionen aktivieren (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Aufbauend auf der Unterscheidung paralleler, automatischer Reaktionsaktivierung und serieller, finaler Reaktionsauswahl (Hommel, 1998a; Lien, 2001; Lien & Proctor, 2002) ergeben sich prüfbare Vorhersagen für Kompatibilitätseffekte, wie sie in einfachen Wahlreaktionsaufgaben aus einer dimensional Merkmalsüberlappung der Stimuli mit den Reaktionen resultieren (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese werden in der Regel dadurch erklärt, dass die betreffenden Stimulus-Merkmale automatisch die korrespondierenden Reaktionen aktivieren. Durch die Variation der Kompatibilität von Stimuli und Reaktionen lässt sich somit die Schwierigkeit der Aufgabe, mithin die Reaktionszeiten und Fehlerraten, manipulieren: Im kompatiblen Fall wird die geforderte Reaktion aktiviert, im inkompatiblen Fall dagegen eine

alternative Reaktion, welche zugunsten der tatsächlich geforderten Reaktion inhibiert werden muss.

Da die Prozesse der automatischen Reaktionsaktivierung im PRP-Paradigma bei kurzem SOA für beide Aufgaben parallel ablaufen, sollten sich diese Kompatibilitätseffekte, sofern sie tatsächlich auf der automatischen Aktivierung der Reaktionen beruhen, auch zwischen den beiden Aufgaben finden lassen. Hierzu ist es hinreichend, dass im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung der Zweitaufgabe Merkmale aktiviert werden, die auch für die Reaktion in der Erstaufgabe relevant sind (Lien & Proctor, 2002, S. 235):

On the basis of this approach, automatic response activation, by its nature, will occur across tasks when there is similarity along any dimension for the two tasks, regardless of whether the S–R relation involves long-term or short-term task-defined associations. In other words, this activation is not subject to the bottleneck and can occur simultaneously for both tasks.

Obwohl keine dimensionale Überlappung innerhalb der Aufgaben besteht, und damit in keiner der beiden Aufgaben für sich allein genommen Kompatibilitätseffekte zu erwarten sind, sollte es bei kurzem SOA zu einer Interferenz der dann parallel ablaufenden Reaktionsaktivierungen beider Aufgaben analog zu Einzelaufgaben kommen. Entsprechend sollten im inkompatiblen Fall die Reaktionsaktivierung der Erst- und Zweitaufgabe gegenüber dem kompatiblen Fall verzögert sein. Die daraus resultierende Reaktionszeitverlängerung in der Erstaufgabe würde sich aufgrund der seriellen Reaktionsauswahl bei kurzem SOA außerdem vollständig auf die Zweitaufgabe übertragen (siehe Abbildung 3.3).

Für Kompatibilitätseffekte, die innerhalb des PRP-Paradigmas *cross-task* konzipiert werden, resultieren aus diesen Überlegungen eindeutige Vorhersagen: Sofern diese Kompatibilitätseffekte Prozesse der Reaktionsaktivierung betreffen, sollten sie bei hinreichend kurzem SOA in beiden Aufgaben in vergleichbarer Größenordnung auftreten. Darüber hinaus sollten sie in der

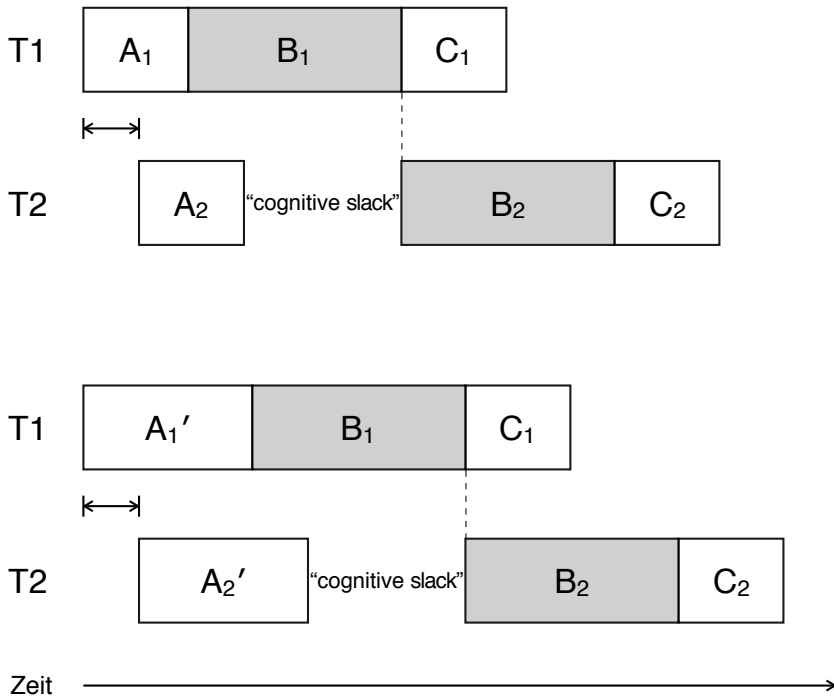


Abbildung 3.3: Die *Cross-task* Prozedur. Der Prozess *B* stellt den Flaschenhals dar; bei dargestelltem kurzen SOA und daraus resultierender zeitlicher Überlappung beider Aufgaben kann dieser Prozess in der Zweitaufgabe (T2) erst beginnen, sobald er in der Erstaufgabe (T1) abgeschlossen ist. Prozesse vor dem Engpass (*A*, *C*) können dagegen für beide Aufgaben parallel ablaufen. Aufgabenübergreifende Manipulationen, die bei kurzem SOA zu Interferenzen von Prozessen vor dem Flaschenhals (*A*<sub>1</sub>', *A*<sub>2</sub>') führen, sollten aufgrund der seriell ablaufenden nachfolgenden Prozesse zu Verzögerungen in beiden Aufgaben und in vergleichbarer Größe führen.

Erstaufgabe überadditiv mit dem SOA interagieren, das heißt, sie sollten bei vollständiger Überlappung der Aufgaben am größten sein und mit zunehmenden SOA kleiner werden. Ein Maximum entsprechender Kompatibilitätseffekte bei einem größeren SOA würde hingegen auf einen späteren Wirkungszeitpunkt der Interferenz zwischen beiden Aufgaben hinweisen. Findet sich das Maximum beispielsweise bei einem SOA in der Größenordnung der Reaktionszeit der Erstaufgabe, so würde dies eher für einen Einfluss der Zweitaufgabe auf die Reaktionsinitiierung bzw. -ausführung der Erstaufgabe sprechen.

### 3.3.2 Locus-of-slack Prozedur

Das PRP-Paradigma kann anhand zwei weiterer Prozeduren zur Lokalisierung experimenteller Faktoren relativ zum Engpass genutzt werden. Im Gegensatz zu den inhaltspezifischen *Cross-task* Kompatibilitätseffekten beruhen diese Prozeduren auf prozessbasierten Interferenzen zwischen den beiden Aufgaben, die in Doppelaufgaben auch ohne aufgabenübergreifende dimensionale Überlappung auftreten (vgl. Koch, in press; Koch & Jolicoeur, 2006). Beide Prozeduren sind gut etabliert (vgl. Abschnitt 3.2); eine ausführliche Darstellung findet sich beispielsweise bei Lien und Proctor (2002), Miller und Reynolds (2003) sowie Pashler und Johnston (1998).

In der relativ häufig verwendeten *Locus-of-slack* Prozedur (McCann & Johnston, 1992) wird der zu lokalisierende experimentelle Faktor in der Zweitaufgabe implementiert. Die kritische Manipulation besteht in der Variation des SOAs zwischen beiden Aufgaben. Anhand der Interaktion des experimentellen Faktors mit dem SOA lässt sich dabei unterscheiden, ob die Manipulation Prozesse a) vor oder b) während bzw. nach dem Engpass beeinflusst. Für die beiden Alternativen resultieren eindeutige Vorhersagen: Beeinflusst der Faktor in der Zweitaufgabe Prozesse vor dem Engpass, dann sollte der Effekt bei kurzem SOA reduziert bzw. gar nicht auftreten, da sich eine Verlängerung dieser Prozesse während der Wartezeit der Zweitaufgabe, dem "Cognitive slack" (Schweickert, 1978), nicht auf die Reaktionszeiten

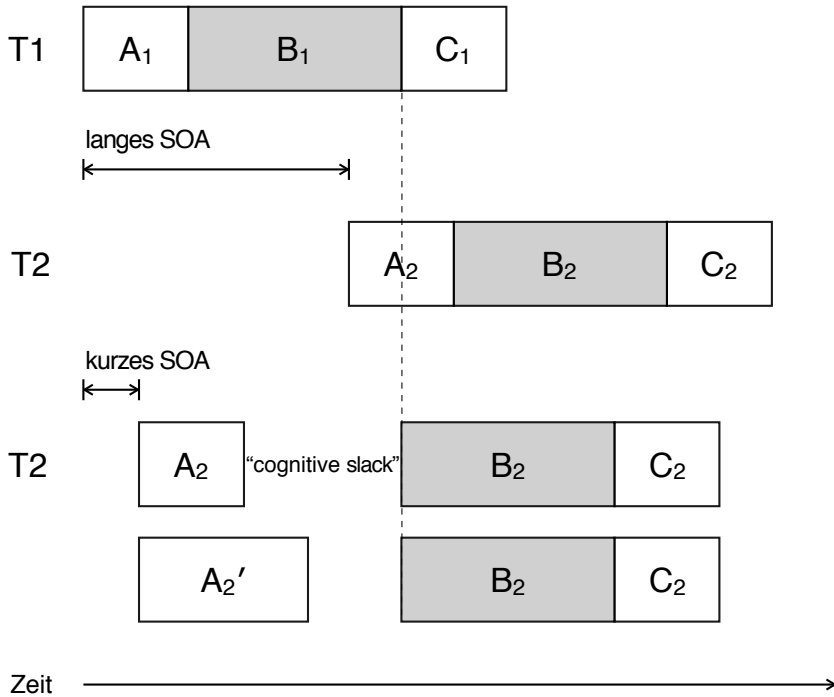


Abbildung 3.4: Die *Locus-of-slack* Prozedur. Der zu lokalisierende experimentelle Faktor wird in der Zweitaufgabe implementiert. Die kritische Manipulation besteht in der Variation des SOAs. Bei kurzem SOA wirken sich Manipulationen von Prozessen vor dem Flaschenhals der Zweitaufgabe ( $A_2$ ) nicht auf die Reaktionszeit aus, da die Reaktionszeitverlängerung in den entstehenden "cognitive slack" absorbiert wird. Manipulationen von Prozessen während oder nach dem Engpass wirken sich dagegen unabhängig vom SOA auf die Reaktionszeiten aus.

auswirkt (vgl. Abbildung 3.4). Daraus resultiert letztlich eine unteradditive Wechselwirkung des Faktors mit dem SOA. Beeinflusst der Faktor in der



Zweitaufgabe dagegen Prozesse, die während oder nach dem Engpass ablaufen, so wird der Einfluss nicht in den *Cognitive slack* absorbiert und wirkt sich demnach unabhängig vom SOA auf die Reaktionszeiten aus. Dies führt zu einer additiven Wechselwirkung mit dem SOA.

### 3.3.3 Effect-propagation Prozedur

Die dritte, bislang weniger häufig eingesetzte *Effect-propagation* Prozedur (vgl. Ferreira & Pashler, 2002; Miller & Reynolds, 2003) komplementiert die *Locus-of-slack* Prozedur insofern, als dass sich hiermit unterscheiden lässt, ob experimentelle Manipulation Prozesse a) vor bzw. während oder b) nach dem Engpass beeinflussen. Die kritische Manipulation besteht erneut in der Variation des SOAs zwischen beiden Aufgaben. Der zu lokalisierende Faktor wird jedoch in der Erstaufgabe implementiert. Abhängig von der Lokation der beeinflussten Prozesse resultieren unterschiedliche Vorhersagen darüber, in welchem Ausmaß der experimentelle Faktor auch die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe beeinflusst, obwohl diese inhaltlich von der Erstaufgabe unabhängig ist:

Beeinflusst der Faktor in der Erstaufgabe Prozesse vor oder während dem Engpass, dann sollte sich der Effekt bei kurzem SOA in voller Größe auf die Zweitaufgabe übertragen, da sich die durch den Engpass verursachte Wartezeit der Zweitaufgabe entsprechend verlängert (vgl. Abbildung 3.5). Beeinflusst der Faktor in der Erstaufgabe dagegen ausschließlich Prozesse, die nach dem Engpass ablaufen, so sollte sich kein Effekt auf die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe finden. Für den Fall, dass experimentelle Manipulationen Prozesse sowohl vor bzw. während als auch nach dem Engpass beeinflussen, sollte der Einfluss in der Zweitaufgabe geringer ausfallen als in der Erstaufgabe. Anhand des Verhältnisses der Effektgrößen in der Erst- und Zweitaufgabe lässt sich zudem im Nachhinein abschätzen, zu welchem Teil die Manipulation Prozesse vor bzw. während oder nach dem Engpass beeinflussen.

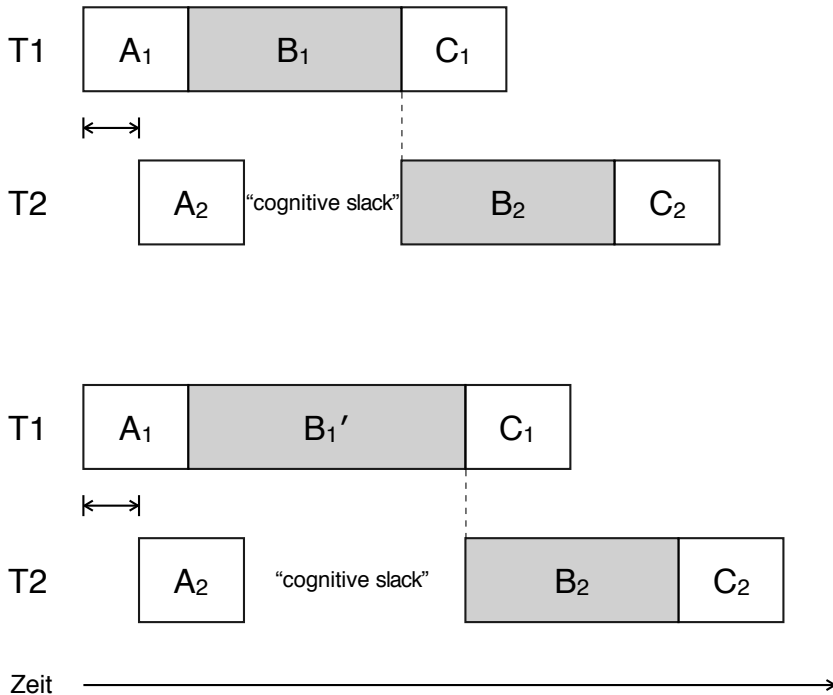


Abbildung 3.5: Die *Effect-propagation* Prozedur. Der zu lokalisierende experimentelle Faktor wird in der Erstaufgabe implementiert. Bei dargestelltem kurzen SOA wirken sich Manipulationen von Prozessen vor oder während des Flaschenhalses der Erstaufgabe ( $B_1$ ) in vollständiger Größe auch auf die Reaktionszeit der Zweitaufgabe aus, da sich der durch den Engpass verursachte *cognitive slack* in der Zweitaufgabe entsprechend verlängert. Manipulationen von Prozessen in der Erstaufgabe nach dem Engpass wirken sich dagegen nicht auf die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe aus.

# **Teil II**

## **Empirischer Teil**



# Kapitel 4

## Überblick über den Experimentalteil

Im empirischen Teil dieser Arbeit soll detailliert untersucht werden, inwieweit Effektantizipation und Handlungsauswahl tatsächlich funktional äquivalent sind (vgl. Abschnitt 2.3). Hierzu sollen innerhalb des PRP-Paradigmas die im letzten Abschnitt 3.3 vorgestellten Prozeduren *Cross-task*, *Locus-of-slack* und *Effect-propagation* genutzt werden. Durch Prüfung eindeutiger Vorhersagen zur Interaktion des PRP-Effekts mit dem als Indikator fungierenden Phänomen der Handlungs-Effekt Kompatibilität (vgl. Abschnitt 2.2) soll damit der Aktivierungszeitpunkt der Repräsentationen sensorischer Handlungseffekte innerhalb von Wahlreaktionsaufgaben bestimmt werden.

Im ersten Kapitel des Experimentalteils werden die Experimente 1–4 berichtet, deren Ziel die Lokalisierung des Einflusses antizipierter Handlungseffekte war (vgl. Abschnitt 2.2.2). Entsprechend wurde hier die Kompatibilität zwischen den geforderten Reaktionen und darauf folgenden Handlungseffekten variiert (siehe Tabelle 4.1). Experiment 1 basierte auf der aufgabenübergreifenden *Cross-task* Prozedur, das heißt die Kompatibilitätsbeziehung bestand zwischen den Reaktionen der Erstaufgabe und den Handlungseffekten der Zweitaufgabe. Dies ermöglichte die Prüfung der Hypothese, dass die

Tabelle 4.1: Überlappende Dimensionen von Stimuli, Reaktionen und reaktionskontingenten Handlungseffekten in den Experimenten 1–7.

Experiment	Aufgaben	Stimuli	Reaktionen	Handlungseffekte
1	1–2	—	Druck	Intensität
2	2	—	Druck	Intensität
3	2	—	Farbe	Farbe
4	1	—	Druck	Intensität
5 <sup>a</sup>	2	Größe	—	Größe
6	2	Frequenz	Dauer	Frequenz & Dauer
7	2	Lokation	Lokation	Lokation

<sup>a</sup>Testphase.

Aktivierung von Effektrepräsentationen automatisch und für beide Aufgaben parallel erfolgt. In den Experimenten 2 und 3 wurde die *Locus-of-slack* Prozedur genutzt, um den Beginn der Aktivierung von Effektrepräsentationen relativ zum Engpass der finalen Reaktionsauswahl zu bestimmen. Die Variation der Kompatibilität der Reaktionen mit zusätzlichen Handlungseffekten erfolgte hier ausschliesslich in der Zweitaufgabe. Während in Experiment 2 Reaktionen und Handlungseffekte hinsichtlich eines anschaulichen Merkmals überlappten, basierte die Kompatibilitätsbeziehung in Experiment 3 auf abstrakten Merkmalen. In Experiment 4 wurde die Reihenfolge der Aufgaben getauscht, um anhand der *Effect-propagation* Prozedur zu prüfen, ob die Aktivierung von Effektrepräsentationen noch innerhalb des Engpasses abgeschlossen ist.

Im zweiten Kapitel des Experimenterteils werden die Experimente 5 und 6 berichtet, in denen die Aktivierung der Effektrepräsentation zusätzlich exogen stimuliert wurde. Der Induktionslogik folgend (vgl. Abschnitt 2.2.1) wurden hierzu Merkmale der Handlungseffekte in die Stimuli integriert. In Experiment 5 wurde ausschließlich die Kompatibilität der effektähnlichen

Stimuli mit den Handlungseffekten der geforderten Reaktion variiert. In Experiment 6 wurde die Kompatibilität nachfolgender Handlungseffekte sowohl mit den Reaktionen als auch den Stimuli variiert. Dies sollte die Replikation der vorangehenden Befunde zu exogen bzw. endogen aktivierten Effektrepräsentationen innerhalb eines einzigen Experimentes ermöglichen.

Im dritten Kapitel des Experimentalteils wird schließlich das Experiment 7 berichtet, in dem die Versuchspersonen explizit instruiert wurden, distale Handlungseffekte herzustellen. Dies ermöglichte es, die Kompatibilität intendierter Effekte mit den zur Herstellung notwendigen manuellen Reaktionen als auch den Stimuli zu variieren.





# Kapitel 5

## Antizipierte Effekte

### 5.1 Experiment 1

Ziel des ersten Experiments war es, anhand der *Cross-task* Prozedur zu prüfen, ob die Aktivierung der Repräsentationen von Handlungseffekten automatisch, noch vor dem Reaktionsauswahlflaschenhals, erfolgt. Falls dies der Fall ist, sollten Kompatibilitätseffekte zwischen antizipierten Effekten und Reaktionen, die sich reliabel innerhalb einer Aufgabe zeigen lassen, auch zwischen zwei Aufgaben auftreten.

Entsprechend wurde in Doppelaufgaben die Kompatibilität zwischen den Reaktionen der Erstaufgabe und den Handlungseffekten der Zweitaufgabe variiert. Hierzu führten Versuchspersonen in veränderlichem Zeitabstand (SOA) zwei Wahlreaktionsaufgaben nacheinander aus. Erstaufgabe war eine binäre Tonhöhenunterscheidung. Versuchspersonen reagierten mit einem sanften oder kräftigen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. In der Zweitaufgabe reagierten die Versuchspersonen auf einen Buchstaben mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Hier erfolgte die Präsentation zusätzlicher, auditiver Handlungseffekte. Beispielsweise folgte auf einen linken Tastendruck ein

leiser Gong, auf den rechten Tastendruck dagegen ein lauter Gong.

Da die Stimuli und damit die geforderten Reaktionen der Zweitaufgabe unabhängig von denen der Erstaufgabe waren, konnte so zusätzlich zum SOA zwischen den Aufgaben die R–E Kompatibilität der Handlungseffekte der Zweitaufgabe (Intensität des Gongs) mit den Reaktionen der Erstaufgabe (Intensität des Tastendrucks) variiert werden. Beispielsweise ergab sich ein kompatibler Durchgang aus der Kombination eines tiefen Tons, welcher einen sanften Tastendruck mit dem rechten Zeigefinger erforderte, und dem Buchstaben *H*, welcher einen Tastendruck mit dem Mittelfinger der linken Hand (Zweitaufgabe) erforderte, da dieser wiederum einen leisen Gong produzierte. Wurde nach einem tiefen Ton dagegen der Buchstabe *S* präsentiert, so resultierte ein inkompatibler Durchgang, da nun ein Tastendruck mit dem linken Zeigefinger erforderlich war, was einen lauten Gong produzierte.

Aus Sicht der ideomotorischen Hypothese erfordert die Auswahl der beiden Reaktionen die Antizipation deren Handlungseffekte und damit die Aktivierung der entsprechenden Effektkodes. Im Fall der Erstaufgabe handelt es sich ausschließlich um proximale Handlungseffekte, das heißt die mehr oder weniger intensiven propriozeptiven Rückmeldungen, die bei sanftem bzw. kräftigem Niederdrücken der Drucktaste entstehen. In der Zweitaufgabe wurden dagegen zusätzliche distale Handlungseffekte präsentiert (der Gongklang). Im Laufe des Experimentes sollten Assoziationen zwischen diesen distalen Effekten und den Tastendrücken entstehen; der Gongklang sollte entsprechend für die Auswahl des Tastendrucks antizipiert werden. Erfolgt nun die Aktivierung der Repräsentationen sowohl proximaler als auch distaler Handlungseffekte automatisch, noch vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals, dann sollte es bei zeitlicher Überlappung beider Aufgaben und mithin paralleler Reaktionsaktivierung zu Interferenzen zwischen der Reaktion der Erstaufgabe und den antizipierten Effekten der Zweitaufgabe kommen, analog zur R–E Kompatibilität innerhalb einfacher Wahlreaktionsaufgaben.

Die *Cross-task* Prozedur erlaubt demnach folgende eindeutige Vorhersagen: Erstens sollten Reaktionszeiten der Zweitaufgabe bei kurzem SOA

verlängert sein (der übliche PRP-Effekt). Zweitens sollten sich, sofern die Effektkodes einer Handlung bereits vor der finalen Reaktionsauswahl, in der Phase der Reaktionsaktivierung, aktiviert werden, R–E Kompatibilitätseffekte zwischen den Aufgaben finden lassen. Das heißt, Reaktionen in der Erstaufgabe sollten in diesem Fall bei kurzem SOA schneller erfolgen, wenn die Reaktion in der Zweitaufgabe einen dazu kompatiblen Effekt erzeugt. Drittens kann ein solcher R–E Kompatibilitätseffekt von der Zweit- auf die Erstaufgabe nur bei hinreichend kurzem SOA auftreten, das heißt er sollte in der Erstaufgabe überadditiv mit dem PRP-Effekt interagieren. Werden die Effektkodes zweier Aufgaben jedoch nicht parallel, sondern seriell, das heißt erst während der Reaktionsauswahl, aktiviert, sollte sich kein entsprechender Einfluss finden.

Wie in Abschnitt 3.3.1 dargelegt, können rückwärtsgerichtete *Cross-task* Kompatibilitätseffekte prinzipiell nur bei kurzem SOA zwischen den beiden Aufgaben auftreten. Um die experimentelle Power zur Aufdeckung solcher Kompatibilitätseffekte zu maximieren, wurden neben einem langen SOA (1500 ms) drei vergleichsweise kurze SOAs (50, 100 bzw. 150 ms) gewählt. Das daraus resultierende schiefe Verhältnis kurzer zu langer SOAs (3:1) ist jedoch keineswegs nachteilig, insofern experimentelle Manipulationen der Verteilung von SOAs zeigten, dass die Wahrscheinlichkeit einer zumindest teilweise parallelen Verarbeitung mit einem größerem Anteil kurzer SOAs zunimmt (Miller, Ulrich & Rolke, in press).

## 5.1.1 Methoden

### Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nahmen 24 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

## Versuchsapparatur und Stimuli

Reizdarbietung und Datenaufzeichnung wurden über einen IBM-kompatiblen PC kontrolliert. Die Reize wurden auf einem 17 Zoll VGA-Monitor präsentiert; die Versuchspersonen saßen ca. 60cm vom Bildschirm entfernt. Die druckvariablen Reaktionen der Erstaufgabe wurden mit dem rechten Zeigefinger auf einer drucksensitiven Reaktionstaste (piezobasiert) ausgeführt. Der Reaktionsdruck wurde im Bereich von 0 cN bis 3000 cN erfaßt, wobei der Maximaldruck von 3000 cN einem Tastenhub von 0.5 mm entsprach. Der Reaktionsdruck wurde vom PC mit einer Abtastrate von 500 Hz gesampelt. Die Versuchspersonen wurden instruiert, den Zeigefinger so auf der Reaktionstaste zu positionieren, das ein permanenter Ruhedruck von 20–200 cN resultierte. Auf die Stimuli sollten die Versuchspersonen entweder mit einem schwachen Tastendruck (< 800 cN aber mehr als 200 cN) bzw. kräftigen Tastendruck (mehr als 800 cN) kurzer Dauer reagieren. Als Reaktionszeit wurde das Intervall zwischen dem Stimulus-Onset und dem Zeitpunkt definiert, an dem der Reaktionsdruck größer als 200 cN war. Der Maximaldruck wurde registriert, sobald der aktuelle Reaktionsdruck nicht mehr größer als einer der in den davor liegenden 8 ms erfaßten Reaktionsdrücke war. Die manuellen Reaktionen der Zweitaufgabe wurden mit dem Zeige- und Mittelfinger der linken Hand an zwei externen Tastern ausgeführt. Die Entfernung der beiden Tasten betrug von Mittelpunkt zu Mittelpunkt etwa 30 mm.

Imperative Stimuli der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) waren computergenerierte Sinustöne (300 bzw. 900 Hz, Dauer 56 ms), denen ein Warnklick (500 Hz, 20 ms) vorausging. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Buchstabenunterscheidung) waren die Buchstaben *H* und *S*. Die Höhe der Buchstaben betrug 15 mm. Zusätzlich wurde während des gesamten Experimentes ein Kreis mit einem Durchmesser von 30 mm als visueller Hinweisreiz präsentiert. Alle Stimuli wurden in der Mitte des Bildschirms in weißer Farbe auf grauem Hintergrund präsentiert. Als Reaktionseffekte der Zweitaufgabe dienten leise (Lautstärke 65 dB) bzw. laute (78 dB) Töne,

welche mit Hilfe zweier links bzw. rechts neben der Drucktaste positionierter Lautsprecher präsentiert wurden. Innerhalb von 500 ms nahm die Lautstärke zunächst zu und dann wieder ab, wodurch der Klangeindruck eines Gongs entstand.

### **Versuchsplan und Durchführung**

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in fünf durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Ein Experimentalblock umfasste 64 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben, wobei jede Kombination insgesamt viermal präsentiert wurde: Stimulus Erstaufgabe (hoher bzw. niedriger Ton), Stimulus Zweitaufgabe (Buchstabe *H* bzw. *S*) und SOA zwischen den beiden Stimuli (50, 100, 150 oder 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die acht Kombinationen aus SOA und R–E Kompatibilität je 40 Durchgänge. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Warnklick, gefolgt nach einem Intervall von 500 ms von dem niedrig- oder hochfrequenten Sinuston. Nach einem der vier SOAs wurde der Buchstabe *H* oder *S* für 500 ms präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Ton mit einem sanften oder kräftigen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Danach reagierten sie auf den Buchstaben mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Direkt nach dem Tastendruck ertönte der leise bzw. laute Gong. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Falls innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Die Versuchspersonen wurden instruiert, so schnell wie möglich zuerst auf den Ton und dann auf den Buchstaben zu reagieren, ohne dabei zu viele

Fehler zu begehen. Außerdem wurden sie informiert, dass jeder Tastendruck in der Zweitaufgabe einen Gong unterschiedlicher Intensität erzeugt, welcher für die Aufgabe jedoch irrelevant ist. Die Versuchspersonen wurden erneut instruiert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz der Reaktionen zu den nachfolgenden Reaktions-effekten. Vor Beginn des Experimentes konnten die Versuchspersonen 32 Probedurchgänge absolvieren.

## 5.1.2 Ergebnisse

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (6.0% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Die verbliebenen Durchgänge wurden getrennt für alle Kombinationen aus SOA  $\times$  R-E Kompatibilität und Versuchspersonen auf Ausreißer geprüft. Die Ausreißerbeseitigung für dieses und alle folgenden Experimente basierte auf einer Prozedur zur nicht-rekursiven Z-Wert Anpassung von Selst und Jolicoeur (1994) unter Verwendung einer SPSS-Syntax von Thompson (2006). Insgesamt wurden in Experiment 1 3.9% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer Varianzanalyse (ANOVA) mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (50, 100, 150 oder 1500 ms) und R-E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet. Soweit notwendig wurden die  $p$ -Werte nach Greenhouse und Geisser (1959) korrigiert. Das Signifikanzniveau für dieses und alle folgenden Experimente wurde auf  $p = .05$  festgelegt.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe (RT1) fiel bei kurzem SOA geringfügig größer aus,  $F(3, 69) = 3.38$ ,  $p = .04$ . Die Reaktionszeitdifferenzen gegenüber dem 1500-ms SOA betragen 11, 15 und 20 ms für das 50-, 100- bzw. 150-ms SOA (siehe Abbildung 5.1). Von wesentlichem Interesse war,

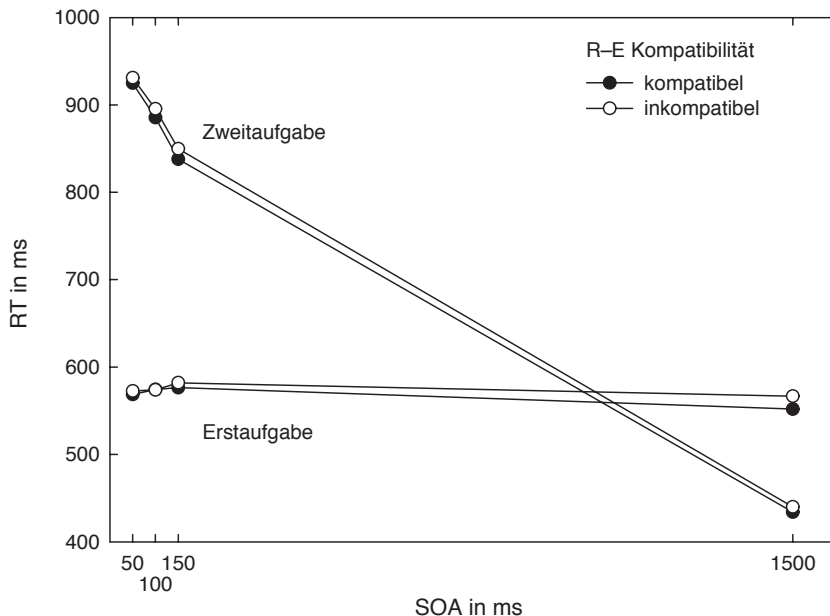


Abbildung 5.1: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 1 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions–Effekt (R–E) Kompatibilität zwischen der Erst- und Zweitaufgabe.

dass sich für die RT1 kein Effekt der Kompatibilität der Reaktionen mit den Reaktionseffekten in der Zweitaufgabe fand,  $F(1, 23) = 1.15$ ,  $p = .30$ . Ebenso fand sich keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R–E Kompatibilität,  $F(3, 69) = 0.71$ .

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 69) = 263.93$ ,  $p < .001$ . Wie für die RT1 fand sich auch für die RT2 kein Effekt der Kompatibilität der Reaktionen mit den Reaktionseffekten in der Zweitaufgabe,  $F(1, 23) = 0.67$ ,  $p = .30$ . Ebenso

fand sich keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R-E Kompatibilität,  $F(3, 69) = 0.08$ .

### **Fehlerraten**

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe betrug 4.3%. Kein Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .15$ ). Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe betrug 1.8%. Kein Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .14$ ).

### **5.1.3 Diskussion**

Experiment 1 zeigte zwei klare Ergebnisse. Zum einen fand sich der erwartete PRP-Effekt, das heißt, die Reaktionszeit in der Zweitaufgabe nahm mit Reduktion des SOAs deutlich zu, während die Reaktionszeit in der Erstaufgabe konstant blieb. Wesentlich für die Fragestellung war jedoch, dass sich kein aufgabenübergreifender Einfluss der Kompatibilität zwischen den Reaktionen und den Reaktionseffekten finden ließ, wie er sich dagegen in Einzelaufgaben reliabel zeigen ließ (Kunde, 2001; Kunde et al., 2004). Ein solcher Kompatibilitätseinfluss wäre jedoch aus Sicht der ideomotorischen Hypothese zu erwarten gewesen, wenn die in Doppelaufgaben beobachtbaren *Crosstalk*-Effekte (bspw. Hommel, 1998a; Lien & Proctor, 2000) auf Interferenzen zwischen parallel aktivierten Repräsentationen der sensorischen Effekte der beiden Aufgaben beruhen. In Experiment 1 gab es also keine Hinweise darauf, dass die automatische Reaktionsaktivierung auch die parallele Aktivierung von Effektrepräsentationen noch vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals mit einschließt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass Schlussfolgerungen basierend auf Nulleffekten immer mit entsprechender Vorsicht zu betrachten sind. Problematisch ist vor allem die geringe statistische Power, mit der Nulleffekte meist nur abgesichert werden können. Geht man von der Größenordnung der R-E Kompatibilitätseffekte in der Erstaufgabe von Experiment 4 bzw. der Zweitaufgabe von Experiment 2 aus, so ist die in Experiment 1 vorliegende



Stichprobengröße jedoch ausreichend, um einen Effekt vergleichbarer Größe mit einer statistischen Power ( $1 - \beta$ ) im Bereich von .80 – .95 zu entdecken (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, in press). Die in Doppelaufgaben gefundenen inhaltspezifischen Interferenzeffekte weisen üblicherweise sogar noch größere Effektstärken auf (siehe bspw. Hommel, 1998a; Koch & Jolicoeur, 2007). Daher kann mit ausreichender Sicherheit geschlossen werden, dass unter den Bedingungen der in Experiment 1 verwendeten *Cross-task* Prozedur kein aufgabenübergreifender R–E Kompatibilitätseffekt auftrat. In den nächsten Experimenten sollen R–E Kompatibilitätseffekte entsprechend anhand von Prozeduren lokalisiert werden, die auf prozessbasierter Interferenz beruhen (vgl. Abschnitt 3.3.2 bzw. 3.3.3).

## 5.2 Experiment 2

Ziel des zweiten Experimentes war es, anhand der *Locus-of-slack* Prozedur den Einfluss der R–E Kompatibilität zwischen Reaktionen und nachfolgenden Reaktionseffekten zu lokalisieren. Experiment 2 glich weitgehend Experiment 1, jedoch wurde die Kompatibilität zwischen den Reaktionen und den Reaktionseffekten ausschliesslich in der Zweitaufgabe variiert. Erstaufgabe war erneut eine binäre Tonhöhenunterscheidung. Versuchspersonen reagierten auf einen hohen oder tiefen Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Die wesentliche Manipulation fand in der Zweitaufgabe statt. Hier reagierten die Versuchspersonen auf einen Buchstaben mit einem sanften oder kräftigen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Diese Tastendrucke produzierten zusätzliche, auditive Handlungseffekte, die in unterschiedlichen Blöcken zur Reaktion entweder kompatibel (sanfter Tastendruck – leiser Gong, kräftiger Tastendruck – lauter Gong) oder inkompatibel (sanfter Tastendruck – lauter Gong, kräftiger Tastendruck – leiser Gong) waren. Diese Variante der R–E Kompatibilität führt in Einzelaufgaben zu Effektgrößen, die ausreichend groß sind, um im vorliegenden Experiment mögliche

Interaktionen mit dem SOA reliabel abzusichern.

Eine weitere Manipulation wurde als Kontrollvariable eingeführt: In der Zweitaufgabe wurden die Stimuli entweder maskiert oder unmaskiert präsentiert. In bisherigen PRP-Studien interagiert eine solche Maskierung unteradditiv mit dem SOA (Pashler & Johnston, 1989). Eine Replikation dieses Befundes würde im Falle eines erneuten Ausbleibens von R–E Kompatibilitätseffekten indizieren, dass dies nicht auf die gewählte Umsetzung des PRP-Paradigmas, sondern auf Doppelaufgabensituationen im allgemeinen zurückzuführen ist.

Ausgehend von der *Locus-of-slack* Prozedur ergeben sich folgende Erwartungen (vgl. Abschnitt 3.3.2): Erstens sollten Reaktionszeiten der Zweitaufgabe bei kurzem SOA verlängert sein (der übliche PRP-Effekt). Zweitens sollte sich die Maskierung der Reize unteradditiv zum SOA auswirken. Drittens sollten Reaktionszeiten in der Zweitaufgabe verlängert sein, wenn die Reaktion inkompatibel zu den zu erwartenden nachfolgenden Handlungseffekten ist. Viertens sollte sich dieser R–E Kompatibilitätseffekt unabhängig vom SOA finden lassen, das heißt er sollte additiv mit dem PRP-Effekt interagieren.

## 5.2.1 Methoden

### Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nahmen 48 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

## Versuchsapparatur und Stimuli

Es wurde die Versuchsapparatur aus Experiment 1 verwendet. Die manuellen Reaktionen der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) erfolgten mit dem Zeige- und Mittelfinger der linken Hand an zwei externen Tastern. Die Entfernung der beiden Tasten betrug von Mittelpunkt zu Mittelpunkt etwa 30 mm. Die druckvariablen Reaktionen der Zweitaufgabe (Buchstabenunterscheidung) wurden mit dem rechten Zeigefinger auf der drucksensitiven Reaktionstaste ausgeführt.

Die imperativen Stimuli sowie die Reaktionseffekte entsprachen Experiment 1. Zusätzlich wurden die Buchstaben in der Zweitaufgabe in der Hälfte der Trials durch ein X maskiert.

## Versuchsplan und Durchführung

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in sechs durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Ein Experimentalblock umfasste 64 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben, wobei jede Kombination insgesamt zweimal wiederholt wurde: Stimulus Erstaufgabe (hoher bzw. niedriger Ton), Stimulus Zweitaufgabe (Buchstabe *H* bzw. *S*), Maskierung des Stimulus in der Zweitaufgabe (maskiert bzw. nicht maskiert) und SOA zwischen den beiden Stimuli (80, 150, 400 oder 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die 16 Kombinationen aus SOA, Maskierung und R–E Kompatibilität je 24 Durchgänge. Die R–E Kompatibilität wurde geblockt variiert. Nach den ersten drei Blöcken wurde die Zurordnung von Reaktionen und Reaktionseffekten (R–E Mapping) getauscht. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen sowie die Reihenfolge der R–E Mappings wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Warnklick, gefolgt nach einem Intervall von 500 ms von dem niedrig- oder hochfrequenten Sinuston. Nach

einem der vier SOAs wurde der Buchstabe *H* oder *S* für 500 ms präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Danach reagierten sie auf den Buchstaben mit einem sanften oder kräftigem Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Nachdem der Reaktionsdruck sein Maximum erreicht hatte, ertönte der leise bzw. laute Gong. Bei kompatibelem R–E Mapping folgte ein lauter Gong auf einen kräftigen Tastendruck sowie ein leiser Gong auf einen sanften Tastendruck. Bei inkompatiblen R–E Mapping erfolgte die Zuordnung umgekehrt. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Wenn innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Die Versuchspersonen wurden explizit instruiert, so schnell wie möglich zuerst auf den Ton und dann auf den Buchstaben zu reagieren, ohne dabei zu viele Fehler zu begehen. Nach 32 Probedurchgängen ohne Reaktionseffekte wurden sie informiert, dass im darauf folgenden Experiment jeder Tastendruck auf der Drucktaste einen Gong unterschiedlicher Intensität erzeugt. Die Versuchspersonen wurden erneut instruiert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz zwischen den Reaktionen und den nachfolgenden Reaktionseffekten.

## 5.2.2 Ergebnisse

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (9.1% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in Experiment 2 4.8% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der

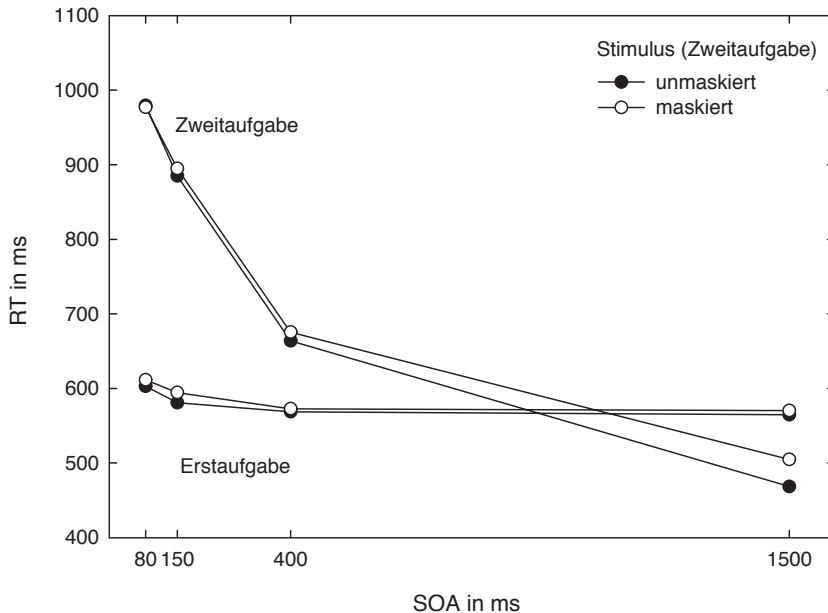


Abbildung 5.2: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 2 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Maskierung des Stimulus der Zweitaufgabe.

verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (80, 150, 400, oder 1500 ms), Maskierung des Stimulus in der Zweitaufgabe (maskiert oder unmaskiert) und R-E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe (RT1) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 141) = 20.73$ ,  $p < .001$ . Die RT1 fielen bei maskierten im Vergleich zu nicht maskierten Stimuli in der Zweitaufgabe 8 ms größer aus,  $F(1, 47) = 4.93$ ,  $p = .04$ . Dieser nur bei kurzem SOA numerisch präsente *Cross-task* Effekt (siehe Abbildung 5.2) indiziert möglicherweise ei-

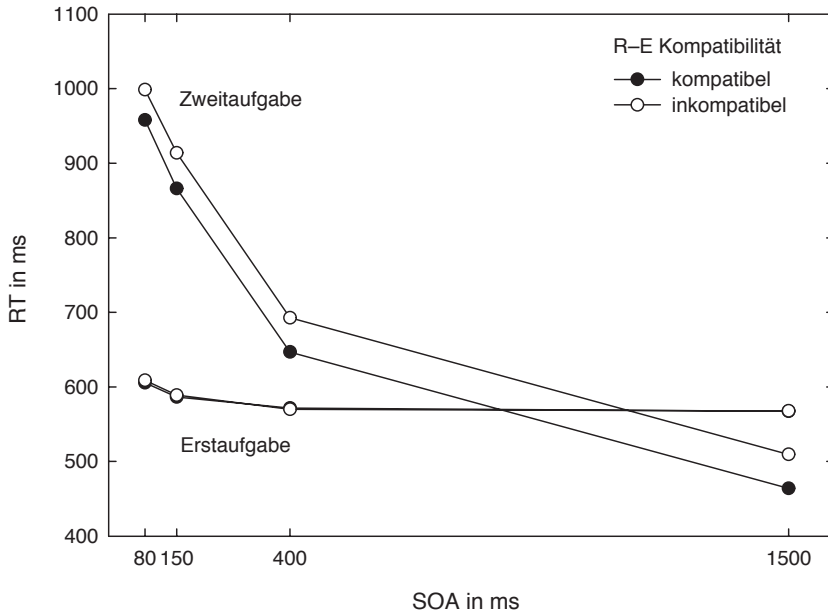


Abbildung 5.3: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 2 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions–Effekt (R–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

ne simultane, aufgabenübergreifende Beeinträchtigung parallel ablaufender perceptueller Verarbeitung (Pashler, 1989). Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .25$ ).

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 141) = 700.93$ ,  $p < .001$ . Die RT2 fielen bei maskierten im Vergleich zu nicht maskierten Stimuli in der Zweitaufgabe 14 ms größer aus,  $F(1, 47) = 13.71$ ,  $p < .01$ . Der Effekt der Maskierung nahm mit Reduktion des SOAs ab,  $F(3, 141) = 5.11$ ,  $p < .01$ , für die Interaktion von SOA und Maskierung (siehe Abbildung 5.2). Die Effektgrößen betragen  $-2$ ,

10, 12 und 36 ms für das 80-, 150-, 400- bzw. 1500-ms SOA.

Die RT2 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Reaktionseffekten 45 ms größer aus,  $F(1, 47) = 11.75$ ,  $p < .01$ . Von wesentlichem Interesse war, dass keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R–E Kompatibilität bestand,  $F(3, 141) = 0.12$ ; die Effektgrößen betragen 41, 48, 46 bzw. 46 ms für die vier SOA Stufen (siehe Abbildung 5.3). Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .29$ ).

### Fehlerraten

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe (PE1) betrug 3.0%. Die PE1 nahm monoton mit Reduktion des SOAs zu,  $F(3, 141) = 4.92$ ,  $p < .01$ . Die Fehlerraten betragen 3.6%, 3.1%, 3.1% und 2.3% für das 80-, 150-, 400- sowie 1500-ms SOA. Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .10$ ).

Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe (PE2) betrug 6.7%. Es gab einen signifikanten Haupteffekt des SOAs,  $F(3, 141) = 29.70$ ,  $p < .01$ . Die PE2 betragen 3.5%, 4.0%, 4.8% und 9.8% für das 80-, 150-, 400- bzw. 1500-ms SOA. Die hohe Fehlerrate beim längsten SOA geht möglicherweise auf einen *Speed–accuracy trade-off* zurück (Sangals, Roß & Sommer, 2004). Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .20$ ).

### 5.2.3 Diskussion

Experiment 2 zeigte mehrere Ergebnisse. Neben dem erwarteten PRP-Effekt fand sich ein Einfluss der Maskierung der Stimuli in der Zweitaufgabe. Dieser Effekt der Maskierung interagierte unteradditiv mit dem SOA; damit konnten bestehende Befunde zur Interaktion des PRP-Effekts mit Faktoren, welche die perzeptuelle Verarbeitung beeinflussen, repliziert werden (Pashler & Johnston, 1989).

Darüber hinaus konnte im Doppelaufgabenkontext der Einfluss der R–E Kompatibilität in einer mit Einzelaufgaben vergleichbaren Größenordnung (Kunde, 2001) repliziert werden. Wesentlich für die Fragestellung

war, dass sich dieser Kompatibilitätseinfluss additiv zum SOA verhielt. Der *Locus-of-slack* Logik folgend indiziert dieser Befund, dass die Variation der R–E Kompatibilität keine Prozesse vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beeinflusst und die Aktivierung von Effektrepräsentationen demzufolge nicht vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beginnt. Unterstützt wird diese Schlussfolgerung durch die beobachtete Unabhängigkeit der Faktoren Stimulus-Maskierung und R–E Kompatibilität, welche der *Additive-factors* Logik (Sternberg, 1969) folgend impliziert, dass beide Faktoren verschiedene Prozesse beeinflussen.

Eine mögliche Einschränkung für die obige Schlussfolgerung stellt jedoch die Verwendung kontinuierlicher, intensitätsvariabler Reaktionen dar. So könnten hinsichtlich der zugrunde liegenden Prozesse der Reaktionsauswahl Unterschiede zu den in Wahlreaktionsaufgaben üblicherweise verwendeten nicht-kontinuierlichen, ballistischen Reaktionen bestehen. So ist beispielsweise im vorliegenden Experiment das reaktionsdefinierende Merkmal der Intensität auf für die Anpassung der Reaktionsausführung relevant. Dies könnte jedoch mit der relativ „späten“ Aktivierung korrespondierender Effektrepräsentationen in Zusammenhang stehen. Aus diesem Grunde sollte der additive Einfluss der R–E Kompatibilität zum SOA in einem weiteren Experiment unter Verwendung von Reaktionen und Reaktionseffekten repliziert werden, die nicht hinsichtlich eines anschaulichen, sondern eines abstrakten Merkmals überlappten.

### 5.3 Experiment 3

Ziel des dritten Experiments war die Replikation der in Experiment 2 gefundenen additiven Wechselwirkung von R–E Kompatibilität und SOA unter Verwendung von Reaktionen und Effekten, die hinsichtlich des konzeptuellen Merkmals Farbe überlappen. Experiment 2 basierte wie Experiment 1 auf der *Locus-of-slack* Logik, das heißt die Kompatibilität zwischen den Reaktionen und den Reaktionseffekten wurde ausschliesslich in der Zweitaufgabe



variiert.

Die Erstaufgabe (binäre Tonhöhenunterscheidung) entsprach weitgehend dem Experiment 2. In der Zweitaufgabe reagierten die Versuchspersonen auf eine Zahl (1, 2, 3 oder 4) durch das Aussprechen eines Farbwortes („blau“, „gelb“, „grün“ oder „pink“). Der Beginn der Sprechreaktion triggerte die Präsentation eines Farbwortes auf dem Bildschirm (*BLAU*, *GELB*, *GRÜN* oder *PINK*). Alle Wörter wurden in der Farbe präsentiert, die sie bezeichneten. Wie in Experiment 2 erfolgte die Zuordnung dieser Effekte zu den Sprechreaktionen entweder kompatibel oder inkompatibel. Beispielsweise folgte bei kompatibler Zuordnung auf das Aussprechen von „grün“ vorhersehbar das Wort *GRÜN* in grüner Farbe, bei inkompatibler Zuordnung dagegen das Wort *BLAU* in blau.

Die Erwartungen entsprachen denen aus Experiment 2. Insbesondere sollten, unabhängig vom Einfluss des SOAs, die Reaktionszeiten in der Zweitaufgabe verlängert sein, wenn die Sprechreaktion inkompatibel zu den zu erwartenden Handlungseffekten ist.

### 5.3.1 Methoden

#### Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nahmen 48 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 8. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

#### Versuchsapparatur und Stimuli

Reizdarbietung und Datenaufzeichnung wurden über einen IBM-kompatiblen PC kontrolliert. Die Reize wurden auf einem 17 Zoll VGA-Monitor präsentiert; die Versuchspersonen saßen ca. 60 cm vom Bildschirm entfernt.

Die manuellen Reaktionen der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) erfolgten mit dem Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand an einer Maus, die an den parallelen Port des PCs angeschlossen war. Der Onset der vokalen Reaktionen der Zweitaufgabe (Ziffernunterscheidung) wurden mittels eines Headsets erfasst, dessen Mikrophon einen Voicekey ansteuerte. Die Identität der jeweiligen Reaktionen wurde durch den Versuchsleiter direkt nach der Darbietung der Reaktionseffekte über farblich markierte Tasten am Nummernblock der PC-Tastatur protokolliert. Die Online-Kodierung ermöglichte die unmittelbare Fehlerrückmeldung.

Die imperativen Stimuli der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) entsprachen Experiment 2. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Ziffernunterscheidung) waren die Ziffern 1, 2, 3, und 4. Die Ziffern wurden in einer Höhe von 15 mm innerhalb eines Kreises mit einem Durchmesser von 30 mm präsentiert. Analog zu Experiment 2 wurden die Ziffern in der Zweitaufgabe in der Hälfte der Trials durch ein X maskiert. Alle Stimuli wurden in der Mitte des Bildschirms in Weiß auf grauem Hintergrund präsentiert.

Als Reaktionseffekte der Zweitaufgabe dienten die Farbwörter *BLAU*, *GELB*, *GRÜN* und *PINK*. Alle Wörter wurden in Grossbuchstaben (gesamte Weite ungefähr 45 mm, Höhe ungefähr 15 mm) im unteren Teil des Bildschirms jeweils in der Farbe präsentiert, welche sie bezeichneten.

### **Versuchsplan und Durchführung**

Das Experiment bestand aus einer 60-minütigen Versuchssitzung, welche in acht durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Ein Experimentalblock umfasste 64 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben: Stimulus Erstaufgabe (hoher bzw. niedriger Ton), Stimulus Zweitaufgabe (Ziffer 1, 2, 3 bzw. 4), Maskierung des Stimulus in der Zweitaufgabe (maskiert bzw. nicht maskiert) und SOA zwischen den beiden Stimuli (80, 150, 400 oder 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die 16 Kombinationen aus SOA, Maskierung und R-E Kompatibilität je 32 Durch-

gänge. Die R–E Kompatibilität wurde geblockt variiert. Nach den ersten vier Blöcken wurde die Zuordnung von Reaktionen und Reaktionseffekten (R–E Mapping) getauscht. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen sowie die Reihenfolge der R–E Mappings wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Warnklick, gefolgt nach einem Intervall von 500 ms von dem niedrig- oder hochfrequenten Sinuston. Nach einem der vier SOAs wurde eine der Ziffern für 500 ms präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Ton mit einem linken oder rechten Mausklick mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der rechten Hand. Danach reagierten sie auf die Ziffer durch lautes Aussprechen eines Farbwortes („blau“, „gelb“, „grün“ oder „pink“). Unmittelbar nach der vokalen Reaktion wurden die Reaktionseffekte für 500 ms präsentiert. Bei kompatibelem R–E Mapping triggerte die vokale Reaktion die Präsentation des Farbwortes entsprechend der Farbe der geforderten Reaktion. Bei inkompatiblen R–E Mapping wurde ein Farbwort präsentiert, dessen Farbe nicht der geforderten Reaktion entsprach. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Falls innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann 2000 ms nach Protokollierung der verbalen Reaktion durch den Versuchsleiter.

Die Versuchspersonen wurden explizit instruiert, so schnell wie möglich zuerst auf den Ton und dann auf die Ziffer zu reagieren, ohne dabei zu viele Fehler zu begehen. Nach 32 Probedurchgängen ohne Reaktionseffekte wurden sie informiert, dass im darauf folgenden Experiment jede vokale Reaktion die Darbietung eines Farbwortes auslöst. Die Versuchspersonen wurden erneut instruiert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz zwischen den Reaktionen und den nachfolgenden Farbwörtern.

### 5.3.2 Ergebnisse

#### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (4.6% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in Experiment 3 5.0% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (80, 150, 400, oder 1500 ms), Maskierung des Stimulus in der Zweitaufgabe (maskiert oder unmaskiert) und R-E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe (RT1) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 141) = 35.14$ ,  $p < .001$ . Die Interaktion aus SOA  $\times$  Maskierung des Stimulus in der Zweitaufgabe  $\times$  R-E Kompatibilität war tendenziell signifikant,  $F(3, 141) = 2.52$ ,  $p = .06$ . In post-hoc Tukey HSD Tests (mit  $ps = .10$ ) fand sich jedoch kein tendenziell signifikanter Paarvergleich. Da ebenso in allen anderen Experimenten keine inhaltlich vergleichbare Wechselwirkung auftrat, ist dieser Effekt als unreliabel zu werten. Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .33$ ).

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 141) = 229.16$ ,  $p < .001$ . Die RT2 fielen bei maskierten im Vergleich zu nicht maskierten Stimuli in der Zweitaufgabe 14 ms größer aus,  $F(1, 47) = 18.02$ ,  $p < .001$ . Der Effekt der Maskierung nahm mit Reduktion des SOAs ab,  $F(3, 141) = 4.77$ ,  $p < .01$ , für die Interaktion von SOA und Maskierung (siehe Abbildung 5.4). Die Effektgrößen betragen 7, 4, 31 und 41 ms für das 80-, 150-, 400- bzw. 1500-ms SOA.

Die RT2 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Reaktionseffekten 33 ms größer aus,  $F(1, 47) = 3.97$ ,  $p < .05$ . Es bestand keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R-E Kompatibilität,  $F(3, 141) = 0.55$  (siehe Abbildung 5.5). Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze

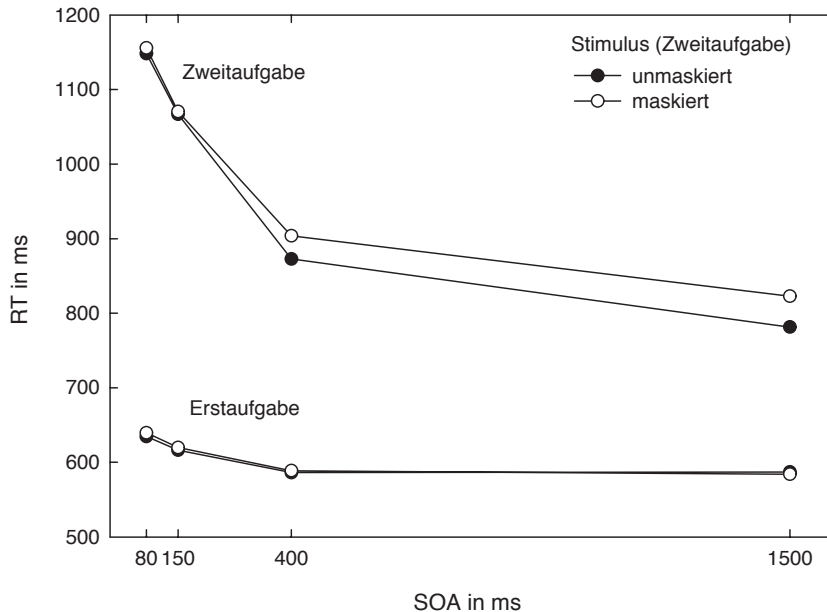


Abbildung 5.4: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 3 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Maskierung des Stimulus der Zweitaufgabe.

(alle  $F_s < 0.92$ ).

### Fehlerraten

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe (PE1) betrug 1.6%. Die PE1 nahm monoton mit Reduktion des SOAs zu,  $F(3, 141) = 12.71$ ,  $p < .001$ . Die Fehlerraten betragen 2.7%, 1.6%, 1.3% und 0.9% für das 80-, 150-, 400- sowie 1500-ms SOA. Die PE1 fielen bei maskierten Stimuli in der Zweitaufgabe 0.5% größer aus,  $F(1, 47) = 8.73$ ,  $p < .01$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $p_s > .29$ ).

Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe betrug 3.4%. Kein Effekt

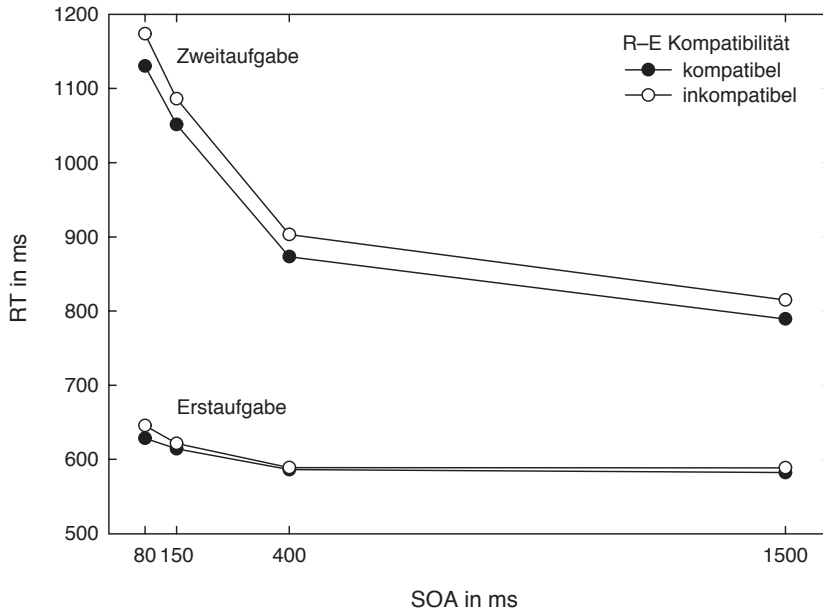


Abbildung 5.5: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 3 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions–Effekt (R–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .23$ ).

### 5.3.3 Diskussion

Die Ergebnisse in Experiment 3 replizieren vollständig die Ergebnisse aus Experiment 2. Zusammen mit dem erwarteten PRP-Effekt fand sich ein Einfluss der Maskierung der Stimuli in der Zweitaufgabe, der unteradditiv mit dem SOA interagierte. Überdies fand sich ein Einfluss der R–E Kompatibilität, basierend auf konzeptueller Überlappung zwischen Reaktionen und Reaktionseffekten, der sich additiv zum SOA verhielt. Ebenso waren der Einfluss der Stimulus-Maskierung sowie die R–E Kompatibilität erneut

unabhängig voneinander. Diese Befunde unterstützen deutlich die auf der *Locus-of-slack* Logik beruhende Schlussfolgerung, dass die Variation der R–E Kompatibilität keine Prozesse vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beeinflusst und die Aktivierung von Effektrepräsentationen entsprechend nicht vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beginnt.

Jedoch lässt sich allein anhand der *Locus-of-slack* Logik nicht beurteilen, wann die Aktivierung von Effektrepräsentationen abgeschlossen ist. So wäre bei einem ausschließlichen Einfluss der R–E Kompatibilität auf Prozesse nach dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals ebenfalls eine additive Wechselwirkung mit dem SOA zu erwarten. In einem weiteren Experiment soll daher anhand der *Effect-propagation* Prozedur (vgl. Abschnitt 3.3.3) geprüft werden, inwieweit die in Experiment 2 und 3 gefundene additive Wechselwirkung von R–E Kompatibilität und SOA auf einem Einfluss auf Prozesse der Reaktionsinitiierung bzw. -ausführung beruht.

## 5.4 Experiment 4

Ziel des vierten Experimentes war es, anhand der *Effect-propagation* Prozedur zu bestimmen, inwieweit die Variation der Kompatibilität zwischen Reaktionen und nachfolgenden Reaktionseffekten Prozesse während oder nach dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beeinflusst. Experiment 4 glich weitgehend Experiment 2 in dem Sinne, dass intensitätsvariable Reaktionen und Reaktionseffekte verwendet wurden, jedoch wurden der *Effect-propagation* Prozedur folgend die Reihenfolge der Aufgaben getauscht. Die Kompatibilität zwischen den Reaktionen und den Reaktionseffekten wurde somit ausschliesslich in der Erstaufgabe variiert.

Erstaufgabe war erneut eine binäre Tonhöhenunterscheidung. Versuchspersonen reagierten auf einen hohen oder tiefen Ton mit einem sanften oder kräftigen Tastendruck der rechten Hand, welcher in unterschiedlichen Blöcken kompatible bzw. inkompatible Handlungseffekte (lauter bzw. leiser Gongklang) erzeugt. Bei der Zweitaufgabe handelte es sich um eine dreifa-

che Wahlreaktionsaufgabe; Versuchspersonen reagierten auf einen farbigen Stimulus mit dem Zeige-, Mittel- bzw. Ringfinger der linken Hand.

Ausgehend von der *Effect-propagation* Prozedur ergeben sich folgende Erwartungen (vgl. Abschnitt 3.3.3): Erstens sollten Reaktionszeiten der Zweitaufgabe bei kurzem SOA verlängert sein (der übliche PRP-Effekt). Zweitens sollten Reaktionszeiten in der Erstaufgabe verlängert sein, wenn die Reaktion inkompatibel zu den zu nachfolgenden Handlungseffekten ist, unabhängig vom SOA. Drittens sollte sich der R–E Kompatibilitätseffekt der Erstaufgabe, sofern dieser ausschließlich Prozesse innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses beeinflusst, bei kurzem SOA in voller Größe auf die Zweitaufgabe übertragen. Beeinflusst die Variation der R–E Kompatibilität in der Erstaufgabe jedoch Prozesse nach dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals, so sollte sich der R–E Kompatibilitätseffekt der Erstaufgabe nicht bzw. nur in abgeschwächter Größe in der Zweitaufgabe finden.

### **5.4.1 Methoden**

#### **Versuchsteilnehmer**

An dem Experiment nahmen 24 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

#### **Versuchsapparatur und Stimuli**

Es wurde die Versuchsapparatur aus Experiment 1 verwendet. Die druckvariablen Reaktionen der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) wurden mit dem rechten Zeigefinger auf der drucksensitiven Reaktionstaste ausgeführt. Die manuellen Reaktionen der Zweitaufgabe (Farbenunterscheidung) erfolgten mit dem Zeige-, Mittel- und Ringfinger der linken Hand an drei



externen Tastern. Die Entfernung zweier Tasten betrug von Mittelpunkt zu Mittelpunkt etwa 30 mm.

Die imperativen Stimuli der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) entsprachen Experiment 1. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Farbenunterscheidung) waren farbige Kreise (gelb, grün und blau) mit einem Durchmesser von 45mm. Die Kreise wurden in der Mitte des Bildschirms auf grauem Hintergrund präsentiert. Die Reaktionseffekte der Erstaufgabe waren die in der Zweitaufgabe des ersten und zweiten Experimentes verwendeten Gongklänge.

### **Versuchsplan und Durchführung**

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in acht durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Ein Experimentalblock umfasste 48 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben, wobei jede Kombination insgesamt zweimal präsentiert wurde: Stimulus Erstaufgabe (hoher bzw. niedriger Ton), Stimulus Zweitaufgabe (gelber, grüner bzw. blauer Farbkreis) und SOA zwischen den beiden Stimuli (80, 150, 400 oder 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die acht Kombinationen aus SOA und R-E Kompatibilität je 48 Durchgänge. Die R-E Kompatibilität wurde geblockt variiert. Nach den ersten vier Blöcken wurde die Zuordnung von Reaktionen und Reaktionseffekten (R-E Mapping) getauscht. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen sowie die Reihenfolge der R-E Mappings wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Warnklick, gefolgt nach einem Intervall von 500 ms von dem niedrig- oder hochfrequenten Sinuston. Nach einem der vier SOAs wurde der Farbkreis für 500 ms präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Ton mit einem sanften oder kräftigen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Danach reagierten sie auf den Farbkreis mit einem Tastendruck mit dem Zeige-, Mittel- oder

Ringfinger der linken Hand.

Nachdem der Reaktionsdruck in der Erstaufgabe sein Maximum erreicht hatte, ertönte der leise bzw. laute Gong. Bei kompatibelem R–E Mapping folgte ein lauter Gong auf einen kräftigen Tastendruck sowie ein leiser Gong auf einen sanften Tastendruck. Bei inkompatiblen R–E Mapping erfolgte die Zuordnung umgekehrt. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Wenn innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Die Versuchspersonen wurden explizit instruiert, so schnell wie möglich zuerst auf den Ton und dann auf den Farbkreis zu reagieren, ohne dabei zu viele Fehler zu begehen. Nach 32 Probedurchgängen ohne Reaktionseffekte wurden sie informiert, dass im darauf folgenden Experiment jeder Tastendruck auf der Drucktaste einen Gong unterschiedlicher Intensität erzeugt. Die Versuchspersonen wurden erneut instruiert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz zwischen den Reaktionen und den nachfolgenden Reaktionseffekten.

## 5.4.2 Ergebnisse

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (7,6% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in Experiment 4 4,8% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (80, 150, 400, oder 1500 ms) und R–E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe (RT<sub>1</sub>) nahm mit Reduk-

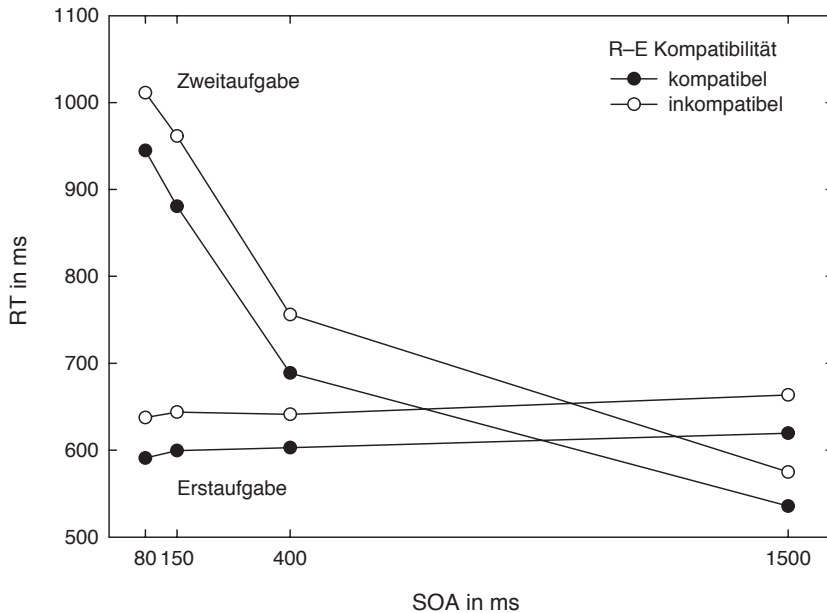


Abbildung 5.6: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 4 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions-Effekt (R-E) Kompatibilität in der Erstaufgabe.

tion des SOAs monoton ab,  $F(3, 69) = 4.66$ ,  $p = .02$ . Die RT1 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Reaktionseffekten 43 ms größer aus,  $F(1, 23) = 5.85$ ,  $p = .02$  (siehe Abbildung 5.6). Es bestand keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R-E Kompatibilität,  $F(3, 69) = 0.18$ .

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 69) = 183.06$ ,  $p < .001$ . Die RT2 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Reaktionseffekten in der Erstaufgabe 63 ms größer aus,  $F(1, 23) = 5.99$ ,  $p = .02$  (siehe Abbildung 5.6). Die Interaktion von SOA und R-E Kompatibilität war nicht signifikant,  $F(3, 69) = 1.27$ ,

$p = .29$ . Von wesentlichem Interesse war, dass die Effektgröße des Einflusses der R–E Kompatibilität in der Zweitaufgabe im Vergleich zur Erstaufgabe nicht geringer ausfiel,  $F(1, 23) = 1.81$ ,  $p = .19$ . Mit Ausnahme des 1500 ms SOAs fielen die Effektgrößen in der Zweitaufgabe numerisch sogar größer aus.

### **Fehlerraten**

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe betrug 4.6%. Kein Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .23$ ).

Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe (PE2) betrug 3.7%. Es gab einen signifikanten Haupteffekt des SOAs,  $F(3, 69) = 5.76$ ,  $p < .01$ . Die PE2 betrugen 3.1%, 2.7%, 3.9% und 5.1% für das 80-, 150-, 400- bzw. 1500-ms SOA. Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .20$ ).

### **5.4.3 Diskussion**

Experiment 4 zeigte mehrere Ergebnisse. Neben dem erwarteten PRP-Effekt fand sich ein Einfluss der R–E Kompatibilität in der Erstaufgabe. Wie auch in Experiment 2 lag die Effektgröße in einer mit Einzelaufgaben vergleichbaren Größenordnung (Kunde, 2001).

Das für die Fragestellung wesentliche Ergebnis war jedoch, dass sich die Manipulation der R–E Kompatibilität in der Erstaufgabe auch auf die Zweitaufgabe auswirkte, obwohl keinerlei dimensionale Überlappung hinsichtlich der Stimuli, Reaktionen oder Reaktionseffekte zwischen beiden Aufgaben bestand. Der Kompatibilitätseffekt in der Zweitaufgabe lässt sich daher nur dadurch erklären, dass sich bei hinreichend grosser zeitlicher Überlappung beider Aufgaben die R–E Kompatibilitätseffekte der Erstaufgabe auf die Zweitaufgabe übertrugen.

Der *Effect-propagation* Logik folgend indiziert die vollständige Propagation der Effekte von der Erst- auf die Zweitaufgabe, dass die reaktionsbezogenen Prozesse der Erstaufgabe, welche durch Variation der R–E Kompatibilität

beeinflusst werden, abgeschlossen sind, noch bevor der Reaktionsauswahl-Flaschenhals wieder freigegeben ist. Zusammen mit den Ergebnissen aus den vorangegangenen Experimenten unterstützt dieser Befund die Schlussfolgerung, dass die Aktivierung von Effektrepräsentationen innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses beginnt und noch vor dem Ende des Flaschenhalses bzw. dem Beginn der Reaktionsinitiierung abgeschlossen ist.



# Kapitel 6

## Induzierte Effekte

### 6.1 Experiment 5

Wie im theoretischen Teil dieser Arbeit (Abschnitt 2.2.1) berichtet, stand am Beginn der empirischen Forschung zur ideomotorischen Hypothese die Frage nach dem Einfluss wahrgenommener Handlungseffekte im Sinne induzierter Handlungen. Ziel des fünften Experiments war die Klärung der Frage, inwieweit solche extern stimulierten Handlungseffekte ebenfalls Prozesse innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses beeinflussen, wie es in den vorangegangenen Experimenten für antizipierte und demnach endogen aktivierte Handlungseffekte gezeigt werden konnte. Zur Beantwortung dieser Frage anhand der *Locus-of-slack* Prozedur wurden der Induktionslogik folgend zuvor eingeführte distale Handlungseffekte in die Stimuli der Zweitaufgabe integriert.

Das Experiment 5 wurde in eine Lernphase sowie eine Testphase unterteilt (vgl. Elsner & Hommel, 2001; Hommel, 1996). In der Lernphase hatten die Versuchspersonen auf einen neutralen Stimulus mit einem frei gewählten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der rechten Hand zu reagieren. Jeder Tastendruck produzierte kontingent visuelle Effekte auf

dem Bildschirm. Beispielsweise löste ein Tastendruck mit dem Zeigefinger die Darbietung eines kleinen Kreises aus, während ein Tastendruck mit dem Mittelfinger einen großen, den gesamten Bildschirm füllenden Kreis produzierte. Modelle zum Erwerb effektbasierter Handlungsrepräsentationen (siehe bspw. Elsner & Hommel, 2001) nehmen an, dass solche kontingent auftretenden Handlungseffekte automatisch in die kognitiven Repräsentationen der entsprechenden Handlungen integriert werden. Im vorliegenden Beispiel sollten mit zunehmender Lernerfahrung Tastendrucke mit dem Zeigefinger mit dem Erscheinen kleiner Kreise assoziiert werden, Tastendrucke mit dem Mittelfinger dagegen mit großen Kreisen.

Die Testphase des Experiments 5 entsprach den vorangegangenen, auf der *Locus-of-slack* Prozedur basierten Experimenten 2 bzw. 3. Erstaufgabe war erneut eine binäre Tonhöhenunterscheidung. Versuchspersonen reagierten auf einen hohen oder tiefen Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Die wesentliche Manipulation fand in der Zweitaufgabe statt. Hier reagierten die Versuchspersonen auf Kreise mit einem roten oder grünen Rand mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der rechten Hand. Von entscheidender Bedeutung war jedoch die aufgabenirrelevante Größe der Kreise, welche den Handlungseffekten der Lernphase entsprach. Insofern die Größe unabhängig von der Farbe der Kreisränder variierte, konnte somit die Kompatibilität der stimulierten Handlungseffekte mit den reaktionsassoziierten Handlungseffekten aus der Lernphase, demnach die Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilität, manipuliert werden. Beispielsweise erforderte in einem kompatiblen Durchgang ein kleiner Kreis mit einem roten Rand einen Tastendruck mit dem Zeigefinger, welcher wiederum in der Lernphase zur Darbietung eines kleinen Kreises führte. Aus der Kombination eines kleinen Kreises mit einem grünen Rand resultierte dagegen ein inkompatibler Durchgang, da nun ein Tastendruck mit dem Mittelfinger gefordert war, welche zuvor zur Darbietung großer Kreise führten.

Aus Sicht der ideomotorischen Hypothese ergeben sich eine Reihe von Erwartungen für das Experiment 5. In der Lernphase sollten Assoziationen



zwischen den präsentierten distalen Effekten (den Kreisen) und den Tastendrücken entstehen; mithin sollte das Erscheinen der Kreise für die Auswahl des Tastendrucks antizipiert werden. Sofern diese Assoziationen auch in der Testphase wirksam bleiben, sind hier in der Zweitaufgabe zusätzlich zum PRP-Effekt entsprechende Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilitätseinflüsse zu erwarten. Das heißt, die Reaktionszeiten sollten verlängert sein, wenn die aufgabenirrelevante Größe der Stimuli inkompatibel zu den mit der geforderten Reaktion assoziierten Handlungseffekten aus der Lernphase ist. Insofern generell angenommen wird, dass extern stimulierte Handlungseffekte Prozesse der Reaktionsauswahl beeinflussen (vgl. Abschnitt 2.3), sollte sich entsprechend den Vorhersagen der *Locus-of-slack* Prozedur ein Einfluss der S–E Kompatibilität additiv zum SOA verhalten (vgl. Experiment 2 bzw. 3).

## 6.1.1 Methoden

### Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nahmen 48 Studenten der Universität Halle teil.<sup>1</sup> Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

### Versuchsapparatur und Stimuli

Die Reizdarbietung und Datenaufzeichnung erfolgte an einem Apple iMac mit integriertem 15 Zoll Bildschirm unter Verwendung der Software Psy-

---

<sup>1</sup>Insgesamt mussten fünf Versuchspersonen ausgeschlossen werden, da sie in der Lernphase nicht den Instruktionen folgten und entweder mit repetitiven Mustern (vier Versuchspersonen) oder aber einem extrem unausgewogenen Verhältnis linker zu rechter Tastendrücke (eine Versuchsperson) reagierten. Ihre Daten wurden mit denen fünf neuer Versuchspersonen ersetzt.

Scope (Cohen, MacWhinney, Flatt & Provost, 1993). Die Versuchspersonen saßen ca. 60 cm vom Bildschirm entfernt. Die manuellen Reaktionen wurden mit dem Zeige- und Mittelfinger der linken bzw. rechten Hand auf den Tasten A und S bzw. 5 und 6 der iMac-Tastatur ausgeführt.

Der neutrale Stimulus der Lernphase sowie das Fixationskreuz der Testphase war ein Plus-Zeichen (Höhe etwa 12 mm). Die imperativen Stimuli der Erstaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) entsprachen Experiment 1. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Farbunterscheidung) waren kleine und große Kreise (Durchmesser 10 mm und 190 mm) mit einem roten oder grünen Rand (5 mm). Als Reaktionseffekte dienten Kreise identischer Größe mit grauem Rand. Alle visuellen Stimuli wurden in der Mitte des Bildschirms auf schwarzem Hintergrund präsentiert.

### **Versuchsplan und Durchführung**

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in eine Lernphase sowie eine Testphase unterteilt wurde. Die Experimentalblöcke wurden in beiden Phasen durch kurze Pausen getrennt.

*Lernphase.* Die Lernphase umfasste vier Experimentalblöcke mit jeweils 50 Durchgängen. Jeder Durchgang begann mit dem Plus-Zeichen, welches für 200 ms präsentiert wurde. Die Versuchspersonen wurden instruiert, nach dem Plus-Zeichen einen frei gewählten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfingers der rechten Hand auszuführen. 50 ms nach Beginn des Tastendruck wurden die Reaktionseffekte für 200 ms präsentiert. Die Zuordnung von Reaktionen und Reaktionseffekten wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert. Bei der Hälfte der Versuchspersonen führte ein Tastendruck mit dem Zeigefinger zur Darbietung des kleinen Kreises und ein Tastendruck mit dem Mittelfinger entsprechend zur Darbietung des großen Kreises; für die andere Hälfte der Versuchspersonen wurde diese Zuordnung umgekehrt. Im Falle eines Tastendrucks vor dem Erscheinen des Plus-Zeichens wurde

eine Fehlermeldung präsentiert und der Durchgang wiederholt. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 1500 ms. Am Ende jedes Experimentalblocks erfolgte eine visuelle Rückmeldung über die Gesamtzahl der bislang erfolgten linken bzw. rechten Tastendrücke.

Die Versuchspersonen wurden explizit instruiert, beide Tastendrücke in zufälliger Reihenfolge mit ungefähr gleicher Häufigkeit auszuführen. Die Versuchsleiter wiesen außerdem darauf hin, dass repetitive Muster (ausschließliche Benutzung einer der beiden Tasten oder beständiges Alternieren zwischen den Tasten) zu vermeiden sind. Die Versuchspersonen wurden weiterhin informiert, dass jeder Tastendruck die Darbietung eines kleinen oder großen Kreises auf dem Bildschirm auslöst. Sie wurden instruiert, sich während des Experimentes den Zusammenhang zwischen Tastendruck und Erscheinen der Kreise zur vergegenwärtigen. Vor Beginn der insgesamt 200 Lerndurchgänge absolvierten die Versuchspersonen acht Probedurchgänge.

*Testphase.* Die Testphase umfasste zwei Experimentalblöcke mit jeweils 64 Durchgängen. Um bei einer mit vorherigen Induktionsstudien vergleichbaren Gesamtzahl von Durchgängen eine ausreichende Anzahl an Wiederholungen pro Faktorkombination zu erzielen, wurde die Anzahl der SOAs auf zwei Stufen beschränkt. Innerhalb eines Experimentalblocks wurde jede Kombination folgender Faktoren in randomisierter Reihenfolge viermal präsentiert: Stimulus der Erstaufgabe (hoher bzw. niedriger Ton), Farbe des Stimulus in der Zweitaufgabe (roter oder grüner Rand), Größe des Stimulus in der Zweitaufgabe (klein oder groß) und SOA zwischen den beiden Stimuli (50 oder 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die vier Kombinationen aus SOA und S-E Kompatibilität jeweils 32 Durchgänge. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Plus-Zeichen, welches als Fixationspunkt für 200 ms präsentiert wurde, gefolgt von dem niedrig- oder hoch-

frequenten Sinuston. Nach einem der zwei SOAs wurde der kleine bzw. große Kreis mit rotem bzw. grünem Rand für 500 ms präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand. Danach reagierten sie auf die Farbe des Kreisrandes mit einem linken oder rechten Tastendruck mit dem Zeige- bzw. Mittelfinger der rechten Hand. Für die Hälfte der Versuchspersonen lösten die Tastendrucke die Reaktionseffekte der Lernphase aus (einen kleinen oder großen Kreis mit grauem Rand). Für die andere Hälfte der Versuchspersonen folgten in der Testphase auf die Reaktionen keine Reaktionseffekte.<sup>2</sup> Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Falls innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Die Versuchspersonen wurden instruiert, zuerst auf den Ton und dann auf die Farbe des Kreisrandes zu reagieren. Sie wurden explizit darauf hingewiesen, dass die Größe der Kreise für die Aufgabe irrelevant sei und sie so schnell und fehlerfrei wie möglich reagieren sollten, unabhängig von der Korrespondenz der Stimuli mit den nachfolgenden Reaktionseffekten. Die Versuchspersonen absolvierten 16 Probedurchgänge, gefolgt von 128 Testdurchgängen.

## 6.1.2 Ergebnisse

### Lernphase

In der Lernphase von Experiment 3 wurden 4.3% aller Durchgänge aus der Analyse als Ausreißer ausgeschlossen. Die mittlere Anzahl der mit dem

---

<sup>2</sup>Diese Manipulation diente der Überprüfung einer eventuellen Auslöschung der erlernten Reaktions-Effekt Assoziationen in der Testphase. Im Rahmen der Auswertung erwies sich diese Manipulation jedoch als wirkungslos, so dass sich alle im Folgenden berichteten Daten auf die Gesamtstichprobe beziehen.

Zeige- bzw. Mittelfinger abgegebenen Tastendrucke unterschied sich nicht voneinander (Zeigefinger,  $M = 95.7$ ; Mittelfinger,  $M = 95.9$ ; Zeichentest  $Z = .15$ ,  $p = .88$ ). Das mittlere Intervall zwischen dem Erscheinen des Pluszeichens und dem Beginn der Tastendrucke betrug 410 ms und unterschied sich nicht für Zeige- bzw. Mittelfinger (408 ms bzw. 413 ms,  $t(47) = 0.87$ ,  $p = .39$ ).

## Testphase

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (7.6% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in der Testphase 4.1% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (50 oder 1500 ms) und S–E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe nahm mit Reduktion des SOAs zu,  $F(1, 47) = 11.35$ ,  $p = .01$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .19$ ).

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs zu,  $F(1, 47) = 784.18$ ,  $p = .001$ . Die RT2 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Stimuli 24 ms größer aus,  $F(1, 47) = 4.64$ ,  $p = .04$ . Es bestand jedoch eine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der S–E Kompatibilität,  $F(1, 47) = 4.86$ ,  $p = .03$ , die auf einen Einfluss der S–E Kompatibilität bei langem SOA (51 ms), nicht jedoch bei kurzem SOA (–4 ms) zurückging (siehe Abbildung 6.1).

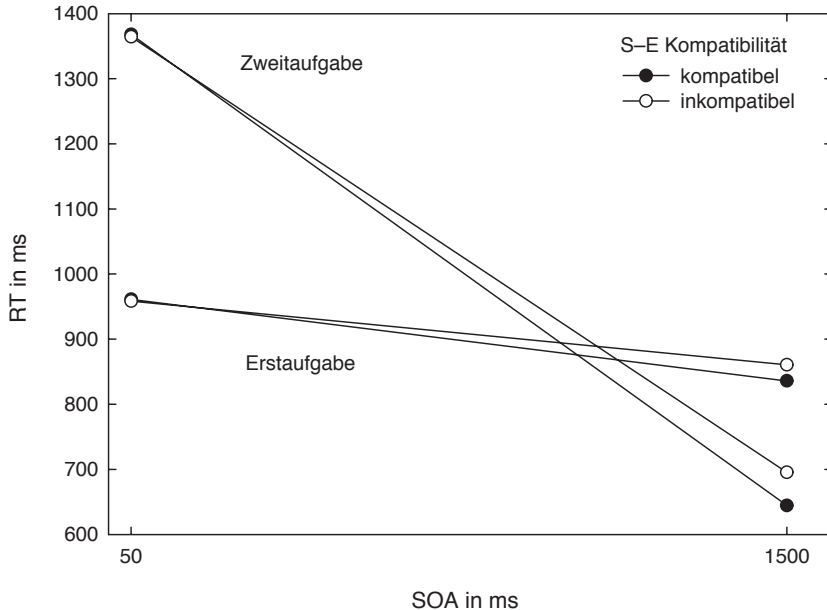


Abbildung 6.1: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 5 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

### Fehlerraten

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe (PE1) betrug 4.4%. Die PE1 nahm mit Reduktion des SOAs zu,  $F(1, 47) = 22.31$ ,  $p < .001$ . Die Fehlerraten betragen 5.6% und 3.1% für das 50- sowie 1500-ms SOA. Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $F_s < 0.87$ ).

Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe betrug 3.4%. Kein Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $p_s > .17$ ).

### 6.1.3 Diskussion

Experiment 5 sollte die Frage nach dem Einfluss wahrgenommener Handlungseffekte auf Prozesse der Reaktionsauswahl beantworten. Im Ergebnis fand sich neben dem erwarteten PRP-Effekt ein Einfluss der Kompatibilität der induzierten Handlungseffekte, die integraler Bestandteil der Stimuli in der Zweitaufgabe waren, mit den zuvor in der Lernphase assoziierten Handlungseffekten. Das heißt, Reaktionen erfolgten schneller auf Stimuli, welche hinsichtlich ihrer Größe den assoziierten Reaktionseffekten der geforderten Reaktion entsprachen, im Vergleich zu Stimuli, deren Größe den Effekten der alternativen Reaktion entsprach. Damit konnten bestehende Befunde zur Wirkung induzierter Handlungseffekte (vgl. Abschnitt 2.2.1) im Doppelaufgabenkontext repliziert werden.

Wesentlich für die Fragestellung war jedoch das Ergebnis, dass der Einfluss der S–E Kompatibilität – im Gegensatz zur R–E Kompatibilität in den vorangegangenen Experimenten – unteradditiv mit dem SOA interagierte. Während bei langem SOA ein Kompatibilitätseffekt in einer mit Experiment 2–4 vergleichbaren Größenordnung bestand, gab es bei kurzem SOA keinen Einfluss der induzierten Reaktionseffekte auf die Reaktionszeiten. Der *Locus-of-slack* Logik folgend indiziert dieser Befund, dass die Variation der S–E Kompatibilität Prozesse vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beeinflusst.

Bevor die Implikationen der obigen Schlussfolgerung diskutiert werden können, ist es jedoch erforderlich, die Möglichkeit alternativer Erklärungen für den fehlenden Kompatibilitätseinfluss bei kurzem SOA zu berücksichtigen. Zum einen könnte der reduzierte Einfluss stimulierter Handlungseffekte bei kurzem SOA und entsprechend langen Reaktionszeiten durch einen schnellen Zerfall der Aktivierung der betreffenden Effektrepräsentationen verursacht sein. In diesem Fall wäre der Einfluss umso geringer, je später die Reaktion abgegeben wird. Ein solcher Zeitverlauf konnte beispielsweise für die aufgabenirrelevanten räumlichen Stimulusmerkmale in der Simon-Aufgabe gezeigt werden (De Jong et al., 1994; Eimer et al., 1995;

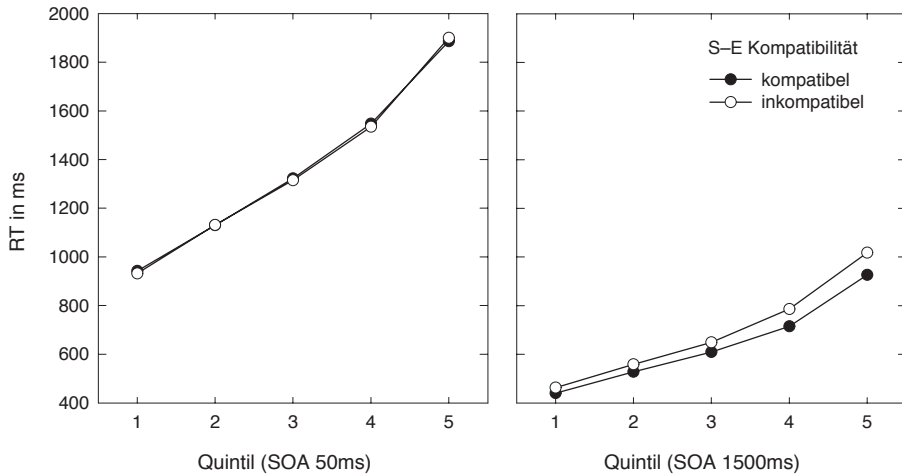


Abbildung 6.2: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Zweitaufgabe in Experiment 5 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA), dem RT Quintil und der Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilität.

Ridderinkhof, 2002) und wurde bereits von McCann und Johnston (1992) zur Erklärung der unteradditiven Interaktion des Simon-Effekts mit dem PRP-Effekt herangezogen (für eine gegenteilige Auffassung siehe Lien & Proctor, 2000). Es ist daher erforderlich zu prüfen, inwieweit sich auch im vorliegenden Experiment Hinweise auf einen Zerfall der Aktivierung von Effektrepräsentationen finden.

Die entsprechende Analyse des zeitlichen Verlaufs des S–E Kompatibilitätseffektes (durch Aufnahme des Reaktionszeitquintils als zusätzlichen Messwiederholungsfaktor in die ANOVA, vgl. Ratcliff, 1979) ergab jedoch keine Hinweise auf einen Zerfall der Effektkodeaktivierung. Stattdessen fanden sich mit zunehmender Reaktionszeit signifikant ansteigende Effektgrößen ( $F(4, 188) = 4.02, p = .02$ , für die Interaktion von S–E Kompatibilität und Reaktionszeitquintil). Vergleichbare Zeitverläufe wurden auch in vorherigen



Induktionsexperimenten berichtet (Hommel, 1996). Wie in Abbildung 6.2 erkennbar war der S-E Kompatibilitätseffekt – auf vergleichbarem Reaktionszeitniveau – bei langem SOA deutlich ausgeprägt, bei kurzem SOA dagegen nicht vorhanden. Auch wenn sich mit post-hoc Quintilanalysen ein Zerfall der Aktivierung der Effektrepräsentationen nicht vollständig ausschließen lässt, so stellt dieser unter den gegebenen Daten zumindest keine wahrscheinliche Erklärung der vorliegenden Ergebnisse dar.

Eine weitere alternative Erklärung beruht auf möglicherweise vorhandenen, rückwärts gerichteten *Cross-task* Kompatibilitätseffekten zwischen den geforderten Reaktionen bei kurzem SOA (Hommel, 1998a, vgl. auch Abschnitt 3.3.1). Soweit sich die Tastendrucke in der Erst- und Zweitaufgabe gleichermaßen als linke bzw. rechte Reaktionen auffassen lassen, könnte eine automatische Aktivierung der Reaktion der Zweitaufgabe vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals die korrespondierende Reaktion in der Erstaufgabe bahnen. Falls eine solche Aktivierung jedoch direkt nach der Reaktionsauswahl in der Erstaufgabe und noch vor der Reaktionsauswahl in der Zweitaufgabe aktiv gehemmt wird (wie es beispielsweise von Logan & Gordon, 2001, angenommen wird), so würde damit auch ein Einfluss der wahrgenommenen Handlungseffekte auf die Reaktionsauswahl in der Zweitaufgabe eliminiert werden. Stattdessen sollten die Reaktionen in der Erstaufgabe schneller erfolgen, wenn die Stimuli in der Zweitaufgabe den Reaktionseffekten der korrespondierenden Reaktion der Zweitaufgabe entsprechen.

Ein solcher Kompatibilitätseinfluss von den durch die Stimuli der Zweitaufgabe induzierten Reaktionen auf die Reaktionen der Erstaufgabe fand sich jedoch nicht in den Daten ( $F(1, 47) = 0.78$  für den Haupteffekt der rückwärts gerichteten Kompatibilität auf die RT1;  $F(1, 47) = 0.13$  für die Interaktion dieses Effektes mit dem SOA). Um zusätzlich die Möglichkeit eines solchen Kompatibilitätseffektes experimentell auszuschließen, wurden in Experiment 6 zwei Wahlreaktionsaufgaben ohne jegliche Form dimensionaler Überlappung zwischen den Aufgaben verwendet.

## 6.2 Experiment 6

Die Ergebnisse aus Experiment 5 deuten auf einen grundlegenden Unterschied zwischen antizipierten Handlungseffekten und demnach endogen aktivierten Effektrepräsentationen auf der einen und induzierten Handlungseffekten und demnach exogen aktivierten Effektrepräsentationen auf der anderen Seite hin: Während die endogene Aktivierung von Effektrepräsentationen offenbar innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses stattfindet, scheint die exogene Stimulation von Effektrepräsentationen Prozesse vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals zu beeinflussen.

Nun sind Schlussfolgerungen über verschiedene Experimente hinweg immer mit einer gewissen Restunsicherheit verbunden, insofern sich konfundierende Unterschiede zwischen den Experimenten nicht ausschließen lassen. So absolvierten die Versuchspersonen in Experiment 5 im Vergleich zu den vorangegangenen Experimenten nur eine relativ geringe Anzahl an Durchgängen, so dass die Anzahl der SOA-Stufen auf zwei begrenzt werden musste (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Anzahl und Verteilung der SOAs beeinflusst jedoch offenbar die Strategien, anhand derer Versuchspersonen Doppelaufgaben angehen (Miller et al., in press).

Ziel des Experiments 6 war daher, die gefundenen Unterschiede zwischen induzierten und antizipierten Handlungseffekten hinsichtlich der Interaktion mit dem SOA innerhalb eines einzigen Experiments zu replizieren. Ausgehend von der *Locus-of-slack* Prozedur wurde die Manipulation der S–E sowie R–E Kompatibilität in der Zweitaufgabe vorgenommen (vgl. Tabelle 4.1). In der Erstaufgabe reagierten die Versuchspersonen zunächst auf einen Buchstaben durch lautes Aussprechen eines Farbwortes („rot“ oder „grün“). In der Zweitaufgabe reagierten die Versuchspersonen auf einen links oder rechts dargebotenen Ton mit einem kurzen oder langen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Jeder Tastendruck löste die Darbietung auditiver Handlungseffekte, eines Tons kurzer oder langer Dauer, aus. Wie in den Experimenten 2–4 erfolgte die Zuordnung der Handlungseffekte zu den Reaktionen in unterschiedlichen Blöcken entweder kompatibel

(kurzer Tastendruck – kurzer Ton) oder inkompatibel (kurzer Tastendruck – langer Ton). Im Ergebnis sollte sich in Replikation der Experimente 2–4 ein temporaler R–E Kompatibilitätseffekt (vgl. Kunde, 2003) finden, welcher sich additiv zum Einfluss des SOAs verhält.

Um zusätzlich die Kompatibilität der Handlungseffekte mit den Stimuli manipulieren zu können, wurden sowohl die Stimulus-Töne als auch die Effekt-Töne in ihrer Frequenz variiert. Die Frequenz der als Handlungseffekt dienenden Töne verhielt sich für jede Versuchsperson konsistent zur Dauer; so wiesen beispielsweise kurze Töne immer eine niedrige Frequenz, lange Töne dagegen eine hohe Frequenz auf. Die Frequenz der Stimuli variierte dagegen zwischen den Durchgängen, unabhängig von der Lokation der Tondarbietung. Somit ergaben sich S–E kompatible Durchgänge, in denen die Stimulus- wie die Effekt-Töne die gleiche Frequenz aufwiesen, sowie S–E inkompatible Durchgänge, in denen die jeweiligen Töne verschiedene Frequenzen aufwiesen. Im Ergebnis sollte sich in Replikation des Experimentes 5 ein S–E Kompatibilitätseffekt zwischen den Stimuli und den Handlungseffekten finden (vgl. Hommel, 1996), welcher sich jedoch im Gegensatz zur R–E Kompatibilität unteradditiv zum Einfluss des SOAs verhalten sollte.

## 6.2.1 Methoden

### Versuchsteilnehmer

An dem Experiment nahmen 48 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

### **Versuchsapparatur und Stimuli**

Die Reizdarbietung und Datenaufzeichnung erfolgte an einem Apple PowerMac G3 und einem 19 Zoll VGA-Bildschirm unter Verwendung der Software PsyScope (Cohen et al., 1993) und der dazugehörigen Button-Box. Die Versuchspersonen saßen ca. 60 cm vom Bildschirm entfernt. Der Onset der vokalen Reaktionen der Erstaufgabe (Buchstabenunterscheidung) wurden mittels eines Mikrophons erfasst, welches den Voicekey der Button-Box ansteuerte. Die Identität der jeweiligen Reaktionen wurde durch den Versuchsleiter direkt nach der Darbietung der Reaktionseffekte über die farbigen Tasten der Button-Box protokolliert. Die dauervariablen Reaktionen der Zweitaufgabe (Tonlokationunterscheidung) wurden mit dem rechten Zeigefinger an einem externen Taster ausgeführt, welcher zentral vor den Versuchspersonen platziert und an die Button-Box angeschlossen war. Die dauervariablen Reaktionen wurden entsprechend dem Intervall zwischen Niederdrücken und Loslassen der Taste als kurzer (weniger als 200 ms) bzw. langer (200–500 ms) Tastendruck registriert. Die Reaktionszeit wurde anhand des Intervalls zwischen dem Beginn der Stimuluspräsentation und dem Beginn des Tastendrucks definiert.

Imperative Stimuli der Erstaufgabe (Buchstabenunterscheidung) waren die Buchstaben *H* und *S*. Als Fixationskreuz diente ein Plus-Zeichen. Die Buchstaben und das Fixationskreuz wurden in einer Höhe von 15 mm in der Mitte des Bildschirms in weißer Farbe auf schwarzem Hintergrund präsentiert. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Tonlokationunterscheidung) waren Sinustöne (300 bzw. 900 Hz) mittlerer Dauer (250 ms), die über einen von zwei externen, links und rechts neben dem Bildschirm platzierten Lautsprechern dargeboten wurden. Reaktionseffekte der Zweitaufgabe waren Sinustöne (300 bzw. 900 Hz) kurzer oder langer Dauer (125 bzw. 400 ms), welche über beide Lautsprecher dargeboten wurden.

## Versuchsplan und Durchführung

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in sechs durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Ein Experimentalblock umfasste 64 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben, wobei jede Kombination insgesamt zweimal präsentiert wurde: Stimulus Erstaufgabe (Buchstabe *H* bzw. *S*), Lokation des Stimulus in der Zweitaufgabe (linker bzw. rechter Lautsprecher), Frequenz des Stimulus in der Zweitaufgabe (300 bzw. 900 Hz) und SOA zwischen den beiden Stimuli (80, 150, 400 bzw. 1500 ms).

Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die 16 Kombinationen aus SOA, S–E Kompatibilität und R–E Kompatibilität je 24 Durchgänge. Die R–E Kompatibilität wurde geblockt variiert. Nach den ersten drei Blöcken wurde die Zuordnung von Reaktionen und Reaktionseffekten (R–E Mapping) getauscht. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionen, Reaktionen und Effekten sowie die Reihenfolge der R–E Mappings wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit dem Plus-Zeichen, welches als Fixationspunkt für 200 ms präsentiert wurde, gefolgt von einem der beiden Buchstaben (200 ms). Nach einem der vier SOAs wurde der Ton für 250 ms über einen der beiden Lautsprecher präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Buchstaben durch lautes Aussprechen eines Farbwortes („rot“ oder „grün“). Danach reagierten sie auf die Lokation des Tons mit einem kurzen oder langen Tastendruck mit dem Zeigefinger der rechten Hand. Unmittelbar nach dem Loslassen des Tasters wurden die Reaktionseffekte präsentiert. Bei kompatibelem R–E Mapping folgte ein kurzer Ton auf einen kurzen Tastendruck sowie ein langer Ton auf einen langen Tastendruck. Bei inkompatiblen R–E Mapping erfolgte die Zuordnung umgekehrt. Um ein konstantes Intervall zwischen den Durchgängen zu erzielen, hatten die Versuchsleiter innerhalb von 2000 ms nach Präsentation der Reaktionseffekte

die Identität der vokalen Reaktion der Erstaufgabe zu protokollieren. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Falls innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Die Versuchspersonen wurden explizit instruiert, so schnell wie möglich zuerst auf den Buchstaben und dann auf den Ton zu reagieren, ohne dabei zu viele Fehler zu begehen. Nach 32 Probedurchgängen ohne Reaktionseffekte wurden sie informiert, dass im darauf folgenden Experiment jeder Tastendruck die Darbietung eines Tones variabler Dauer und Frequenz auslöst. Die Versuchspersonen wurden erneut instruiert, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz zwischen den Reaktionen und den Stimuli bzw. nachfolgenden Tönen.

## 6.2.2 Ergebnisse

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (8.2% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in Experiment 6 4.0% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (80, 150, 400 oder 1500 ms), S–E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) und R–E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet. In einer weiteren ANOVA mit dem zusätzlichen Messwiederholungsfaktor Reaktionszeit-Quintil wurde eine eventuelle Abnahme der Effektstärke der S–E Kompatibilität mit zunehmendem Reaktionszeitniveau geprüft (vgl. die Diskussion hinsichtlich eines Zerfalls der Effektkodeaktivierung als Ursache für die unteradditive Wechselwirkung

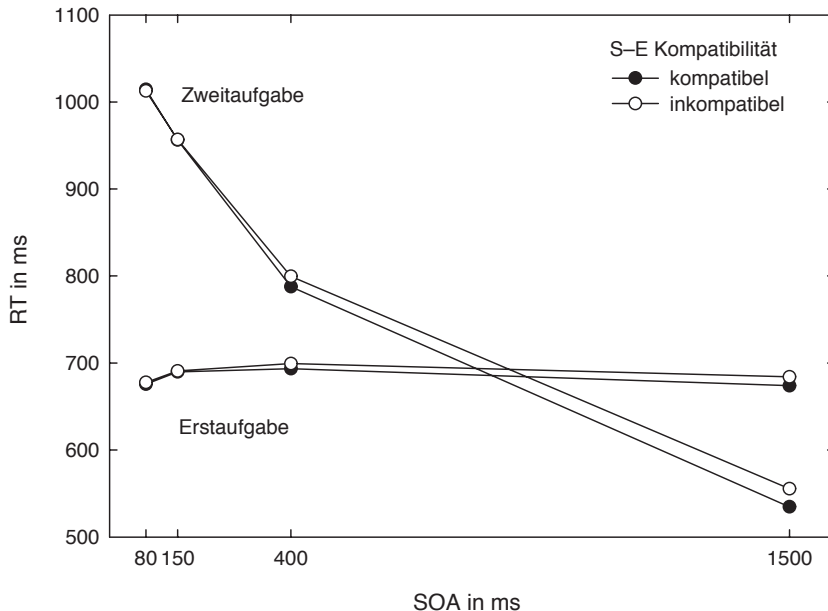


Abbildung 6.3: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 6 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

der S–E Kompatibilität mit dem SOA in Abschnitt 6.1.3).

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe fiel in S–E kompatiblen im Vergleich zu S–E inkompatiblen Durchgängen in der Zweitaufgabe 5 ms größer aus,  $F(1, 47) = 5.28$ ,  $p = .03$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .12$ ).

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(3, 141) = 387.34$ ,  $p = .001$ . Die RT2 fielen in S–E kompatiblen im Vergleich zu S–E inkompatiblen Durchgängen in der Zweitaufgabe 8 ms größer aus,  $F(1, 47) = 5.85$ ,  $p = .02$ . Dieser Effekt nahm

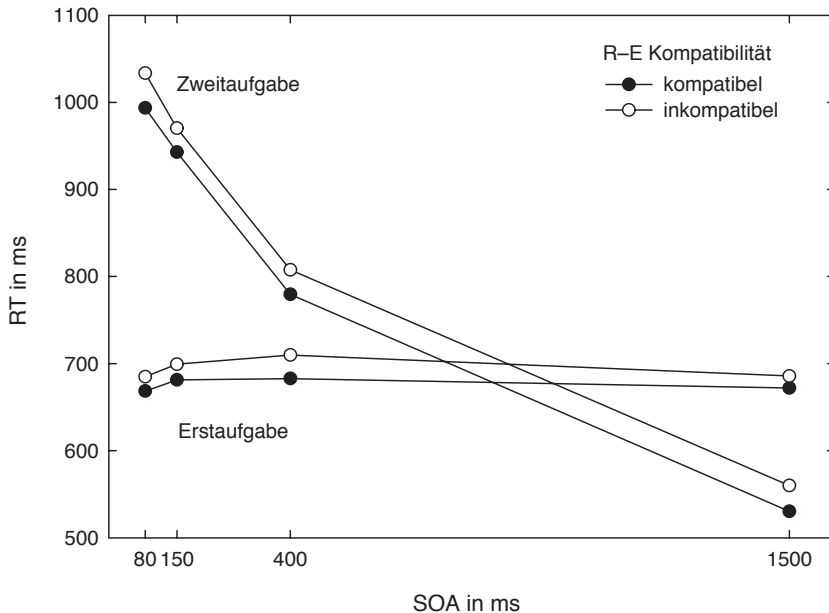


Abbildung 6.4: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufrage in Experiment 6 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions–Effekt (R–E) Kompatibilität in der Zweitaufrage.

mit Reduktion des SOAs ab,  $F(3, 141) = 3.05$ ,  $p = .04$ , für die Interaktion von SOA und S–E Kompatibilität (siehe Abbildung 6.3). Die Effektgrößen betragen  $-2$ ,  $1$ ,  $12$  und  $21$  ms für das 80-, 150-, 400- bzw. 1500-ms SOA.

Die RT2 fielen bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen Reaktionseffekten  $31$  ms größer aus,  $F(1, 47) = 4.35$ ,  $p = .04$ . Von wesentlichem Interesse war, dass keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R–E Kompatibilität bestand,  $F(3, 141) = 0.62$  (vgl. Abbildung 6.4). Ebenso fand sich keine systematische Interaktion zwischen der S–E und der R–E Kompatibilität,  $F(1, 47) = 0.03$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze



(alle  $ps > .18$ ).

Die Analyse des zeitlichen Verlaufs des S–E Kompatibilitätseffektes über die Reaktionszeitquintile hinweg ergab keine Hinweise auf abnehmende Effektstärken bei zunehmenden Reaktionszeitniveau,  $F(4, 188) = 0.13$  für die Interaktion von S–E Kompatibilität und RT2 Quintil; numerisch fielen die S–E Kompatibilitätseffekte mit zunehmendem Reaktionszeitniveau sogar größer aus.

### **Fehlerraten**

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe betrug 0.9% und war demzufolge zu niedrig für eine inhaltlich bedeutsame Auswertung. Die mittlere Fehlerrate in der Zweitaufgabe betrug 6.7%. Kein Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .07$ ).

### **6.2.3 Diskussion**

In Experiment 6 sollten die in den vorangegangenen Experimenten gefundenen, spezifischen Interaktionen der S–E Kompatibilität sowie der R–E Kompatibilität mit dem PRP-Effekt innerhalb eines einzigen Experimentes repliziert werden. Die Ergebnisse von Experiment 6 entsprechen weitestgehend denen der vorangegangenen Experimente.

Zum einen fand sich in der Zweitaufgabe ein Einfluss der Kompatibilität der Dauer der Reaktionen zur Dauer der nachfolgenden auditiven Reaktionseffekte. Dieser R–E Kompatibilitätseffekt verhielt sich wie in Experiment 2 und 3 additiv zum SOA. Weiterhin fand sich ein Einfluss der Kompatibilität der Frequenz der als Stimuli dienenden Töne mit der Frequenz der als Reaktionseffekte präsentierten Töne. Wie in Experiment 5 bestand dieser Einfluss induzierter Effektmerkmale nur bei langem SOA. Der zeitlichen Dynamik des Effektes nach ist auch in Experiment 6 ein Zerfall der Aktivierung extern stimulierter Effektrepräsentationen als Ursache der unteradditiven Wechselwirkung von S–E Kompatibilität und SOA unwahrscheinlich. Hiermit

konsistent ist auch die beobachtete statistische Unabhängigkeit von S–E und R–E Kompatibilität, insoweit der *Additive-factors* Logik (Sternberg, 1969) folgend der Einfluss der S–E Kompatibilität im Vergleich zur R–E Kompatibilität tatsächlich an einem anderen, in diesem Fall früheren Zeitpunkt zu verorten ist.

Zusammenfassend stützen die Befunde aus Experiment 6 vollständig die bisherigen, auf der *Locus-of-slack* Logik beruhenden Schlussfolgerungen über den Wirkungszeitpunkt der beiden Kompatibilitätseinflüsse. Induzierte sowie antizipierte, aufgabenirrelevante Handlungseffekte beeinflussen somit Prozesse zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Handlungssteuerung, vor bzw. innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses.

# Kapitel 7

## Intendierte Effekte

### 7.1 Experiment 7

Die vorangegangenen Experimente erbrachten hinsichtlich der Frage nach dem Aktivierungszeitpunkt handlungsleitender Effektrepräsentationen konsistent ein Ergebnis: Werden Handlungseffekte nicht zusätzlich durch die Wahrnehmung von Reizen, die den Handlungseffekten teilweise entsprechen, induziert, so zeigt sich, dass die für eine Antizipation von Handlungseffekten notwendige endogene Aktivierung der Repräsentationen erst zu einem relativ späten Zeitpunkt in der Handlungssteuerung, innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses, stattfindet. Aus ideomotorischer Perspektive erscheint dieser Befund angesichts des zentralen Stellenwertes antizipierter Effekte für die Handlungsplanung überraschend. Insofern Handlungen in der Regel der Herstellung wahrnehmbarer Veränderungen in unserer Umwelt dienen, wäre es durchaus plausibel, wenn die Repräsentationen der entsprechenden sensorischen Effekte schon frühzeitig in der Handlungsplanung aktiviert werden. Bevor die Implikation dieses Befundes für Theorien der Handlungssteuerungen diskutiert werden können, ist es daher erforderlich, die Möglichkeit alternativer Erklärungen zu berücksichtigen.

Eine mögliche Einschränkung für die Generalisierbarkeit der Befunde könnte darin liegen, dass sich die oben genannten Schlussfolgerungen immer aus der Manipulation der Kompatibilität der in Wahlreaktionsaufgaben per Instruktion und Stimuli geforderten Reaktionen mit aufgabenirrelevanten, distalen Reaktionseffekten ergaben. Ideomotorische Theorien gehen davon aus, dass auch solche aufgabenirrelevanten Handlungseffekte Bestandteil der Repräsentation einer Handlung sind (vgl. Abschnitt 2.1 und 2.2), insofern angenommen wird, dass alle durch eine Handlung hervorgerufenen sensorischen Ereignisse nach entsprechender Lernerfahrung in die Handlungsrepräsentationen integriert werden. Aus der Irrelevanz der bislang verwendeten distalen Reaktionseffekte für die instruktionsgemäße Bearbeitung der eigentlichen Aufgabe ergeben sich jedoch zwei Probleme:

Zum einen sind, wie Prinz (1998) eindrucksvoll argumentiert hat, die verwendeten Wahlreaktionsaufgaben nicht repräsentativ für alltägliches menschliches Verhalten. Um auf das Beispiel des Lichtschalters aus Abschnitt 2.2 zurückzukommen: Während im Alltag die Bewegung der Hand zum Lichtschalter und dessen Betätigung nur das notwendige Mittel zum Erreichen des eigentlichen Handlungsziels, dem Aufleuchten des Lichts, darstellen, so sind in psychologischen Experimenten in der Regel die auszuführenden Handlungen das intendierte Handlungsziel. Selbst wenn die geforderten Reaktionen, wie in den vorangegangenen Experimenten dieser Arbeit, konsistent und vorhersehbar distale Reaktionseffekte erzeugen, so ist die Antizipation dieser aufgabenirrelevanten Handlungseffekte für die instruktionsgemäße Bearbeitung der Aufgabe *de facto* nicht erforderlich. Zwar zeigen die beobachteten R-E Kompatibilitätseffekte, dass es im Rahmen der Handlungsvorbereitung tatsächlich zu einer Aktivierung der Repräsentationen dieser distalen Effekte kommt. Dies stützt die Annahme einer automatischen Integration irrelevanter distaler Effekte in die Handlungsrepräsentationen. Es wäre aber gleichzeitig nicht unplausibel anzunehmen, dass die Aktivierung von aufgabenirrelevanten im Vergleich zu aufgabenrelevanten Effektkodes zu einem anderen, womöglich späteren Zeitpunkt stattfindet. Dies würde natürlich die Validität der getroffenen Schlussfol-

gerungen auf klassische Wahlreaktionsaufgaben beschränken und keine Generalisierung auf instrumentelle Handlungen ermöglichen.

Ein weiteres Problem nominell aufgabenirrelevanter Handlungseffekte ist, dass die Aufmerksamkeitsausrichtung auf die verschiedenen Effektmerkmale möglicherweise von der Relevanz der Dimension, auf welcher die Effektmerkmale mit den Reizen oder den Reaktionen überlappen, moduliert wird (vgl. in diesem Zusammenhang die Befunde zum Einfluss von antizipierten Handlungseffekten auf die Devianzverarbeitung im Oddball-Paradigma, Waszak & Herwig, in press). So überlappten im Experiment 6 die Handlungseffekte mit den Reaktionen hinsichtlich der zeitlichen Dauer. Diese Dimension war relevant für die Aufgabenbearbeitung, insofern Reaktionen von kurzer bzw. langer Dauer gefordert waren. Gleichzeitig überlappten die Handlungseffekte mit den Stimuli hinsichtlich der Frequenz. Diese Dimension war jedoch für die Aufgabenbearbeitung vollkommen irrelevant, da die Lokation der Stimuli die geforderte Reaktion signalisierte und die Tonhöhe der Stimuli entsprechend zu ignorieren war. Dadurch ergibt sich allerdings für Experiment 6 eine mögliche Konfundierung in der Unterscheidung antizipierter bzw. induzierter Handlungseffekte in dem Sinne, dass die den jeweiligen Kompatibilitätseffekten zugrunde liegenden Effektmerkmale, im vorliegenden Beispiel die Frequenz bzw. die zeitliche Dauer, unterschiedliche Beachtung erfahren. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die daraus resultierende unterschiedliche Gewichtung der jeweiligen Codes innerhalb der Handlungsrepräsentation auf deren Aktivierungszeitpunkt innerhalb der Handlungsplanung auswirkt.

Ziel von Experiment 7 war daher, die in den vorangegangenen Experimenten gefundenen Unterschiede zwischen induzierten und antizipierten Handlungseffekten unter Verwendung aufgabenrelevanter, das heißt intendierter Handlungseffekte zu replizieren. Ausgehend von der *Locus-of-slack* Prozedur sollte die Manipulation der S–E sowie R–E Kompatibilität wieder in der Zweitaufgabe vorgenommen werden (vgl. Tabelle 4.1). Um den eingangs genannten Punkten zu entsprechen, sollten zwei Vorgaben umgesetzt werden. Zum einen sollten distale Handlungseffekte aufgabenrelevant

gestaltet werden. Zweitens sollten diese Handlungseffekte sowohl mit den Reaktionen als auch den Stimuli auf der gleichen Dimension überlappen. Eine elegante Möglichkeit der Umsetzung dieser Vorgaben bietet die von Hommel (1993) modifizierte, „instrumentelle“ Simon-Aufgabe.

In der ursprünglichen Version der Simon-Aufgabe reagieren Probanden auf einen lateralisiert dargebotenen hohen oder tiefen Ton mit einem linken oder rechten Tastendruck. Obwohl die Lokation der Töne für die Aufgabe vollkommen irrelevant ist, erfolgen die Reaktionen schneller und fehlerfreier, wenn der Ton auf der Seite der geforderten Reaktion präsentiert wird (Simon, 1967, 1969). Aus ideomotorischer Perspektive bietet das Induktionsprinzip eine elegante Erklärung für diesen als Simon-Effekt bekannten Befund, in dem Sinne, dass die irrelevanten Reizmerkmale diejenige Handlung aktivieren, deren sensorische Effekte zumindestens teilweise den Reizen entsprechen. Im Unterschied zu den Experimenten der vorliegenden Arbeit fallen jedoch in der Simon-Aufgabe die zur Herstellung der Handlungseffekte notwendigen Bewegungen (das Niederdrücken der Taste) mit den intendierten Handlungseffekten (den eigentlich geforderten Tastendrücken, repräsentiert durch proximale Handlungseffekte, das heißt die mit der Ausführung des Tastendrucks verbundenen propriozeptiven Rückmeldungen) räumlich zusammen. Damit bleibt letztlich ungeklärt, inwieweit die aufgabenirrelevante Lokation der Stimulus-Töne tatsächlich zu einer Aktivierung der proximalen Handlungseffekte führt, oder nur die entsprechenden Bewegungen bahnt.

Um die räumliche Konfundierung von Handlungsziel und notwendiger Bewegung aufzulösen, hat Hommel (1993) die Simon-Aufgabe um zusätzliche, distale Handlungseffekte erweitert. Hierzu wurden die beiden Tasten mit zwei LEDs verbunden, die zwischen den Tasten und den Lautsprechern positioniert wurden. Die Verdrahtung der Tasten mit den LEDs erfolgte für verschiedene Versuchspersonen entweder kompatibel (direkt) oder inkompatibel, das heißt überkreuzt. In letzterem Fall leuchtete also bei einem Tastendruck immer die LED auf der gegenüberliegenden Seite auf. Weiterhin wurde die Instruktion variiert: Ein Teil der Versuchspersonen reagierte wie in der Simon-Aufgabe üblich auf die Tonhöhe mit einem linken oder rechten

Tastendruck; die LEDs waren analog zu den Handlungseffekten in den bisherigen Experimenten der vorliegenden Arbeit für die Aufgabe vollkommen irrelevant. Ein anderer Teil der Versuchspersonen wurde dagegen instruiert, in Reaktion auf die Höhe der Töne anhand der Tasten die linke oder rechte LED einzuschalten, beispielsweise auf einen hohen Ton die linke LED und auf einen tiefen Ton die rechte.

Im Ergebnis fand sich in der herkömmlich instruierten Gruppe von Versuchspersonen der übliche Simon-Effekt. In der anderen Gruppe führte die instrumentelle Instruktion dagegen zu einem umgedrehten Simon-Effekt; die Reaktionszeiten fielen also geringer aus, wenn die Töne kontralateral zu den Reaktionen, demnach auf der Seite der geforderten Handlungseffekte, präsentiert wurden. Für die Richtung des Simon-Effekts ist demnach die Kompatibilität der Stimuli mit den herzustellenden distalen Handlungseffekten maßgeblich (S-E Kompatibilität), nicht jedoch mit den hierzu erforderlichen Bewegungen (S-R Kompatibilität). Offenbar sind irrelevante Reizmerkmale also in der Lage, die Aktivierung korrespondierender, aufgabenrelevanter Effektrepräsentationen zu beeinflussen. Für die Auswahl der Tastendrücke müssen aus ideomotorischer Perspektive jedoch ebenso, möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt, die entsprechenden proximalen Handlungseffekte aktiviert werden. Sofern diese räumlich nicht den distalen Effekten entsprechen, sollte sich also auch ein entsprechender R-E Kompatibilitätseffekt finden. Tatsächlich fand sich in einer Kontrollbedingung, in der die Töne aus beiden Lautsprechern dargeboten wurden, ein entsprechender Einfluss der Zuordnung von LEDs und Tasten (die Analysen wurden von Hommel in der ursprünglichen Arbeit allerdings nicht berichtet, vgl. Kunde, 2001).

Diese Befunde demonstrieren nicht nur eindrucksvoll die Relevanz distaler Handlungseffekte innerhalb der Handlungssteuerung. Die von Hommel (1993) modifizierte Simon-Aufgabe erfüllt auch die für Experiment 7 notwendigen Vorgaben. Erstens sind die distalen Handlungseffekte relevant für die instruktionsgemäße Bearbeitung der Aufgabe. Zwar könnten Versuchspersonen die Instruktion umformulieren und die geforderten Reaktionen bezogen

auf die Lokation der Tastendrucke kodieren. Die erwartete Inversion des Simon-Effektes stellt in diesem Zusammenhang jedoch gleichzeitig einen Manipulationscheck dar. Zweitens überlappen die distalen Handlungseffekte sowohl mit den Reizen als auch den Reaktionen hinsichtlich der gleichen Dimension (Lokation). Die Variation der Lokation hat im Hinblick auf die Aufmerksamkeitsausrichtung den zusätzlichen Vorteil, besonders salient zu sein (vgl. hierzu auch die Diskussion bei Steininger, 1999).

Entsprechend wurde Experiment 7 weitgehend als Replikation der von Hommel (1993) modifizierten Simon-Aufgabe, ergänzt um die für den PRP-Effekt erforderliche zweite Wahlreaktionsaufgabe, konzipiert. Die Erstaufgabe entsprach Experiment 6. Die Versuchspersonen reagierten zunächst auf einen Buchstaben durch lautes Aussprechen eines Farbwortes („rot“ oder „grün“). In der Zweitaufgabe hatten Versuchspersonen auf einen hohen oder tiefen Ton zu reagieren, indem sie durch einen linken oder rechten Tastendruck eine linke oder rechte virtuelle Lampe auf dem Bildschirm aufleuchten ließen. Von entscheidender Bedeutung war dabei die Zuordnung der Lampen zu den beiden direkt vor dem Bildschirm platzierten Tasten. Um beispielsweise die linke Lampe aufleuchten zu lassen, musste bei kompatibelem R–E Mapping die linke Taste, bei inkompatibler, überkreuzter Zuordnung dagegen die rechte Taste gedrückt werden (vgl. Abbildung 7.1). Weiterhin wurde unabhängig von der Frequenz die Lokation der Tondarbietung zwischen den Durchgängen variiert. Neben neutralen Durchgängen, in denen die Töne auf beiden Seiten präsentiert wurden, ergaben sich dadurch S–E kompatible Durchgänge, in denen die Töne auf der Seite der geforderten Effekte präsentiert wurden, sowie S–E inkompatible Durchgänge, in denen die Töne auf der jeweils anderen Seite präsentiert wurden.

Für Experiment 7 ergaben sich eine Reihe von Erwartungen: Zum einen sollten Reaktionszeiten der Zweitaufgabe bei kurzem SOA verlängert sein (der übliche PRP-Effekt). Weiterhin sollte sich in der Zweitaufgabe ein Einfluss der Kompatibilität der Stimulus-Lokation mit der Lokation der zu erzeugenden Effekte finden lassen. Dieser S–E Kompatibilitätseffekt sollte nicht durch die Zuordnung der Handlungseffekte zu den Reaktionen (dem



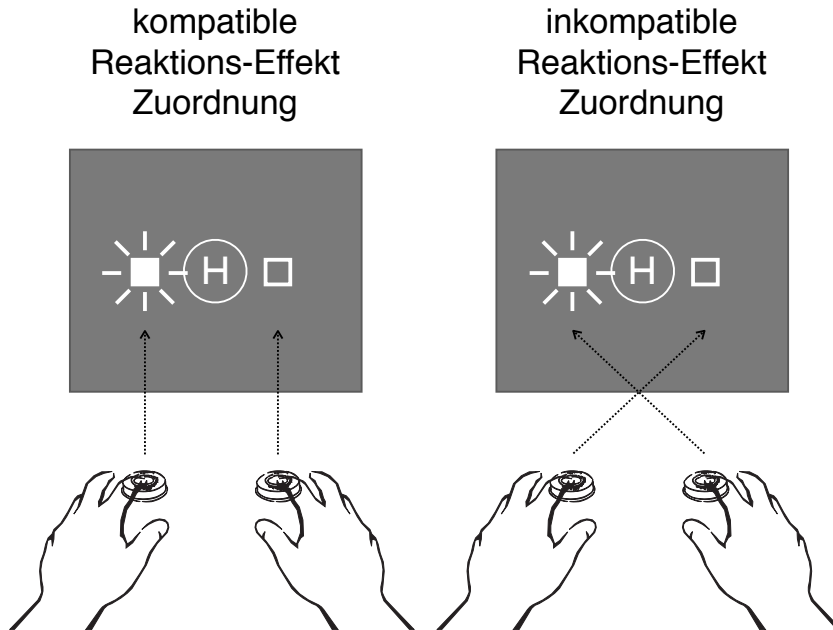


Abbildung 7.1: Kompatible und inkompatible Zuordnungen von Reaktionen und Effekten in der Zweitaufgabe von Experiment 7.

R-E Mapping) moduliert werden; gleichbedeutend ist ein bei inkompatiblen R-E Mapping invertierter Simon-Effekt, welcher sich ja auf die Kompatibilität der Stimuli mit den Reaktionen bezieht. Außerdem sollte sich auch ein Haupteffekt der Zuordnung der Handlungseffekte zu den Reaktionen, mithin ein R-E Kompatibilitätseffekt bezogen auf die Lokation der Effekte zu den Reaktionen, finden lassen (vgl. Kunde, 2001).

Für die vorrangig interessierenden Interaktionen von S-E und R-E Kompatibilität mit dem SOA ergeben sich, ausgehend von der *Locus-of-slack* Prozedur, die mit Experiment 6 identischen Erwartungen: Analog zu den vorangegangenen Experimenten 2–4 bzw. 6 sollte die Manipulation der Zu-

ordnung der Handlungseffekte zu den Reaktionen einen Einfluss additiv zum SOA ausüben. Im Gegensatz dazu sollte sich der Einfluss der S–E Kompatibilität wie in Experiment 5 und 6 unteradditiv zum Einfluss des SOAs verhalten.

### **7.1.1 Methoden**

#### **Versuchsteilnehmer**

An dem Experiment nahmen 24 Studenten der Universität Halle teil. Für die Teilnahme erhielten sie wahlweise eine Versuchspersonenstunde angerechnet oder eine Aufwandsentschädigung von € 6. Sie waren hinsichtlich der Untersuchungshypothesen naiv und wurden erst nach Abschluss der Versuchssitzung aufgeklärt.

#### **Versuchsapparatur und Stimuli**

Es wurde die Versuchsapparatur aus Experiment 6 verwendet. Die Erstaufgabe (Buchstabenunterscheidung mit vokalen Reaktionen) entsprach Experiment 6. Die manuellen Reaktionen der Zweitaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) erfolgten mit den Zeigefingern der linken und rechten Hand an zwei externen Tastern, die etwa 15 cm vor dem Monitor platziert und an der Button-Box angeschlossen waren. Die Entfernung der beiden Tasten betrug von Mittelpunkt zu Mittelpunkt etwa 20 cm.

Die imperativen Stimuli der Erstaufgabe (Buchstabenunterscheidung) entsprachen Experiment 6. Zusätzlich wurde während des gesamten Experimentes ein Kreis mit einem Durchmesser von 60 mm als visueller Hinweisreiz präsentiert. Imperative Stimuli der Zweitaufgabe (Tonhöhenunterscheidung) waren Sinustöne (300 bzw. 900 Hz, Dauer 200 ms), die über zwei externe, links und rechts neben dem Bildschirm platzierte Lautsprecher dargeboten wurden. Als Reaktionseffekte der Zweitaufgabe dienten weiße Quadrate (Kantenlänge etwa 60 mm), die links oder rechts des zentralen

Kreises für 500 ms dargeboten wurden. Die Entfernung der beiden Quadrate betrug von Mittelpunkt zu Mittelpunkt etwa 21 cm. Der Umriss der Quadrate blieb als visueller Hinweis während des gesamten Experimentes sichtbar (Randstärke etwa 4 mm, vgl. Abbildung 7.1).

### **Versuchsplan und Durchführung**

Das Experiment bestand aus einer 50-minütigen Versuchssitzung, welche in zehn durch kurze Pausen getrennte Experimentalblöcke unterteilt wurde. Um trotz der zusätzlich eingeführten S–E neutralen Bedingung eine brauchbare Anzahl an Wiederholungen pro Faktorkombination zu erzielen, wurde die Anzahl der SOAs gegenüber den vorangegangenen Experimenten auf drei Stufen reduziert. Ein Experimentalblock umfasste 36 randomisiert präsentierte Durchgänge, die sich aus der Kombination folgender Faktoren ergaben: Stimulus Erstaufgabe (Buchstabe *H* bzw. *S*), Lokation des Stimulus in der Zweitaufgabe (linker, rechter bzw. beide Lautsprecher), Frequenz des Stimulus in der Zweitaufgabe (300 bzw. 900 Hz) und SOA zwischen den beiden Stimuli (50, 150 bzw. 1500 ms). Aggregiert über Stimuli und Experimentalblöcke ergaben sich für die 16 Kombinationen aus SOA, S–E Kompatibilität und R–E Kompatibilität je 20 Durchgänge.

Die R–E Kompatibilität wurde geblockt variiert. Nach den ersten fünf Blöcken wurde die Zuordnung von Reaktionen und herzustellenden Reaktionseffekten (R–E Mapping) getauscht. Die Zuordnung von Stimuli und Reaktionseffekten, Reaktionseffekten und Reaktionen sowie die Reihenfolge der R–E Mappings wurden für jede Versuchsperson zufällig ausgewählt und zwischen den Versuchspersonen ausbalanciert.

Jeder Durchgang begann mit einem der beiden Buchstaben, welcher für 200 ms präsentiert wurde. Nach einem der drei SOAs wurde der Ton für 250 ms über den linken, rechten oder über beide Lautsprecher präsentiert. Die Versuchspersonen reagierten zuerst auf den Buchstaben durch lautes Aussprechen eines Farbwortes („rot“ oder „grün“). Danach reagierten sie auf die Höhe des Tons, indem sie die linke bzw. rechte „Lampe“ durch

einen Tastendruck mit dem Zeigefinger der linken bzw. rechten Hand zum Aufleuchten brachten. Die Reaktionseffekte wurden unmittelbar nach dem Loslassen des Tasters präsentiert. Bei kompatibelem R–E Mapping erschien ein linkes Quadrat auf einen linken Tastendruck sowie ein rechtes Quadrat auf einen rechten Tastendruck. Bei inkompatiblen R–E Mapping erfolgte die Zuordnung umgekehrt.

Um ein konstantes Intervall zwischen den Durchgängen zu erzielen, hatten die Versuchsleiter innerhalb von 2000 ms nach Präsentation der Reaktionseffekte die Identität der vokalen Reaktion der Erstaufgabe zu protokollieren. Im Falle eines Fehlers in einer der beiden Aufgaben oder bei falscher Reihenfolge der Reaktionen wurde eine entsprechende Fehlermeldung präsentiert. Falls innerhalb von 5000 ms keine Reaktion erfolgte, wurde der Durchgang abgebrochen. Der nächste Durchgang begann nach einem Intervall von 2000 ms.

Vor Beginn des Experimentes wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, dass sie im folgenden Experiment auf einen Ton hin eine „Lampe“ auf dem Bildschirm zum Aufleuchten bringen sollen. Weiter wurden sie informiert, wie sich die Reaktionseffekte anhand der Tastendrucke erzeugen ließen. Hierzu wurden auf dem Bildschirm die Umrisse der beiden Quadrate eingeblendet und die Versuchspersonen konnten durch Drücken der beiden Tasten die „Lampen“ aufleuchten lassen. Die Versuchspersonen wurden instruiert, im folgenden Experiment so schnell und fehlerfrei wie möglich zuerst auf den Buchstaben und dann auf den Ton zu reagieren, unabhängig von der Korrespondenz der geforderten Reaktionen zur Lokation der Töne. Vor Beginn der fünf Experimentalblöcke absolvierten die Versuchspersonen 36 Probedurchgänge. Nach den ersten fünf Blöcken wurden die Versuchspersonen informiert, dass sich im nun folgenden zweiten Teil des Experimentes die Zuordnung der Tasten zu den Lampen ändert, während auf die Buchstaben und Töne wie bisher zu reagieren sei. Erneut wurden auf dem Bildschirm die beiden Quadrate eingeblendet und die Versuchspersonen konnten die veränderte Zuordnung von Tasten und Lampen ausprobieren. Im Anschluss absolvierten die Versuchspersonen zunächst 36 Probedurchgänge, gefolgt

von fünf Experimentalblöcken.

## 7.1.2 Ergebnisse

### Reaktionszeiten

Alle Durchgänge mit ausgelassenen oder fehlerhaften Reaktionen in einer der beiden Aufgaben oder falscher Reihenfolge der Reaktionen (9.3% der Reaktionen) wurden aus der Analyse der Reaktionszeiten ausgeschlossen. Insgesamt wurden in Experiment 7 4.0% aller Durchgänge mit richtigen Reaktionen als Ausreißer klassifiziert. Die mittleren Reaktionszeiten der verbliebenen Durchgänge wurden in einer ANOVA mit den Messwiederholungsfaktoren SOA (50, 150 oder 1500 ms), S–E Kompatibilität (neutral, kompatibel oder inkompatibel) und R–E Kompatibilität (kompatibel oder inkompatibel) ausgewertet. Um die durch das Ausbalancieren des R–E Mappings bedingte Erhöhung der Fehlervarianz zu kompensieren, wurde zusätzlich die absolvierte Reihenfolge der R–E Mappings als Gruppenfaktor in die ANOVA aufgenommen (Pollatsek & Well, 1995); die berichteten Daten beziehen sich jeweils auf die Gesamtstichprobe. In einer weiteren ANOVA mit dem zusätzlichen Messwiederholungsfaktor Reaktionszeit-Quintil wurde eine eventuelle Abnahme der Effektstärke der S–E Kompatibilität mit zunehmenden Reaktionszeitniveau geprüft.

Die mittlere Reaktionszeit in der Erstaufgabe nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(2, 44) = 85.74$ ,  $p < .001$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .09$ ).

Die mittlere Reaktionszeit in der Zweitaufgabe (RT2) nahm mit Reduktion des SOAs monoton zu,  $F(2, 44) = 406.67$ ,  $p < .001$ . Es fand sich ein Einfluss der S–E Kompatibilität in der Zweitaufgabe auf die RT2,  $F(2, 44) = 13.70$ ,  $p < .001$ . Dieser Effekt nahm mit Reduktion des SOAs ab,  $F(4, 88) = 2.80$ ,  $p = .04$ , für die Interaktion von SOA und S–E Kompatibilität (siehe Abbildung 7.2). In post-hoc Tukey HSD Tests fanden sich unter den neun Kombinationen aus SOA  $\times$  S–E Kompatibilität drei signifikante Paarverglei-

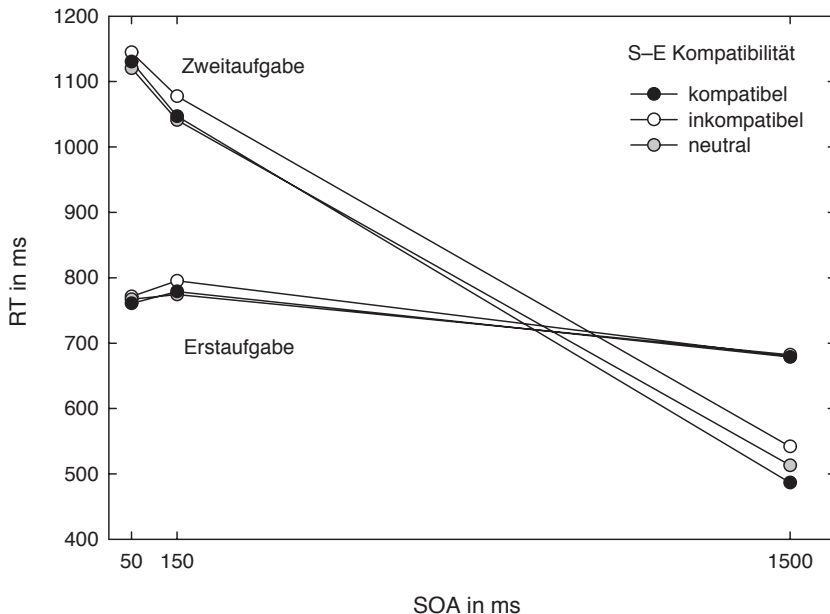


Abbildung 7.2: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 7 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Stimulus–Effekt (S–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

che, ausschließlich auf dem 1500-ms SOA: Die Differenz der RT2 zwischen S–E kompatiblen sowie S–E inkompatiblen Durchgängen in der Zweitaufgabe betrug 55 ms,  $q(9, 23) = 7.41$ ,  $p < .001$ . Im Vergleich zu S–E neutralen Durchgängen fiel die RT2 in S–E kompatiblen Durchgängen 26 ms geringer aus,  $q(9, 23) = 5.51$ ,  $p = .02$ , in S–E inkompatiblen Durchgängen dagegen 29 ms größer,  $q(9, 23) = 4.95$ ,  $p = .04$ .

Weiterhin fiel die RT2 bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen R–E Mapping 38 ms größer aus,  $F(1, 22) = 6.95$ ,  $p = .02$ . Von wesentlichem Interesse war, dass keine systematische Interaktion zwischen der S–E Kom-

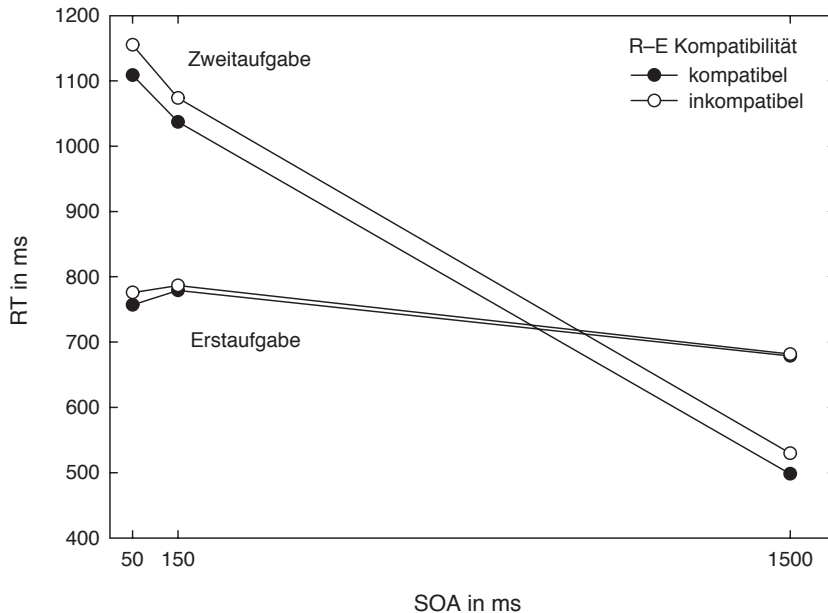


Abbildung 7.3: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Erst- und Zweitaufgabe in Experiment 7 als Funktion der Stimulus Onset Asynchronie (SOA) und der Reaktions-Effekt (R-E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

patibilität und dem R-E Mapping bestand,  $F(2, 44) = 1.32$ ,  $p > .28$ . Ebenso fand sich keine systematische Interaktion zwischen dem SOA und der R-E Kompatibilität,  $F(2, 44) = 0.46$  (vgl. Abbildung 7.3). Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .45$ ).

Die Analyse des zeitlichen Verlaufs des S-E Kompatibilitätseffektes über die Reaktionszeitquintile hinweg ergab keine Hinweise auf abnehmende Effektstärken mit zunehmendem Reaktionszeitniveau,  $F(8, 176) = 0.27$ , für die Interaktion von S-E Kompatibilität und RT2-Quartil.

### **Fehlerraten**

Die mittlere Fehlerrate in der Erstaufgabe betrug 0.5% und war demzufolge zu niedrig für eine inhaltlich bedeutsame Auswertung. Die mittlere Fehlerrate (PE2) in der Zweitaufgabe betrug 1.8%. Die PE2 fiel bei inkompatiblen gegenüber kompatiblen R–E Mapping in der Zweitaufgabe 0.7% größer aus,  $F(1, 47) = 7.34$ ,  $p = .01$ . Kein weiterer Effekt erreichte die Signifikanzgrenze (alle  $ps > .07$ ).

### **7.1.3 Diskussion**

In Experiment 7 sollten die in den vorangegangenen Experimenten gefundenen Unterschiede zwischen induzierten und antizipierten Handlungseffekten unter Verwendung aufgabenrelevanter und demnach intendierter distaler Handlungseffekte repliziert werden. Hierzu wurde die von Hommel (1993) modifizierte, instrumentelle Version der Simon-Aufgabe als Zweitaufgabe innerhalb des PRP-Paradigmas implementiert. Die Ergebnisse von Experiment 7 entsprechen den Hypothesen.

Zum einen fand sich ein S–E Kompatibilitätseffekt zwischen der aufgabenirrelevanten Lokation der Stimulustöne und der durch die Tonhöhe signalisierten Lokation der herzustellenden Handlungseffekte, unabhängig der Zuordnung dieser Handlungseffekte zu den erforderlichen Reaktionen. Damit konnte die effektabhängige Invertierung des Simon-Effekts in einer Doppelaufgabensituation repliziert werden. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 7.4 noch einmal die Reaktionszeiten der Zweitaufgabe mit einem 1500-ms SOA, welches eine unbeeinträchtigte, serielle Bearbeitung beider Aufgaben ermöglichen sollte, als Funktion der Kompatibilität der Stimuluslokation zur Tastenlokation (mithin der S–R Kompatibilität), getrennt für die beiden R–E Mappings, dargestellt. Während sich mit einem kompatiblen R–E Mapping der übliche Simon-Effekt fand, kehrte sich bei einem inkompatiblen R–E Mapping die Richtung des Effekts um. Diese Interaktion indiziert, dass die Versuchspersonen der Instruktion folgend die Reaktionen



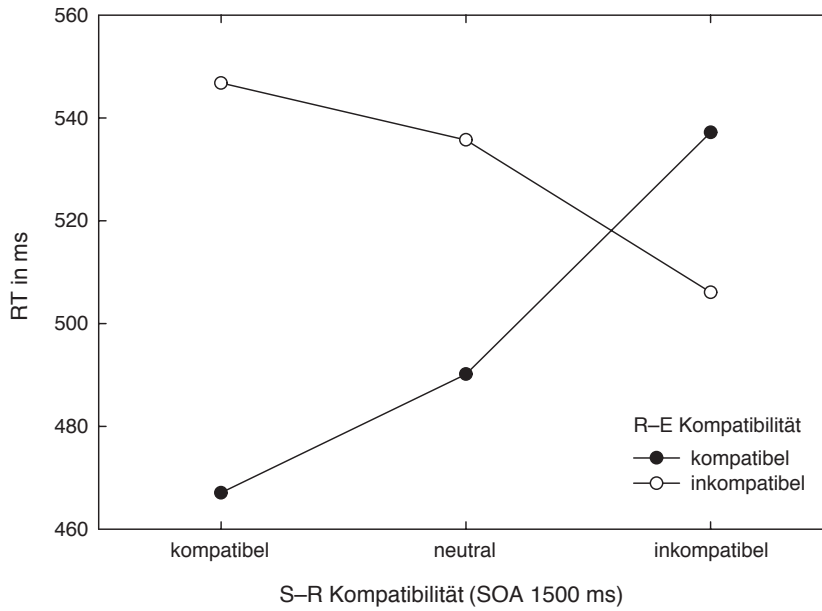


Abbildung 7.4: Mittlere Reaktionszeiten (RTs) in der Zweitaufgabe in Experiment 7 bei einer Stimulus Onset Asynchronie von 1500 ms als Funktion der Stimulus–Reaktions (S–R) Kompatibilität und der Reaktions–Effekt (R–E) Kompatibilität in der Zweitaufgabe.

tatsächlich anhand der visuellen Effekte kodiert haben.

Das vorliegende Experiment stellt damit die bislang erste Replikation der Befunde Hommels (1993) dar. Neben der Richtung des Simon-Effekts entsprachen sich auch die Effektstärken weitgehend (55 ms im Vergleich zu 57 ms bei dem 1500-ms SOA). Dass die Replikation innerhalb des PRP-Paradigmas gelang ist durchaus bemerkenswert: Infolge der höheren kognitiven Belastung in Doppelaufgaben wäre es durchaus plausibel gewesen, dass die Versuchspersonen nicht der Instruktion folgen und stattdessen die geforderten Reaktionen bezogen auf die Tastendrücke kodieren. Hierzu hätte es

genügt, die instruierten S–R Regeln bezogen auf die Lokation der Tasten umzuformulieren (und entsprechend bei der Umkehrung des R–E Mappings die S–R Regeln ebenfalls zu invertieren). In diesem Sinne stellt die beobachtete Inversion des Simon-Effekts einen gelungenen Manipulationscheck für die Instruktion dar.

Weiterhin erwähnenswert sind die Befunde bei gleichzeitiger Präsentation der Stimuli aus beiden Lautsprechern. Diese im Hinblick auf die S–E Kompatibilität neutrale Bedingung bietet sich als Baseline für den Vergleich von Kosten und Nutzen bei der Induktion von Handlungseffekten an, welcher in den vorherigen Experimenten 5 und 6 nicht möglich war. Die im Ergebnis bei langem SOA gefundenen signifikanten Reaktionszeitunterschiede sowohl S–E kompatibler als auch S–E inkompatibler Durchgänge im Vergleich zu den neutralen Durchgängen deuten darauf hin, dass induzierte Handlungseffekte sowohl einen aktivierenden als auch inhibierenden Einfluss ausüben können.

Anhand der Reaktionszeiten in S–E neutralen Durchgängen wird jedoch auch erkennbar, dass die Inversion des Simon-Effekt nicht ohne Reaktionszeitkosten gelang. Dass heißt, es fand sich außerdem ein signifikanter Haupteffekt der R–E Kompatibilität in dem Sinne, dass die Reaktionszeiten unabhängig von der Lokation der Töne größer ausfielen, wenn zur Herstellung der Handlungseffekte eine Reaktion auf der jeweils anderen Seite erforderlich war. Dies repliziert die von Kunde (2001) berichteten, auf die Lokation von Handlungen und ihren Effekten bezogenen R–E Kompatibilitätseffekte. Dabei entsprach die Größenordnung des R–E Kompatibilitätseffektes den vorangegangenen Experimenten 2–4 bzw. 6, in denen die Handlungseffekte für die Aufgabenstellung irrelevant waren.

Relevant für die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung war jedoch vor allem, ob und inwieweit die beiden Kompatibilitätseffekte in unterschiedlicher Weise mit dem SOA interagieren. Die Ergebnisse von Experiment 7 entsprachen diesbezüglich den auf der Basis der bisherigen Experimente formulierten Erwartungen. Analog zu Experiment 5 und 6 bestand ein Einfluss induzierter Effektmerkmale nur bei langem SOA. Wie der

Vergleich kompatibler und inkompatibler Durchgänge mit den neutralen Durchgängen aufzeigte, führte die Reduktion des SOAs gleichermaßen zu einer Aufhebung der aktivierenden und der inhibierenden Wirkung wahrgenommener Handlungseffekte. Erneut erbrachte die Analyse der zeitlichen Dynamik des S–E Kompatibilitätseffektes keine Hinweise auf einen Zerfall der Aktivierung extern stimulierter Effektrepräsentationen, die zuvor als Ursache der unteradditiven Wechselwirkung von S–E Kompatibilität und SOA diskutiert wurden. Der Einfluss der R–E Kompatibilität, manipuliert durch die gleichseitige oder überkreuzte Verschaltung der Lampen mit den Tasten, bestand im Gegensatz dazu auf allen SOA-Stufen.

Gestützt durch die beobachtete statistische Unabhängigkeit von S–E und R–E Kompatibilität (vgl. die Diskussion in Experiment 6) erlauben die unterschiedlichen Interaktionen der beiden Kompatibilitätseffekte mit dem SOA nur die Schlussfolgerung, dass auch aufgabenrelevante induzierte bzw. antizipierte Handlungseffekte Prozesse zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Handlungssteuerung beeinflussen. Der Logik der *Locus-of-slack* Prozedur folgend weisen die Ergebnisse dabei auf einen Wirkungszeitpunkt induzierter bzw. antizipierter Handlungseffekte vor bzw. während dem Flaschenhals der finalen Reaktionsauswahl hin.



# **Teil III**

## **Abschlussdiskussion**



# Kapitel 8

## Integration der Befunde

Gegenstand dieser Arbeit sind die mentalen Vorgänge, welche der Selektion von Handlungen zugrunde liegen. Den theoretischen Ausgangspunkt bildete die ideomotorische Hypothese, deren Kernannahme darin besteht, dass Handlungen allein durch die Antizipation ihrer sensorisch erfahrbaren Konsequenzen ausgewählt und initiiert werden. Ziel der Arbeit war es, diese Annahme empirisch zu überprüfen.

Die konkrete Fragestellung lautete, inwieweit die in der kognitiven Psychologie üblicherweise als Reaktionsauswahl bezeichneten Prozesse der Handlungselektion funktional die Antizipation von Handlungseffekten beinhalten. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden insgesamt sieben Experimente durchgeführt, die innerhalb des PRP-Paradigmas spezifische, aus dem interaktiven Flaschenhals-Modell der Reaktionsauswahl abgeleitete Vorhersagen zur Interaktion des PRP-Effektes mit Einflüssen der Handlungs-Effekt Kompatibilität testeten. Im Folgenden sollen die wesentlichen theoretischen Ausgangspunkte, die zugrundeliegenden Hypothesen der einzelnen Experimente sowie deren Ergebnisse diskutiert werden.

## 8.1 Theoretischer Teil

Im theoretischen Teil dieser Arbeit wurde zunächst ein Überblick über die wissenschaftliche Entstehungsgeschichte der ideomotorischen Hypothese gegeben. Der Schwerpunkt lag in der Präsentation empirischer Evidenz zugunsten der Annahme der ideomotorischen Hypothese, dass Handlungen ausschließlich in Form ihrer sensorischen Effekte repräsentiert sind. Aus dieser Perspektive gibt es letztlich keine Möglichkeit der Handlungsauswahl, die ohne eine Aktivierung der Repräsentationen dieser sensorischen Konsequenzen auskommt.

Einen überzeugenden Beleg für diese Annahmen stellen Kompatibilitätseffekte zwischen Handlungen und ihren distalen sensorischen Konsequenzen dar. Diese beruhen zum einen auf der bereits von James (1890) vorgenommenen Annahme, dass nicht nur die Vorstellung einer Handlung selbst, sondern auch die Antizipation ihrer distalen Wirkungen in der Umwelt zur Aktivierung der entsprechenden Handlungsrepräsentationen führt. Entsprechend sollten effektbasierte Handlungsrepräsentationen nicht nur körperbezogene, sondern auch körperferne Handlungseffekte einschließen. Weiterhin machen sich Kompatibilitätseffekte zwischen Handlungen und ihren Effekten die Annahmen zum automatischen Erwerb effektbasierter Handlungsrepräsentationen zu Nutze. Die ideomotorische Hypothese bedingt zwangsläufig einen Lernmechanismus, welcher zum Erwerb bidirektionaler Assoziationen zwischen den zur Handlungsausführung notwendigen motorischen Programmen auf der einen und den Repräsentationen der sensorischen Effekte der Handlung auf der anderen Seite führt (vgl. Abschnitt 2.1). Die hierzu von verschiedenen Autoren postulierten Lernmechanismen gehen übereinstimmend davon aus, dass solche Assoziationen automatisch und vor allem unabhängig von der Verhaltensrelevanz der sensorischen Effekte entstehen.

Im Abschnitt 2.2 des theoretischen Teils dieser Arbeit wurden zwei experimentelle Ansätze zur Variation der Kompatibilität von Handlungen und ihren Effekten vorgestellt, die auf den genannten Annahmen beruhen. Bei-



den Ansätzen ist gemeinsam, dass innerhalb von Wahlreaktionsaufgaben zusätzliche, aufgabenirrelevante Handlungseffekte eingeführt werden. Die kritische Manipulation besteht jeweils in der Variation der Kompatibilität dieser Handlungseffekte mit den imperativen Stimuli bzw. den geforderten Reaktionen. Der Begriff der Kompatibilität bezieht sich hierbei auf die perzeptuell bzw. konzeptuell vergleichbare Ausprägung von Effekt-, Reaktions- sowie Stimulusmerkmalen, hinsichtlich derer eine dimensionale Überlappung besteht (Kornblum et al., 1990, 1999). Beide Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Art der Aktivierung der Effektrepräsentationen:

Im Interferenz- bzw. Transferparadigma (Hommel, 1996; Elsner & Hommel, 2001) werden die Handlungseffekte vor der Ausführung der geforderten Handlung extern stimuliert, indem sie in die Stimuli integriert werden oder direkt als imperative Stimuli dienen. Aufbauend auf der Induktionslogik Greenwalds (1970c, 1972) wird davon ausgegangen, dass die Wahrnehmung von Stimuli, welche perzeptuell den Handlungseffekten einer der geforderten Reaktion ähnlich sind, die Aktivierung der sensorischen Repräsentationen der Handlungen stimuliert und die korrespondierende Reaktion damit quasi induziert.

Bei der von Kunde (2001) vorgeschlagenen Variation der Reaktions-Effekt Kompatibilität werden die distalen Handlungseffekte dagegen immer erst nach der Ausführung der geforderten Reaktion präsentiert. Hier wird davon ausgegangen, dass die Antizipation der distalen Effekte im Rahmen der Handlungsplanung gleichbedeutend mit einer endogenen Aktivierung der entsprechenden Repräsentationen ist, welche wiederum mit der Aktivierung der Repräsentationen proximaler Handlungseffekte interferiert, sofern eine dimensionale Überlappung zwischen den proximalen und distalen Handlungseffekten besteht.

Die mit beiden Ansätzen beobachteten empirischen Phänomene unterstreichen gleichermaßen die funktionelle Bedeutung der Antizipation sensorischer Handlungseffekte im Rahmen der Handlungssteuerung. Darüber hinaus stellen die beiden Paradigmen geeignete inferentielle Instrumente in der Untersuchung der zugrundeliegenden Prozesse der Effektkodeaktivie-

rung dar (vgl. Abschnitt 2.2.3). So konnte hinsichtlich des Repräsentationsformates gezeigt werden, dass Kompatibilitätseffekte zwischen Handlungen und Effekten nicht auf anschauliche Merkmale beschränkt sind, sondern auch bei abstrakter Merkmalsüberlappung zu finden sind (Koch & Kunde, 2002). Hinsichtlich des Aktivierungsverlaufes ergaben sich Hinweise auf eine über die Handlungsplanung hinaus anhaltende Aktivierung von Effektrepräsentationen, insofern sich die Kompatibilitätseffekte auch auf die Umsetzung einer Handlung auswirken (Kunde et al., 2004).

Gleichzeitig weisen die auf der ideomotorischen Hypothese basierenden Modelle der Handlungssteuerung noch konzeptuelle Schwächen auf (vgl. Abschnitt 2.3). Insbesondere ist bislang die Frage nach der funktionalen Äquivalenz von Effektantizipation und Handlungsselektion ungeklärt. Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die zeitliche Lokalisierung der als Indikator für die Aktivierung von Effektrepräsentationen dienenden Kompatibilitätseffekte zwischen Handlungen und ihren Effekten relativ zu Prozessen der Handlungsselektion, wie sie von Modellen der Informationsverarbeitung für Wahlreaktionsaufgaben angenommen werden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde in der vorliegenden Arbeit das Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode herangezogen (vgl. Kapitel 3). Ausgehend von der Annahme eines Reaktionsauswahl-Flaschenhalses in Doppelaufgaben (Pashler, 1984, 1994a) ermöglicht es die Lokalisierung experimenteller Manipulationen relativ zu Prozessen der Reaktionsauswahl (Pashler & Johnston, 1989, 1998; McCann & Johnston, 1992). Wenn auch die zeitliche Auflösung relativ grob erscheint, so bietet dieses elaborierte Paradigma jedoch den Vorteil, dedizierte Hypothesen zur Lokalisierung eines experimentellen Faktors empirisch prüfen zu können.

Die theoretische Basis für diese Hypothesen bildete in der vorliegenden Arbeit Liens interaktives Zwei-Prozess Modell der Reaktionsauswahl (Lien, 2001; Lien & Proctor, 2002). Lien postuliert (neben der perzeptuellen Verarbeitung) insgesamt drei reaktionsbezogene Prozesse, die teilweise parallel, teilweise seriell ablaufen: automatische Reaktionsaktivierung, finale Reaktionsauswahl und Reaktionsinitiierung. Der wesentliche Unterschied dieses

Modells zu klassischen Flaschenhals-Modellen (Pashler, 1984, 1994a) besteht in der Ausdifferenzierung der Reaktionsauswahlprozesse in Reaktionsaktivierung und finale Reaktionsauswahl (vgl. Abschnitt 3.2.3). Während die Reaktionsaktivierung, basierend auf bereits bestehenden sowie aufgabenbezogenen S–R Assoziationen, automatisch und für beide Aufgaben parallel erfolgen kann, stellt die finale Reaktionsauswahl selbst bei hochgradig überlernten bzw. S–R kompatiblen Wahlreaktionsaufgaben einen Engpass dar und kann daher in Doppelaufgaben immer nur seriell für jeweils eine der beiden Aufgaben erfolgen.

Innerhalb des PRP-Paradigmas trifft Liens interaktives Zwei-Prozess Modell der Reaktionsauswahl Vorhersagen zu Interferenzen sowohl zwischen inhaltlich unabhängigen, seriell ablaufenden Prozessen der finalen Reaktionsauswahl (prozessbasierte Interferenz) als auch zwischen parallel ablaufenden, inhaltlich überlappenden Prozessen der automatischen Reaktionsaktivierung (inhalts- bzw. kodebasierte Interferenz, vgl. Koch, in press). Für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit sind nun nicht primär diese in Doppelaufgaben per se auftretenden Interferenzen, sondern deren Interaktion mit zu lokalisierenden experimentellen Manipulationen relevant. Hierzu wurden in Abschnitt 3.3 drei experimentelle Prozeduren vorgestellt: die inhaltsbasierte *Cross-task* Prozedur sowie die prozessbasierten *Locus-of-slack* und *Effect-propagation* Prozeduren. Die Kombination dieser teilweise zueinander komplementären Verfahren ermöglicht anschließend die Bestimmung des Wirkungsortes der experimentellen Manipulationen relativ zu den drei reaktionsbezogenen Prozessen der automatischen Reaktionsaktivierung, finalen Reaktionsauswahl sowie Reaktionsinitiierung.

## 8.2 Empirischer Teil

Im empirischen Teil der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt sieben, auf dem Paradigma der Psychologischen Refraktärperiode basierende Experimente berichtet. In jedem dieser Experimente hatten die Versuchspersonen

jeweils zwei Wahlreaktionsaufgaben mit unterschiedlicher zeitlicher Überlappung zu bearbeiten. Wie erwartet fanden sich in allen Experimenten die für Doppelaufgabensituationen typischen Kosten in Form des PRP-Effekts, das heißt bei hoher zeitlicher Überlappung der beiden Aufgaben erfolgte die Bearbeitung der Zweitaufgabe nur unter großer Verzögerung.

Weiterhin wurde jeweils die Kompatibilität der im Experiment eingeführten distalen sensorischen Handlungseffekte zu den geforderten Handlungen variiert, wobei sich die Experimente hinsichtlich des Zeitpunktes der Präsentation der Handlungseffekte und damit der Art der Aktivierung der Repräsentationen unterschieden: In den Experimenten 1–4 wurden die Handlungseffekte immer erst nach der Ausführung der geforderten Reaktion präsentiert. Die resultierenden Kompatibilitätseffekte können daher nur durch die Antizipation dieser distalen Effekte und der demnach endogenen Aktivierung entsprechender Effektrepräsentationen erklärt werden. In den Experimenten 5–7 wurde dagegen die Aktivierung von Effektrepräsentationen zusätzlich extern stimuliert, indem Stimuli verwendet wurden, die Merkmale der Handlungseffekte aufwiesen. Die resultierenden Kompatibilitätseffekte beruhen entsprechend auf einer zusätzlichen exogenen Aktivierung der entsprechenden Effektrepräsentationen.

Für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit war entscheidend, inwieweit sich Kompatibilitätseffekte zwischen Wahlreaktionen und distalen Handlungseffekten in Doppelaufgabensituationen replizieren lassen, und sofern dies der Fall ist, wo sich diese relativ zu Prozessen der Reaktionsauswahl zeitlich verorten lassen. Die sieben vorgestellten Experimente erbrachten diesbezüglich konsistente und zueinander widerspruchsfreie Befunde. Zusammengefasst konvergieren sie zur der Schlussfolgerung, dass die Aktivierung von Effektrepräsentationen – in Abhängigkeit von einer zusätzlichen, externen Stimulation gegenüber einer ausschließlichen Antizipation der Handlungseffekte – zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Handlungssteuerung erfolgen kann.

Im ersten Schritt wurde geprüft, inwieweit sich zwischen zwei zeitlich überlappenden Aufgaben inhaltsspezifische Interferenzen auf der Basis an-

tizierter Handlungseffekte finden lassen. Entsprechend wurde in Experiment 1 anhand der *Cross-task* Prozedur die R-E Kompatibilität aufgabenübergreifend manipuliert. Es ergaben sich jedoch keine Hinweise für inhaltsspezifische Interferenzen in Abhängigkeit von der Kompatibilität der Reaktionen der Erst- mit den distalen Handlungseffekten der Zweitaufgabe. Dieses Ergebnis indiziert, dass es im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung nicht zu einer Aktivierung der verschiedenen, sowohl proximalen als auch distalen Effekte kommt, die in ihrer Gesamtheit die geforderte Reaktion repräsentieren. Offenbar ist eine solche synchrone Aktivierung erst zu einem späteren Zeitpunkt, womöglich innerhalb des Flaschenhalses der finalen Reaktionsauswahl und damit zu einem Zeitpunkt nur für jeweils eine der Aufgaben möglich.

Diese Annahme wird durch die hierzu konsistenten Ergebnisse der folgenden Experimente gestützt, in denen die Kompatibilität zwischen Handlungen und Effekten innerhalb einer Aufgabe variiert wurde und somit zwischen den beiden Aufgaben ausschließlich prozessbasierte Interferenz bestand:

Experiment 2, 3, 6 und 7 basierten auf der *Locus-of-slack* Prozedur; die Kompatibilität zwischen Handlungen und den nachfolgenden Handlungseffekten wurde demnach innerhalb der Zweitaufgabe manipuliert. In allen genannten Experimenten verhielten sich die Kompatibilitätseffekte additiv zum PRP-Effekt. Die endogene Aktivierung der Repräsentationen sowohl proximaler als auch distaler Handlungseffekte beginnt in der Zweitaufgabe offenbar erst nach dem *Cognitive slack*, wenn die seriell ablaufenden Prozesse der Reaktionsauswahl in der Erstaufgabe abgeschlossen sind.

Selbst wenn, wie in Experiment 7, die distalen Handlungseffekte das intendierte Handlungsziel darstellen, finden sich keine Hinweise auf einen Kompatibilitätseinfluss dieser Handlungseffekte vor dem Beginn des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses in der Zweitaufgabe. In das sich ergebende Bild einer relativ späten endogenen Aktivierung proximaler Effektkodes fügt sich auch die in Experiment 2 und 3 beobachtete Unabhängigkeit von R-E Kompatibilitätseffekten und Manipulationen der Schwierigkeit der Reiz-

verarbeitung. Der *Additive-factors* Logik (Sternberg, 1969) folgend sind die Prozesse der Reizverarbeitung abgeschlossen, wenn die endogene Aktivierung von Effektrepräsentationen beginnt.

Experiment 4 komplementiert diese Befunde anhand der *Effect-propagation* Prozedur. Die Variation der Kompatibilität zwischen Reaktionen und Reaktionseffekten in der Erstaufgabe führte erwartungsgemäß zu einer Leistungsbeeinflussung in der Erstaufgabe. Ebenso zeigte sich ein Einfluss in einer vergleichbaren Effekttärke auch in der Zweitaufgabe, obwohl zur Erstaufgabe keinerlei inhaltliche Überlappung bestand. Die endogene Aktivierung proximaler wie distaler Handlungseffekte in der Erstaufgabe, deren Interferenzen die Ursache für die beobachteten Kompatibilitätseffekte darstellen, war demnach vor der Freigabe des Flaschenhalses abgeschlossen.

Zusammengenommen ist die Interpretation der Ergebnisse zu antizipierten Handlungseffekten demnach eindeutig. Der Logik der *Cross-task* Prozedur folgend findet die endogene Aktivierung von Effektkodes innerhalb des PRP-Paradigmas für beide Aufgaben nicht parallel, sondern seriell statt. Der Logik der *Locus-of-slack* Prozedur folgend beginnt sie in Doppelaufgabensituationen offenbar erst nach Freigabe des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses und ist entsprechend der Logik der *Effect-propagation* Prozedur noch vor erneuter Freigabe dieses Flaschenhalses abgeschlossen.

Die Befunde zu induzierten Handlungseffekten werfen dagegen eine Reihe von Fragen auf. In den Experimenten 5–7, die jeweils auf der *Locus-of-slack* Prozedur basierten, wiesen die Stimuli zusätzlich Merkmale der Handlungseffekte auf. So wurden in Experiment 5 in einer vorausgehenden Lernphase frei ausgewählte Handlungen mit visuellen Effekten gekoppelt. In der darauf folgenden Testphase wurden diese Handlungseffekte in die Stimuli der Zweitaufgabe integriert. Erwartungsgemäß fand sich hier ein Einfluss der Kompatibilität der wahrgenommenen Handlungseffekte zu den geforderten Reaktionen, in dem Sinne, dass Reaktionen schneller erfolgten, wenn die Stimuli den assoziierten visuellen Effekten der geforderten Reaktion entsprachen. Wie von Modellen des Handlungs-Effekt Lernens (Greenwald, 1970c, 1970a; Hommel, 1996, 1997; Elsner & Hommel, 2001) vorhergesagt, erwiesen

sich die in der Lernphase erworbenen Assoziationen zwischen Handlungen und ihren distalen Effekten in der Testphase als verhaltenswirksam, insofern die externe Stimulation von Effektrepräsentationen die assoziierten Handlungen bahnte. Die hierzu vorliegenden Befunde von Hommel (1996) und Elsner und Hommel (2001) konnten somit im Doppelaufgabenkontext repliziert werden.

Soweit von diesen Autoren angenommen wird, dass die exogene Aktivierung von Effektrepräsentationen Prozesse der Reaktionsauswahl beeinflusst, wären für die aus induzierten Handlungseffekten resultierenden Kompatibilitätseffekte vergleichbare Befunde wie bei antizipierten Effekten zu erwarten. Umso überraschender der Befund, dass der auf induzierten Handlungseffekten basierende Kompatibilitätseffekt in Experiment 5 mit dem PRP-Effekt interagiert. Ein Einfluss induzierter Effekte fand sich nur bei langem SOA, also unter Bedingungen, die mit einer seriellen Bearbeitung der beiden Aufgaben vergleichbar sind. Bei kurzem SOA und damit deutlicher zeitlicher Überlappung beider Aufgaben hingegen verschwand dieser Einfluss vollständig. Der Logik der *Locus-of-slack* Prozedur folgend indiziert dieser Befund, dass der Einfluss wahrgenommener Handlungseffekte in den *Cognitive slack* absorbiert wird, wenn der Flaschenhals der Reaktionsauswahl noch von der Erstaufgabe belegt ist.

Die Wechselwirkung des Einflusses der Kompatibilität induzierter Handlungseffekte mit dem PRP-Effekt konnte in Experiment 6 und 7 repliziert werden. Gleichzeitig wurde in diesen beiden Experimenten die Kompatibilität der nachfolgenden Handlungseffekte zu den Reaktionen manipuliert. Dadurch konnten die distinkten Interaktionen der auf antizipierten bzw. induzierten Handlungseffekten beruhenden Kompatibilitätseffekte mit dem PRP-Effekt innerhalb eines Experiments untersucht werden. Mögliche Unterschiede zwischen den Experimenten können daher als Ursache für die unterschiedliche Wirkung antizipierter und induzierter Handlungseffekte ausgeschlossen werden. Insofern auch ein Zerfall der exogen stimulierten Aktivierung angesichts der vorliegenden Daten zum Zeitverlauf der Kompatibilitätseffekte in allen drei genannten Experimenten keine viable Erklärung

darstellt (vgl. hierzu auch die ausführliche Diskussion in Abschnitt 6.1.3), lässt der Befund der unteradditiven Wechselwirkung nur den Schluss zu, dass wahrgenommene Handlungseffekte Prozesse vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals beeinflussen.

Bevor im nächsten Kapitel die Implikationen dieser Schlussfolgerung für Modelle effektbasierter Handlungssteuerung diskutiert werden können, muss jedoch die Frage geklärt werden, inwieweit die auf induzierten Handlungseffekten basierenden Kompatibilitätseffekte überhaupt einen Indikator für eine Beeinflussung *reaktionsbezogener* Prozesse darstellen. Schließlich werden innerhalb des PRP-Paradigmas, ausgehend vom klassischen Flaschenhals-Modell von Pashler (1984, 1994a), unteradditive Wechselwirkungen als Hinweis auf Manipulationen der Stimulusverarbeitung aufgefasst (Pashler & Johnston, 1989, 1998).

Eine mit den vorliegenden Ergebnissen konsistente und ausschließlich auf der Beeinflussung von Prozessen der Stimulusverarbeitung beruhende Erklärung bestünde darin, dass wahrgenommene Handlungseffekte, sofern sie wie im vorliegenden Fall in Form aufgabenirrelevanter Stimulusmerkmale in die Wahlreaktionsaufgaben implementiert sind, ausschließlich die Identifikation der relevanten Stimulusmerkmale beeinflussen. Für die Bearbeitung der Wahlreaktionsaufgaben war es jeweils erforderlich, aufgabenrelevante Stimulusmerkmale mit den gemäß der Instruktion herzustellenden Reaktionen bzw. Reaktionseffekten durch Stimulus-Reaktions-Regeln zu verknüpfen. Womöglich entstehen jedoch im Verlauf des Experiments direkte Assoziationen zwischen den relevanten Stimulusmerkmalen und den auf die korrespondierende Reaktion folgenden irrelevanten Handlungseffekten. Sofern solche direkten Assoziationen existieren sollten, könnten wiederum die in die Stimuli integrierten irrelevanten Effektmerkmale die Verarbeitung der relevanten Stimulusmerkmale und damit die Reaktionszeiten beeinflussen, ohne dass es zu einer Bahnung der assoziierten Reaktionen kommt.

Um ein Beispiel zu geben, stelle man sich einen Durchgang der Testphase in Experiment 5 vor: Ein grosser Kreis (der Handlungseffekt eines linken Tastendrucks) wird mit rotem Rand (dem imperativen Stimulusmerk-



mal für einen linken Tastendruck) präsentiert. Sofern direkte Assoziationen zwischen der Farbe des Randes und dem auf die Reaktion nachfolgenden Handlungseffekt (dem großen Kreis) existieren, so würde das irrelevante Stimulusmerkmal Größe (in diesem Beispiel der große Kreis) womöglich die Verarbeitung der Farbe des Kreisrandes (in diesem Fall der Farbe „rot“) bahnen bzw. beschleunigen. Die Darbietung eines Stimulus mit integriertem inkompatiblen Handlungseffekt (in diesem Beispiel ein kleiner Kreis mit rotem Rand) würde dagegen die Wahrnehmung der der alternativen Reaktion zugeordneten Farbe „grün“ bahnen.

Vergleichbare, rein stimulusbasierte Erklärungsansätze des Simon-Effekts (Hasbroucq & Guiard, 1991) ließen sich empirisch nicht bestätigen (Hommel, 1995; Lu & Proctor, 1994; Proctor, Lu & Van Zandt, 1992). Folgt man dennoch dieser Argumentation, so könnte zumindestens anhand der vorliegenden Daten nicht ausgeschlossen werden, dass der beobachtete Einfluss induzierter Handlungseffekte womöglich nur auf eine Bahnung der relevanten Stimulusmerkmale und nicht der Reaktionen zurückgeht. Selbst wenn nur ein Teil der Kompatibilitätseinflüsse aufgrund wahrgenommener Handlungseffekte tatsächlich auf eine Beeinflussung der Stimulusidentifikation zurückgeht, würde dies die Interpretation von Befunden einschränken, die anhand vergleichbarer Varianten des Induktionsparadigmas gewonnen wurden (Beckers, De Houwer & Eelen, 2002; Drost, Rieger, Brass, Gunter & Prinz, 2005; Hommel, 1996, 2004; Ziessler & Nattkemper, 2002; Ziessler et al., 2004).

Für die ideomotorische Hypothese sind solche, rein stimulusbasierten Erklärungsansätze schon allein deshalb problematisch, da aus ihrer Sicht bei der Induktion von Handlungseffekten keine unabhängige Aktivierung von Stimulus- und Handlungskodes möglich ist: Die Wahrnehmung eines distalen Handlungseffektes führt zwangsläufig zur Aktivierung der ihn repräsentierenden kognitiven Kodes. Insofern jedoch Handlungen in Form solcher sensorischen Kodes ihrer distalen sowie proximalen Effekte repräsentiert sind, wurden durch die Wahrnehmung dieser Handlungseffekte automatisch Teile der Repräsentation einer Handlung aktiviert.

Für diese Annahme gibt es auch neurophysiologische Evidenz. So führten Einzelzelleableitungen bei Makaken zur Entdeckung von sogenannten „Spiegelneuronen“ im prämotorischen Cortex, die sowohl bei der Beobachtung als auch bei der Ausführung derselben Handlung feuern (Gallese, Fadiga, Fogassi & Rizzolatti, 1996; Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996). Eine Studie von Fadiga, Fogassi, Pavesi und Rizzolatti (1995) deutet auf ein vergleichbares System bei Menschen hin. Weiterhin konnten Elsner et al. (2002) als auch Melcher, Weidema, Eenshuistra, Hommel und Gruber (in press) demonstrieren, dass die Wahrnehmung von auditiven Handlungseffekten zu einer Aktivierung kortikaler Areale führt, die an der Handlungsplanung beteiligt sind, wie beispielsweise dem prä-supplementär-motorischen Areal.

Nun können Stimulusdiskrimination und Handlungsauswahl, selbst wenn sie neuronale Mechanismen teilen, das heißt zumindest teilweise von gleichen Neuronenpopulationen ausgeführt werden, funktionell immer noch dissoziierbar sein (Jiang & Kanwisher, 2003). Eine funktionelle Trennung wäre beispielsweise durch distinkte Verarbeitungsphasen oder -prozesse innerhalb der gleichen Populationen möglich (Singer, 1993). Dennoch widersprechen die neurophysiologischen Befunde einem Erklärungsansatz auf der Basis einer ausschließlichen Beeinflussung der Stimulusidentifikation und stützen vielmehr die Annahme, dass die Wahrnehmung von Handlungseffekten tatsächlich zur Aktivierung von Effektrepräsentationen führt. Die aus Sicht der *Locus-of-slack* Logik naheliegende Erklärung einer ausschließlichen Beeinflussung perzeptueller Prozesse muss daher verworfen werden.

Wenn die Wahrnehmung von Handlungseffekten zu einer Aktivierung von Effektkodes noch vor der Reaktionsauswahl führt, ergibt sich jedoch die Frage, inwieweit diese Aktivierung verhaltenswirksam wird, ohne die Prozesse im Reaktionsauswahl-Flaschenhals zu beeinflussen. Eine mit den vorliegenden Daten konsistente Erklärung, welche die reaktionsaktivierende Wirkung wahrgenommener Handlungseffekte beibehält, erfordert die Erweiterung des klassischen Reaktionsauswahl-Flaschenhalsmodells um reaktionsbezogene Prozesse, die noch vor dem Flaschenhals parallel für beide Aufgaben ablaufen. In den Zwei-Prozess Modellen der Reaktions-

auswahl von Hommel (1998a) und Lien und Proctor (2000, 2002) ist eine solche Erweiterung vorgenommen worden durch die Unterscheidung der Reaktionsauswahl in zwei Prozesse, der automatischen Reaktionsaktivierung sowie der finalen Reaktionsauswahl. Zusammen mit der Annahme, dass die Reiz-Reaktions-Übersetzung unmittelbar nach der Stimulusidentifikation beginnt und die Reaktionsaktivierung somit noch vor dem darauf folgenden Reaktionsauswahl-Flaschenhals abgeschlossen ist, ergibt sich aus Sicht der *Locus-of-slack* Logik die Vorhersage, dass experimentelle Manipulationen der Reaktionsaktivierung in einer unteradditiven Wechselwirkungen mit dem SOA resultieren.

Die beobachtete unteradditive Wechselwirkung der S-E Kompatibilität mit dem SOA kann nun erklärt werden, ohne eine ausschließliche Beeinflussung perzeptueller Prozesse oder einen Zerfall der Aktivierung stimulierter Effektkodes annehmen zu müssen: Stimuli, die zumindestens teilweise den Handlungseffekten einer der Reaktionsalternativen entsprechen, aktivieren korrespondierende Effektrepräsentationen. Diese Aktivierung wiederum interferiert mit der auf S-R Regeln basierenden Reaktionsaktivierung durch die relevanten Stimulusmerkmale. Die resultierenden Kompatibilitätseffekte werden bei kurzem SOA in den zwischen Reaktionsaktivierung und Reaktionsauswahl entstehenden *Cognitive slack* absorbiert, was zu einer Reduktion der beobachteten Reaktionszeitdifferenzen führt.

Innerhalb eines solchen Erklärungsansatzes sind wahrgenommene Handlungseffekte – wie von der ideomotorischen Hypothese angenommen – in der Lage, die mit ihnen assoziierten Handlungen zu induzieren. Die eigentliche Auswahl und Ausführung der Handlung ist jedoch an seriell ablaufende Prozesse der finalen Reaktionsauswahl (Lien & Proctor, 2002) gebunden, selbst im Falle hochgradiger Übereinstimmung der Stimuli mit den Handlungseffekten (vgl. die persistierenden Doppelaufgabenkosten bei ideomotor-kompatiblen Aufgaben, Lien et al., 2005b). Dieser Flaschenhals der finalen Reaktionsauswahl fällt zeitlich mit der endogenen Aktivierung von Effektkodes zusammen.



# Kapitel 9

## Implikationen für Modelle effektbasierter Handlungsauswahl

Im Hinblick auf die Fragestellung indizieren die empirischen Befunde der vorliegenden Arbeit, dass Repräsentationen distaler Handlungseffekte zur Auswahl der Reaktionen endogen aktiviert werden, unabhängig von der Relevanz dieser Handlungseffekte für die jeweilige Aufgabe. Diese Aktivierung fällt in Wahlreaktionsaufgaben zeitlich mit einem Prozess zusammen, der in Zwei-Prozess-Modellen der Reaktionsauswahl (Hommel, 1998a; Lien, 2001; Lien & Proctor, 2002) als finale Reaktionsauswahl bezeichnet wird und einen Engpass in Doppelaufgabensituationen darstellt. Die exogene Stimulation von Effektrepräsentationen durch die vorangehende Präsentation von Handlungseffekten beeinflusst dagegen reaktionsbezogene Prozesse, die zeitlich vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals ablaufen.

Die empirischen Befunde der vorliegenden Arbeit stehen grundsätzlich im Einklang mit der Kernannahme der ideomotorischen Hypothese, dass die Auswahl einer Handlung durch die Antizipation ihrer sensorischen Effekte erfolgt. Dass zumindestens eine endogene Aktivierung von Effektrepräsentationen zu einem Zeitpunkt in der Handlungsplanung erfolgt, der in Modellen der Informationsverarbeitung als Reaktionsauswahl bezeichnet

wird, ist konsistent mit entsprechenden Annahmen existierender Modelle effektbasierter Handlungssteuerung (bspw. Elsner & Hommel, 2001; Hoffmann, 1993; Hommel, 1996, 1997; Hommel et al., 2001). Über die Frage nach der funktionellen Äquivalenz von Effektantizipation und Handlungsauswahl hinaus enthalten die Befunde Implikationen hinsichtlich zweier Aspekte, des Zeitverlaufs der Aktivierung sowie hinsichtlich möglicher Interaktionen endogener und exogener Effektkodeaktivierung, die im Folgenden erläutert werden sollen.

Es gilt es jedoch festzuhalten, dass die Experimente der vorliegenden Arbeit zunächst die zeitliche Lokalisation der Kompatibilitätseffekte ermöglichen; der diesen Effekten zugrunde liegende Einfluss distaler Handlungseffekte auf die Ausführung von Wahlreaktionsaufgaben wiederum stellt ein Indiz für die Aktivierung entsprechender Repräsentationen bzw. Codes dar. Aussagen über diese nicht direkt beobachtbaren Prozesse sind spekulativer Natur; die in den folgenden Überlegungen skizzierte weitergehende Spezifizierung des strukturellen und zeitlichen Ablaufs der Aktivierung von Effektrepräsentationen innerhalb der Handlungssteuerung ist daher als hypothetisch anzusehen.

## **9.1 Der Zeitverlauf der Effektkodeaktivierung**

Zur Erklärung von Kompatibilitätseffekten zwischen Handlungen und antizipierten Handlungseffekten wurde von Kunde et al. (2004) ein Schwellenmodell der Reaktionsgenerierung vorgeschlagen. Die Spezifikation einer Handlung erfolgt demnach durch die graduelle Aktivierung von Repräsentationen aller proximalen und distalen, sowohl intendierter als auch aufgabenirrelevanter Handlungseffekte. Überschreitet die Effektkode-Aktivierung die Initiierungsschwelle, gelangt die mit den Effekten assoziierte Bewegung automatisch zur Ausführung. Aus Sicht dieses Modells stellt die Initiierung einer Handlung funktionell keinen diskreten Prozess dar, sondern ergibt sich zwangsläufig aus der kontinuierlichen Fortsetzung der Reaktionsauswahl

durch Aktivierung von Effektkodes (vgl. hierzu auch Klapp, 1995).

Analog zu Modellen der S-R Kompatibilität zwischen dimensional überlappenden Reizen und Reaktionen (Kornblum et al., 1990, 1999; Kornblum & Stevens, 2002; Stevens & Kornblum, 2000) gehen Kunde et al. (2004) in ihrem Schwellenmodell davon aus, dass Kompatibilitätseffekte zwischen dimensional überlappenden, distalen und proximalen Handlungseffekten aus der gegenseitigen Bahnung bzw. Interferenz während der Aktivierung der entsprechenden Effektrepräsentationen im Rahmen der Reaktionsauswahl resultieren. Demnach interagieren distale und proximale Effektkodes miteinander, so wie dimensional überlappende Reize und Reaktionen in S-R Kompatibilitätsexperimenten interagieren: Die Aktivierung eines herzustellenden distalen Effektkodes bahnt hierzu kompatible proximale Effektkodes, was bei zueinander kompatiblen Reaktionen und Effekten zu einem schnelleren Aufbau der Aktivierung aller Effektkodes führt. Im Falle zueinander inkompatibler proximaler und distaler Handlungseffekte ist die gegenseitige Bahnung jedoch abträglich. Die Aktivierung eines intendierten distalen Handlungseffekts bahnt in diesem Fall proximale Handlungseffekte einer alternativen Handlung, die es jedoch zu inhibieren gilt. Dies verzögert die notwendige Aktivierung der proximalen Effektkodes der tatsächlich geforderten Handlung oder führt womöglich zur Auswahl der falschen Handlung.

Anhand der empirischen Befunde der vorliegenden Arbeit zu antizipierten Handlungseffekten kann das Schwellenmodell von Kunde et al. (2004) hinsichtlich des Zeitverlaufs der Effektkodeaktivierung wie folgt spezifiziert werden:

### **Beginn der Aktivierung**

Die Annahme des Beginns der parallelen Aktivierung der Repräsentationen aller proximaler wie distaler Handlungseffekte direkt im Anschluss an die Stimulusverarbeitung muss revidiert werden. Die Ergebnisse der Experimente zu antizipierten Handlungseffekten deuten auf einen relativ späten Aktivierungsbeginn von Effektrepräsentationen innerhalb der Handlungssteuerung

hin. Offenbar beginnt die parallele Aktivierung der proximalen und distalen Effektkodes einer Handlung in Wahlreaktionsaufgaben nicht unmittelbar nach der Reizverarbeitung, sondern erst innerhalb des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses. Diese Schlussfolgerung überrascht angesichts der zentralen Rolle zu erzielender Handlungseffekte in der Handlungssteuerung. Die zugrunde liegenden Befunde konnten jedoch innerhalb der Arbeit mehrfach repliziert werden und hatten vor allem auch dann Bestand, wenn die distalen Effekte das eigentlich intendierte Handlungsziel darstellten (Experiment 7).

Hinsichtlich des gewählten Indikators für die Aktivierung von Effektrepräsentationen ist anzumerken, dass der Einfluss der R-E Kompatibilität auf der Kompatibilitätsbeziehung zwischen mehreren dimensional überlappenden, distalen und proximalen Effekten der geforderten Wahlreaktionen beruht. Die im Schwellenmodell angenommene Interferenz während der Aktivierung der entsprechenden Effektrepräsentationen im Rahmen der Reaktionsauswahl setzt entsprechend voraus, dass es zu einer synchronen Aktivierung aller, sowohl intendierter als auch aufgabenirrelevanter Effektkodes kommt, die in ihrer Gesamtheit die geforderte Reaktion repräsentieren. Unterstützung findet diese Annahme beispielsweise bei Hommel et al. (1996; 2001).

Allerdings spekulierten kürzlich Hoffmann, Butz, Herbort, Kiesel und Lenhard (2007), dass Aktions-Effekt-Beziehungen in kaskadisch organisierten Regelungsprozessen aufgehoben sind, innerhalb derer ausgehend von den intendierten Handlungseffekten erst effektorunspezifische und schließlich effektorspezifische Aktionsparameter (jeweils situationsspezifisch) abgeleitet werden. Aus dieser Sicht beginnt die Handlungsspezifikation zunächst mit der Aktivierung ausschließlich distaler Effekte. Erst mit zunehmender zeitlicher Nähe zur Initiierung der Handlung werden auch proximale Effektkodes aktiviert, die letztlich nur noch mit einem Muster von Muskelkontraktionen assoziiert sind.

Geht man von einer zeitlich gestaffelten anstatt einer synchronen Aktivierung distaler und proximaler Effektkodes aus, so schliessen die vorliegenden Befunde nicht mehr aus, dass Repräsentationen intendierter Handlungsef-



fekte auch vor der finalen Reaktionsauswahl aktiviert sein könnten, insofern R–E Kompatibilitätseffekte nur indikativ für eine parallele Aktivierung korrespondierender Effektkodes sind. Eine Aktivierung der effektorunspezifischen Kodes intendierter Handlungsziele noch vor der Reaktionsauswahl erscheint dabei aus zwei Gründen plausibel.

Zum einen bedingen die spezifischen Umstände einer Wahlreaktionsaufgabe, dass notwendigerweise alle Reaktions- bzw. Handlungsalternativen in irgendeiner Form vorab aktiviert sind. Für die Probanden stellt sich die experimentelle Situation im Labor so dar, dass einerseits die Trialabfolge zufällig gewählt und daher nicht vorhersehbar ist. Gleichzeitig ist die Zahl der Reaktionsalternativen oft auf das mögliche Minimum beschränkt (siehe Prinz, 1983 für eine Diskussion der Repräsentativität dieser Laborbedingungen). Allein durch die Aufrechterhaltung der instruierten Reiz–Reaktions Verknüpfungen ist daher davon auszugehen, dass die Effektkodes aller Reaktions- bzw. Handlungsalternativen noch vor Präsentation des Stimulus ein erhöhtes Aktivierungsniveau aufweisen. Vergleichbare Annahmen finden sich nicht nur in effektbasierten Modellen der Handlungssteuerung wie der Theorie der Ereigniskodierung von Hommel et al. (2001, vgl. hierzu auch die Diskussion eines *prepared reflex* bei Hommel, 2000), sondern auch in neurokomputationalen Modellierungsversuchen der Reaktionsspezifikation, wie beispielsweise in Form des *preshape* Konzepts innerhalb der Dynamischen Feldtheorie von Erlhagen und Schöner (2002). Ebenso konnten Cisek und Kalaska (2005) auf neurophysiologischer Ebene zeigen, dass vom motorischen System zunächst alle Reaktionsoptionen aktiviert werden, bevor es nach Präsentation des Stimulus zur Reaktionsauswahl durch Aktivierung der geforderten Reaktion sowie Hemmung der verbleibenden Reaktionsoptionen kommt.

Hinzu kommt möglicherweise eine Aktivierung intendierter Reaktionen bzw. Handlungen im engeren Sinne, also der Effektkodes der angezeigten und letztlich tatsächlich auszuführenden Handlung, im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung. Hier werden durch Stimuli nur die gemäß Instruktion mit den relevanten Stimulusmerkmalen assoziierten Reaktionsmerkmale aktiviert; im Regelfall sind das die intendierten, dista-

len Effekte einer Handlung. Dies führt zu der Hypothese, dass die jeweils aufgabenrelevanten, intendierten Handlungseffekte in Wahlreaktionsaufgaben automatisch durch die assoziierten, reaktionsanzeigenden Stimuli noch vor dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals aktiviert werden. Sofern wie bei Hoffmann et al. (2007) die Annahme einer synchronen Aktivierung distaler und proximaler Effektkodes zugunsten einer zeitlich gestaffelten Aktivierung aufgegeben wird, sollten sich R-E Kompatibilitätseffekte dennoch erst zu einem späteren Zeitpunkt, womöglich im Flaschenhals lokalisieren lassen. Prinzipiell wären in Doppelaufgaben nun jedoch Interferenzen zwischen den intendierten distalen Effekten zweier zeitlich überlappender Wahlreaktionsaufgaben zu erwarten. Zwar konnten in der vorliegenden Arbeit keine aufgabenübergreifenden R-E Kompatibilitätseffekte demonstriert werden. Anhand der Einschränkung, dass im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung durch die Stimulusmerkmale nur Codes aufgabenrelevanter Effekte aktiviert werden, lässt sich das Ausbleiben entsprechender *Crosstalk*-Effekte im Experiment 1 im Nachhinein erklären. Die distalen Effekte der Zweitaufgabe variierten hier auf einer Dimension, welche nur für die Erstaufgabe aufgabenrelevant war. Entsprechend wären *Crosstalk*-Effekte zu erwarten, wenn die Probanden in der Zweitaufgabe bezogen auf die distalen Effekte instruiert werden, wie dies im Experiment 7 geschah.

Für die Umsetzung einer Handlung entscheidend sind jedoch nicht nur die distalen Codes einer Handlung. Die Aktivierung effektor-spezifischer proximaler Effektkodes, funktionell vergleichbar mit Aktionsparametern motorischer Programm-Theorien (Schmidt, 1975; Rosenbaum, 1980; Glover, 2004), ist letztlich, wenn auch zeitlich nachgelagert, zwingend erforderlich für die Spezifikation einer Handlung (vgl. die Überlegungen von Hoffmann et al., 2007). Sofern diese Aktivierung nicht sofort mit der Aktivierung effektorunspezifischer distaler Effektkodes startet, markiert ihre zeitliche Überlappung, angezeigt durch R-E Kompatibilitätseffekte, den Beginn der eigentlichen Reaktionsauswahl, an deren Ende die Initiierung der Handlung steht.

### **Abschluss der Aktivierung**

Für den Abschluss der Aktivierung gelten sinngemäß die für den Beginn der Aktivierung vorgestellten Überlegungen. Die *parallele* Aktivierung proximaler wie distaler Effekte scheint mit der Freigabe des Reaktionsauswahl-Flaschenhalses abgeschlossen zu sein. Dieser Befund steht im Einklang mit der Annahme des Schwellenmodells, dass das Erreichen der Initiierungsschwelle das Ende der Reaktionsauswahl und damit gleichzeitig den Beginn der Initiierung markiert. Die mit den Effekten assoziierte Bewegung gelangt dann automatisch zur Ausführung; Initiierung wird damit nicht als ein diskreter Prozess, sondern als kontinuierliche Fortsetzung der Reaktionsauswahl verstanden (Klapp, 1995).

In diesem Zusammenhang wurde von Kunde et al. (2004) angenommen, dass auch nach der Initiierung eine weitergehende Aktivierung proximaler und distaler Handlungseffekte erfolgt, nach denselben Gesetzmäßigkeiten wie in der vorangehenden Reaktionsauswahl. Tatsächlich fanden sich Hinweise auf eine über die Handlungsplanung hinaus anhaltenden Aktivierung von Effektrepräsentationen, insofern sich Kompatibilitätseffekte auch auf die Umsetzung einer Handlung auswirkten (Kunde, 2003; Kunde et al., 2004). Die vorliegenden Befunde deuten dagegen daraufhin, dass es nach dem Reaktionsauswahl-Flaschenhals zu keiner weitergehenden parallelen Aktivierung und daher Interferenzen zwischen proximalen und distalen Handlungseffekten kommt. Es ist jedoch zu vermuten, dass zumindest die Aktivierung von Codes proximaler Handlungseffekte aktiv aufrechterhalten wird, insofern diese für die effektorbezogene Umsetzung der Handlung und dabei insbesondere für Fehlerabgleich bei deren Ausführung unentbehrlich sind (vgl. Hoffmann et al., 2007).

## 9.2 Die Interaktion endogener und exogener Effektkodeaktivierung

Basierend auf der ideomotorischen Hypothese wurde in der vorliegenden Arbeit angenommen, dass sowohl die afferente als auch die efferente Seite der Handlungssteuerung funktional auf der Aktivierung sensorischer Repräsentationen fußt. Aus dieser Perspektive beruhen Kompatibilitätseffekte auszuführender Wahlreaktionen mit antizipierten als auch induzierten Handlungseffekten gleichermaßen auf der wechselseitigen Aktivierung bzw. Hemmung zueinander kompatibler bzw. inkompatibler sensorischer Merkmalskodes, die durch Assoziationen unterschiedlicher Stärke verbunden und strukturiert sind. Hinsichtlich der Aktivierung wurde bislang nicht prinzipiell unterschieden zwischen einer Aktivierung der Effektrepräsentation durch externe Stimulation (indirekt durch S–R Regeln oder auch direkt durch in den Stimuli enthaltene Effektmerkmale) und einer endogenen Aktivierung der Effektmerkmale, die letztlich handlungswirksam werden sollen. Auch das Schwellenmodell von Kunde et al. (2004) differenziert nicht zwischen einer extern induzierten und intern generierten Effektkode-Aktivierung; “The occurrence of an external (or internal) response cue induces a gradual growth of activation of the various multimodally distributed codes of response effects over time” (S. 101).

Es wäre demnach zumindest bei hinreichend langem SOA zu erwarten gewesen, dass exogene sowie endogene Aktivierungen von Effektkodes zeitlich überlappen und dabei induzierte Effekte die endogene Aktivierung distaler Effektkodes beeinflussen bzw. mit ihr interagieren. In Experiment 6 bzw. Experiment 7, in denen die Kompatibilität zu antizipierender, distaler Handlungseffekte sowohl mit den Wahlreaktionen als auch mit irrelevanten Stimulusmerkmalen, welche mit den distalen Handlungseffekten dimensional überlappten, variiert wurde, fanden sich jedoch bei langem SOA ausschliesslich additive Einflüsse der S–E und R–E Kompatibilität. Weiterhin wäre auch bei kurzem SOA zu erwarten, dass eine extern induzierte

Aktivierung von Effektkodes, sofern kein Zerfall dieser Aktivierung über die Zeit angenommen wird, die zeitlich nachgelagerte endogene Aktivierung beeinflusst. Auch dies konnte empirisch nicht bestätigt werden, die S-E Kompatibilitätseffekte verschwanden gänzlich im *cognitive slack*. Gleichzeitig fanden sich in keinem der Experimente Hinweise auf einen mit zunehmender Reaktionszeit abnehmenden Einfluss induzierter Handlungseffekte, welcher bei einem Zerfall der Effektkodeaktivierung zu erwarten wäre.

Die Befunde lassen daher nur den Schluss zu, dass eine externe Stimulation von Effektkodeaktivierung Prozesse der automatischen Reaktionsaktivierung beeinflussen, welche der endogenen Aktivierung von Effektkodes zeitlich vorgelagert sind. Darüber hinaus stellt sich jedoch die Frage, weshalb die durch wahrgenommene Effektmerkmale aufgebaute Aktivierung keinen Einfluss mehr auf nachfolgende Prozesse der endogenen Aktivierung ausübt.

Eine mögliche Erklärung bestünde darin, dass sich induzierte bzw. antizipierte Effektkodes auf jeweils verschiedene Phasen der Effektkodeaktivierung auswirken, die nicht parallel ablaufen und sich daher nicht wechselseitig beeinflussen können. Im Gegensatz zum Schwellenmodell, welches von einer kontinuierlichen, graduellen Aktivierung der Effektkodes ausgeht, wurde beispielsweise von Elsner und Hommel (in press) angenommen, dass sich bei der effektbasierten Spezifikation einer Handlung möglicherweise sequenziell ablaufende, funktional verschiedene Phasen unterscheiden lassen. Im Anschluss an die Spezifizierung der angestrebten Handlung durch die Aktivierung der Effektkodes ist hier zusätzlich ein Bindungsmechanismus vorgesehen, welcher alle aktivierten Effektkodes in einen Handlungsplan („Event file“) integriert. Die motorische Implementierung ist letztlich an die Aktivierung dieser *Event files* und nicht nur an die Aktivierung der Effektkodes als solches gebunden.

Voraussetzung für die später nachfolgende Integration der Effektkodes ist zunächst deren Aktivierung. Letztlich muss sichergestellt sein, dass das Aktivierungsniveau intendierter Effekte hoch genug ist, um in den Handlungsplan integriert zu werden. Die relative Relevanz der einzelnen sensorischen Effekte einer Bewegung drückt sich nach Elsner und Hommel (in

press) entsprechend in der gewichteten Aktivierung ihrer Codes aus, wobei das Ausmaß der Aktivierung mit der Wahrscheinlichkeit der Integration korreliert ist. Im Falle von Wahlreaktionsaufgaben erfolgt die Aktivierung automatisch durch erlernte S–R Verknüpfungen, im Falle von Doppelaufgaben vermutlich parallel für beiden Aufgaben.

Hier wirken sich nun vermutlich induzierte Handlungseffekte, beispielsweise in Form irrelevanter Reizmerkmale aus: Eine Effektkodeaktivierung resultiert nicht nur indirekt über S–R Verknüpfungen, sondern auch direkt aus der Wahrnehmung der Effektmerkmale. Dadurch könnten jedoch einzelne Handlungsrepräsentationen konfligierender Handlungsalternativen gleichzeitig aktiv sein. Um die fälschliche Integration dieser induzierten Codes in die Handlungspläne zu verhindern, muss sichergestellt werden, dass Effektkodes der geforderten Handlung in der Rangreihe der aktivierten Effektkodes einen vorderen Platz einnehmen und im zweiten Schritt in den Handlungsplan integriert werden. Dies könnte im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung beispielsweise über eine zeitlich länger anhaltende Aktivierung der assoziierten imperativen Stimulusmerkmale erfolgen.

Im zweiten Schritt werden die aktivierten Handlungseffekte zu einem Handlungsplan integriert. Stoet und Hommel (1999, 2002) haben angenommen, dass die Integration verschiedener Merkmalscodes neuronal durch eine Synchronisierung bzw. zeitliche Kopplung der Feuerraten der Neuronen über merkmalspezifische Zellverbände, welche die beteiligten Merkmalscodes repräsentieren, implementiert ist. Interessanterweise wurde von Hommel und Doeller (2005) spekuliert, dass diese Integrationsphase einen funktionellen Engpass in Doppelaufgaben darstellt: “To include all features, which are likely to be coded in different brain maps in different cortical sites, such an integrative state needs to somehow exclude or suppress other activities in quite a number of coding domains—a process that, if successful, would need to create a functional processing bottleneck (S. 165).” Während also die automatische Aktivierung einzelner Effektkodes zeitlich für verschiedene Aufgaben überlappen kann, erfordert deren Integration durch synchrone

Aktivierung die Exklusion oder sogar Inhibition alternativer Aktivierungen. Extern induzierte Handlungseffekte der jeweils nicht geforderten Reaktion könnten demnach keine Wirkung mehr entfalten; darauf basierende Kompatibilitätseffekte wären auf die Phase der automatischen Reaktionsaktivierung beschränkt.

Im Gegensatz dazu wirken sich Kompatibilitätsbeziehungen zwischen antizipierten Handlungseffekten vermutlich auch nach der Bindung ihrer Codes in einem Handlungsplan aus. Hommel et al. (2001) haben angenommen, dass bei der Integration von Effektkodes in *event files* auch irrelevante Handlungsmerkmale eingeschlossen würden: "Still, task goals only modulate, but do not exclusively define the representations of task-specific actions. In fact, there is evidence that, although codes of intended action effects are rather dominant, nonintended, irrelevant effects are also integrated into action files (S. 862)." Im Falle dimensionaler Überlappung zwischen aufgabenrelevanten und irrelevanten Handlungsmerkmalen bestehen zwischen den entsprechenden Effektkodes aktivierende und hemmende Assoziationen, welche die Geschwindigkeit des Anstiegs der synchronisierten Feuerraten beeinflussen. Da die motorische Implementation eines Handlungsplans, mithin die Initiierung der Handlung, vermutlich erst beginnt, wenn eine kritische Aktivierungsschwelle überschritten ist, beeinflusst die Kompatibilität der Effektkodes einer Handlung untereinander letztlich die Geschwindigkeit, mit der die finale Reaktionsauswahl dieser Handlung erfolgt.





# Kapitel 10

## Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, Verknüpfungen zwischen zwei verschiedenen Forschungstraditionen in der Handlungssteuerung herzustellen. Informationsverarbeitungsansätze formulieren experimentell gut prüfbare Annahmen zu den ablaufenden Verarbeitungsprozessen; die ideomotorische Hypothese betont die kritische Bedeutung der Aktivierung sensorisch repräsentierter Handlungsziele. Die Kombination der jeweiligen Paradigmen beider Ansätze erbrachte empirische Befunde, welche die Beziehung der postulierten Verarbeitungsstufen der Reaktionsauswahl mit dem aus ideomotorischer Sicht wichtigen Prozess der Aktivierung von Effektrepräsentationen verdeutlichen. So zeigte sich, dass die Aktivierung von Effektkodes in Wahlreaktionsaufgaben zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgt, je nachdem wodurch die Aktivierung verursacht wird: Die exogene Stimulation von Effektkodes scheint eher früh und parallel zu weiteren Prozessen zu erfolgen. Die endogene Aktivierung von Effektrepräsentationen erfolgt dagegen erst zu einem späteren Zeitpunkt, welcher auch als finale Reaktionsauswahl bezeichnet wird.

Im Ausblick bestehen aus Sicht beider Ansätze eine Reihe offener sowie neuer Fragen. Im Folgenden sollen beispielhaft zwei Fragestellungen skizziert werden.

### **Exklusion, Inhibition oder Zerfall irrelevanter Effektkodes?**

Im Abschnitt 9.2 wurde bereits der Frage nach möglichen Ursachen für die fehlende Interaktion wahrgenommener und antizipierter Handlungseffekte nachgegangen. Dabei stellt sich insbesondere die Frage nach den Prozessen, die im Anschluss an eine Induktion irrelevanter Effektkodes sicherstellen, dass diese direkte Aktivierung keinen Einfluss mehr auf nachfolgende Prozesse der endogenen Aktivierung ausübt. Funktional würden diese Prozesse der Gefahr der Verhaltensperseveration entgegenwirken, wie sie von Greenwald (1970c) als "circular reflex" beschrieben wurde (S. 86). Die Beobachtung, dass Probanden auch nach der Wahrnehmung von Handlungseffekten in der Lage sind, hierzu „inkompatible“ Reaktionen mit einer Genauigkeit auszuwählen, die kompatiblen Reaktionen vergleichbar ist, deutet auf die Effektivität dieser Prozesse hin. So waren auch in der vorliegenden Untersuchung in keinem der Experimente die Fehlerraten nach der Präsentation inkompatibler Handlungseffekte signifikant erhöht.

Die grundsätzliche Erklärung, wie sie bereits im Abschnitt 9.2 angedeutet wurde, besteht in der Annahme einer Abfolge von direkter Aktivierung irrelevanter Effektkodes, gefolgt von der Exklusion dieser Aktivierung in einer nachfolgenden Integrationsphase bzw. einem passivem Zerfall oder einer selektiven Inhibition dieser Aktivierung noch vor Beginn der finalen Reaktionsauswahl. Für eine selektive Inhibition irrelevanter Aktivierungen, wie sie auch beim Simon-Effekt diskutiert wird (Ridderinkhof, 2002), spricht die hohe Verhaltenssalienz wahrgenommener Stimuli, welche den Handlungseffekten hochgradig ähnlich sind. Weiterhin scheint die Inhibition noch nicht initiiertes Handlungen nicht dem PRP-Effekt zu unterliegen und könnte somit parallel zur Reaktionsaktivierung bzw. Reaktionsauswahl einer Zweitaufgabe erfolgen (Horstmann, 2003). Möglicherweise kommt es hier auch zu einem Wettlauf von Reaktionsaktivierung und Reaktionshemmung (vgl. De Jong, Coles, Logan & Gratton, 1990; De Jong, Coles & Logan, 1995).

Band und Boxtel (1999) wiederum sehen eine selektive Inhibition von Reaktionsalternativen nicht als automatischen, sondern kontrollierten Pro-

zess an, welcher den Exekutivfunktion zuzuordnen ist. Innerhalb des PRP-Paradigmas wäre zu erwarten, dass die Inhibition stimulierter Handlungskodes in der Zweitaufgabe somit erst nach Freigabe des Flaschenhalses durch die Reaktionsauswahl der Erstaufgabe erfolgen kann. Mithin sollten sich die Reaktionszeitkosten in Folge wahrgenommener inkompatibler Handlungseffekte additiv zum SOA verhalten, was jedoch nicht der Fall war. Ein weiteres Problem der Annahme selektiver Inhibition stellen zu erwartende negative Kompatibilitätseffekte dar. So gehen Eimer und Schlaghecken (2002) davon aus, dass bei supraliminaler Stimulation kognitive Vermittlungsprozesse entsprechende Inhibitionsprozesse (über-)kompensieren, bei Reaktionsaktivierungen durch subliminale Präsentation jedoch Inhibitionsprozesse überwiegen. Somit wären im Falle subliminal stimulierter Effektkodes negative Induktionseffekte zu erwarten; Kunde (2004) fand in entsprechenden Experimenten dagegen positive Induktionseffekte.

Eine alternative Erklärung bestünde in einem passiven Zerfall der Aktivierung irrelevanter Effektkodes. Um sicherzustellen, dass das Aktivierungsniveau intendierter Effekte vergleichsweise hoch genug ist, wäre eine zeitlich länger anhaltende Aktivierung der assoziierten imperativen Stimulusmerkmale im Rahmen der automatischen Reaktionsaktivierung anzunehmen. Empirische Unterstützung findet diese Annahme in neurophysiologischen Befunden, dass Zellen im präfrontalen Kortex, welche das S-R Mapping kodieren, in Reaktion auf inkongruente Stimuli, die abhängig vom Kontext mehrere konfligierende Reaktionen spezifizieren, verzögert feuern (Stoet & Snyder, 2007). Gegen die Annahme eines rein passiven Zerfalls irrelevanter Effektkodeaktivierung sprechen jedoch die Analysen zum Zeitverlauf der Kompatibilitätseffekte. So wird der Einfluss der S-E Kompatibilität in den Experimenten 5–7 mit zunehmenden Reaktionszeiten nicht kleiner, wie man es bei Zerfall erwarten würde (De Jong et al., 1994; Eimer et al., 1995; vgl. die Diskussion im Abschnitt 6.1.3).

Post-hoc Analysen sind jedoch immer nur unter Vorbehalt zu interpretieren. In jedem Fall sollte also die Frage, ob und unter welchen Bedingungen es zu einer aktiven Inhibition oder einem passiven Zerfall irre-

levanter Effektkodeaktivierung kommt, Gegenstand zukünftiger empirischer Studien sein. Dabei sollten moderierende Faktoren, wie beispielsweise die Ähnlichkeit der wahrgenommenen Stimuli mit zu erzielenden Handlungseffekten, einbezogen werden (siehe hierzu auch die Annahme eines *Inhibition threshold* bei Schlaghecken & Eimer, 2002).

### **Doppelaufgabenperformanz als Funktion zu antizipierender Effekte?**

Ein wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit besteht in dem Befund, dass in Doppelaufgaben ausschließlich seriell ablaufende Prozesse der finalen Reaktionsauswahl die endogene Aktivierung von Effektkodes beinhalten. Daraus folgt im Umkehrschluss, dass die endogene Aktivierung intendierter Handlungseffekte für verschiedene Handlungen nur seriell erfolgen kann. Eine weitergehende Schlussfolgerung wäre, dass Leistungseinbußen in zeitlich überlappenden Wahlreaktionsaufgaben womöglich zu wesentlichen Teilen aus Beschränkungen bei der gleichzeitigen Aktivierung von Repräsentationen sensorischer Handlungseffekte resultieren.

Diese Vermutung ist nicht neu, sondern wurde bereits von Greenwald geäußert (Greenwald, 1972; Greenwald & Shulman, 1973). Zwar bezogen sich Greenwalds Experimente ausschließlich auf ideomotor-kompatible Aufgaben, die eher dem Bereich der Imitation zuzuordnen und daher mit Wahlreaktionsaufgaben im herkömmlichen Sinne nicht vergleichbar sind (vgl. Abschnitt 3.1); die deutliche Reduktion von Doppelaufgabenkosten weist jedoch auf einen bedeutsamen Anteil der Effektkodeaktivierung am Reaktionsauswahl-Flaschenhals hin. Greenwalds Experimente teilen jedoch mit der bisherigen Forschung zu Doppelaufgaben die Konfundierung intendierter Handlungseffekte mit den proximalen Effekten der instruierten motorischen Reaktionen (vgl. Abschnitt 7.1). Eine Auflösung der Konfundierung führt zur Frage, ob Doppelaufgabenkosten entstehen, weil gleichzeitig unterschiedliche sensorische Effekte angestrebt werden oder weil unterschiedliche motorische Aktionen ausgeführt werden. Die Annahme, dass Beschränkungen in der gleichzeitigen Aktivierung von Repräsentationen intendierter

Handlungseffekte maßgeblich für die Höhe von Doppelaufgabenkosten ist, ermöglicht dabei eine Reihe von interessanten Vorhersagen:

So sollten Doppelaufgabenkosten geringer für Kombinationen von Handlungen ausfallen, die zu gleichen Effekten führen verglichen mit Handlungen, die zu unterschiedlichen Effekten führen. Vorläufige Unterstützung erhält diese Annahme durch Befunde, dass Versuchspersonen schneller eine Reaktion vorbereiten können, sofern diese die gleichen auditiven Effekte erzeugt wie eine gleichzeitig vorzubereitende Handlung (Kunde, Hoffmann & Zellmann, 2002). Interessanterweise war dieser aufgabenübergreifende Korrespondenzeffekt am größten bei einem kurzem SOA zwischen den beiden vorzubereitenden Aufgaben. Eine mögliche Interpretation wäre, dass eine Übereinstimmung der distalen Effekte die Doppelaufgabenkosten reduziert. Weitere empirische Unterstützung findet sich in Studien zu bimanuellen Reaktionen. Wenn Probanden instruiert werden, gleichzeitig mit beiden Händen motorische Handlungen auszuführen, so gelingt dies deutlich schneller, wenn die beiden Handlungen die gleichen distalen Effekte erzeugen, verglichen mit Handlungen, die zu verschiedenen Effekten führen (Hazeltine, 2005; Hazeltine, Diedrichsen, Kennerley & Ivry, 2003; Kunde & Weigelt, 2005).

Eine weitere Vorhersage betrifft die Synchronität distaler Reaktionseffekte. Insofern Handlungseffekte auch zeitlich in einem wahrnehmungsanalogen Format repräsentiert sind (vgl. Abschnitt 2.2.3), ist es plausibel anzunehmen, dass Doppelaufgabenkosten auch aufgrund von zeitlichen Überlappungen der angestrebten distalen Effekte entstehen und nicht nur durch zeitliche Überlappungen der proximalen Effekte der motorischen Aktionen. Entsprechend sollten Doppelaufgabenkosten verringert sein, wenn die distalen Effekte zeitlich weniger überlappen, obwohl dieselben motorischen Aktionen erfolgen. Zur experimentellen Überprüfung dieser Annahme könnte man die Doppelaufgabenkosten bei Kombinationen von Aufgaben untersuchen, die distale Effekte in unterschiedlichen Zeitabständen nach der Ausführung derselben motorischen Aktionen erzeugen. Hierzu ist womöglich ein neues experimentelles Paradigma notwendig, das die zeit-

liche Entkopplung von motorischen Aktionen und ihren proximalen bzw. distalen Effekten ermöglicht.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die wechselseitige Anbindung der beiden Forschungsrichtungen, des Informationsverarbeitungsansatzes und der ideomotorischen Hypothese, ausreichend Potential für zukünftige Forschung enthält. Theorien effektbasierter Handlungssteuerung können unter Verwendung von Paradigmen wie der Psychologischen Refraktärperiode postulierte Prozesse ausdifferenzieren und den von Theorien der Informationsverarbeitung angenommenen Verarbeitungsphasen zuordnen. Ebenso kann die Forschung zur Doppelaufgabenperformanz von der Einbeziehung ideomotorischen Gedankenguts profitieren. Über die Versöhnung zweier Forschungsansätze hinaus sind die zu erwartenden Ergebnisse von höchster, womöglich auch praktischer Relevanz. Hierzu gehört die Manipulation bzw. Reduktion von Leistungseinbussen in Doppelaufgabensituationen, beispielsweise durch geschickte Anbindung zusätzlicher distaler Handlungseffekte bzw. Verbesserung deren Kombinierbarkeit.

# Literaturverzeichnis

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111–149.
- Aschersleben, G. & Prinz, W. (1997). Delayed auditory feedback in synchronization. *Journal of Motor Behavior*, 29, 35–46.
- Band, G. & Boxtel, G. van. (1999). Inhibitory motor control in stop paradigms: Review and reinterpretation of neural mechanisms. *Acta Psychologica*, 101, 179–211.
- Bausenhart, K. M., Rolke, B., Hackley, S. A. & Ulrich, R. (2006). The locus of temporal preparation effects: Evidence from the psychological refractory period paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 536–542.
- Beckers, T., De Houwer, J. & Eelen, P. (2002). Automatic integration of non-perceptual action effect features: The case of the associative affective Simon effect. *Psychological Research*, 66, 166–173.
- Brass, M. (2000). *Imitation und ideomotorische Kompatibilität: Untersuchung zur Theorie der ideomotorischen Handlung*. Berlin: Logos-Verlag.
- Brass, M., Bekkering, H. & Prinz, W. (2001). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica*, 106, 3–22.
- Carpenter, W. B. (1852). On the influence of suggestion in modifying and directing muscular movement, independently of volition. *Proceedings of the Royal Institution*, 147–154.

- Cisek, P. & Kalaska, J. (2005). Neural correlates of reaching decisions in dorsal premotor cortex: Specification of multiple direction choices and final selection of action. *Neuron*, *45*, 801–814.
- Cleland, A., Gaskell, M., Quinlan, P. & Tamminen, J. (2006). Frequency effects in spoken and visual word recognition: Evidence from dual-task methodologies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*, 104–119.
- Cohen, J., MacWhinney, B. M., Flatt, M. & Provost, J. (1993). PsyScope: An interactive graphic system for designing and controlling experiments in the psychology laboratory using Macintosh computers. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, *25*, 257–271.
- De Jong, R., Coles, M. & Logan, G. (1995). Strategies and mechanisms in nonselective and selective inhibitory motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 498–511.
- De Jong, R., Coles, M., Logan, G. & Gratton, G. (1990). In search of the point of no return: The control of response processes. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *16*, 164–182.
- De Jong, R., Liang, C. & Lauber, E. (1994). Conditional and unconditional automaticity: A dual-process model of effects of spatial stimulus-response correspondence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 731–750.
- Drost, U., Rieger, M., Brass, M., Gunter, T. & Prinz, W. (2005). Action-effect coupling in pianists. *Psychological Research*, *f69*, 233–241.
- Dux, P., Ivanoff, J., Asplund, C. & Marois, R. (2006). Isolation of a central bottleneck of information processing with time-resolved fMRI. *Neuron*, *52*, 1109–1120.
- Eenshuistra, R. M., Weidema, M. A. & Hommel, B. (2004). Development of the acquisition and control of action-effect associations. *Acta Psychologica*, *115*, 185–209.
- Eimer, M., Hommel, B. & Prinz, W. (1995). S–R compatibility and response selection. *Acta Psychologica*, *90*, 301–313.



- Eimer, M. & Schlaghecken, F. (2002). Links between conscious awareness and response inhibition: Evidence from masked priming. *Psychonomic bulletin & review*, 9, 514–520.
- Elsner, B. & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 229–240.
- Elsner, B. & Hommel, B. (2004). Contiguity and contingency in action-effect learning. *Psychological Research*, 68, 138–154.
- Elsner, B. & Hommel, B. (in press). Kognitive Neurowissenschaft der Handlungsplanung. In T. Goschke & M. Eimer (Hg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition: Kognitive Neurowissenschaft*. Göttingen: Hogrefe.
- Elsner, B., Hommel, B., Mentschel, B., Drzezga, A., Prinz, W., Conrad, B. et al. (2002). Linking actions and their perceivable consequences in the human brain. *Neuroimage*, 17, 364–372.
- Erlhagen, W. & Schöner, G. (2002). Dynamic field theory of movement preparation. *Psychological Review*, 109, 545–572.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G. & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *Journal of neurophysiology*, 73, 2608–2611.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Buchner, A. (in press). G\*Power 3: A flexible statistical power analysis for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*.
- Ferreira, V. & Pashler, H. (2002). Central bottleneck influences on the processing stages of word production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 28, 1187–99.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119, 593–609.
- Glover, S. (2004). Separate visual representations in the planning and control of action. *Behavioral And Brain Sciences*, 27, 3–24.
- Gottsdanker, R. & Stelmach, G. E. (1971). The persistence of psychological refractoriness. *Journal of Motor Behavior*, 3, 301–312.

- Greenhouse, S. & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24, 95–111.
- Greenwald, A. G. (1970a). A choice reaction time test of ideomotor theory. *Journal of Experimental Psychology*, 86, 20–25.
- Greenwald, A. G. (1970b). A double-stimulation test of ideo-motor theory with implications for selective attention. *Journal of Experimental Psychology*, 84, 393–398.
- Greenwald, A. G. (1970c). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, 77, 73–97.
- Greenwald, A. G. (1972). On doing two things at once: Timesharing as a function of ideomotor compatibility. *Journal of Experimental Psychology*, 94, 52–57.
- Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once: III. Confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor compatible. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 859–868.
- Greenwald, A. G. (2004). On doing two things at once: IV. Necessary and sufficient conditions: Rejoinder to Lien, Proctor, and Ruthruff (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 632–636.
- Greenwald, A. G. (2005). A reminder about procedures needed to reliably produce perfect timesharing: Comment on Lien, McCann, Ruthruff, and Proctor (2005). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 221–225.
- Greenwald, A. G. & Shulman, H. G. (1973). On doing two things at once: II. Elimination of the psychological refractory period effect. *Journal of Experimental Psychology*, 101, 70–76.
- Hasbroucq, T. & Guiard, Y. (1991). Stimulus-Response Compatibility and the Simon Effect: Toward a Conceptual Clarification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 17, 246–266.
- Hazeltine, E. (2005). Response-response compatibility during bimanual mo-

- vements: Evidence for the conceptual coding of action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 682–688.
- Hazeltine, E., Diedrichsen, J., Kennerley, S. W. & Ivry, R. B. (2003). Bimanual cross-talk during reaching movements is primarily related to response selection, not the specification of motor parameters. *Psychological Research*, 67, 56–70.
- Hazeltine, E., Ruthruff, E. & Remington, R. (in press). The role of input and output modality pairings in dual-task performance: Evidence for content-dependent central interference. *Cognitive Psychology*.
- Heuer, H. (1996). Doppeltätigkeiten. In O. Neumann & A. F. Sanders (Hg.), *Enzyklopädie der Psychologie: Aufmerksamkeit* (S. 163–218).
- Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.
- Hoffmann, J., Butz, M., Herbort, O., Kiesel, A. & Lenhard, A. (2007). Spekulationen zur Struktur ideomotorischer Beziehungen. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 14, 95–104.
- Holst, E. von & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften*, 37, 464–476.
- Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, 55, 270–279.
- Hommel, B. (1995). Stimulus-Response Compatibility and the Simon Effect: Toward an Empirical Clarification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 21, 764–775.
- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, 59, 176–186.
- Hommel, B. (1997). Toward an action-concept model of stimulus-response compatibility. In B. Hommel & W. Prinz (Hg.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (S. 281–320). Amsterdam: North-Holland.

- Hommel, B. (1998a). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 1368–1384.
- Hommel, B. (1998b). Perceiving one's own action—and what it leads to. In J. S. Jordan (Hg.), *System theories and a priori aspects of perception* (S. 143–179). Amsterdam: Elsevier.
- Hommel, B. (2000). The prepared reflex: Automaticity and control in stimulus-response translation. In S. Monsell & J. Driver (Hg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 247–273). Cambridge, MA: MIT Press.
- Hommel, B. (2004). Coloring an action: Intending to produce color events eliminates the Stroop effect. *Psychological Research*, *68*, 74–90.
- Hommel, B., Alonso, D. & Fuentes, L. J. (2003). Acquisition and generalization of action effects. *Visual Cognition*, *10*, 965–986.
- Hommel, B. & Doeller, C. F. (2005). Selection and consolidation of objects and actions. *Psychological Research*, *69*, 157–166.
- Hommel, B. & Eglau, B. (2002). Control of stimulus-response translation in dual-task performance. *Psychological Research*, *66*, 260–273.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral And Brain Sciences*, *24*, 849–937.
- Horstmann, G. (2003). The psychological refractory period of stopping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 965–981.
- James, W. (1890). *The principles of psychology (Vols. 1–2)*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Jeannerod, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self*. Oxford: Oxford University Press.
- Jiang, Y. & Kanwisher, N. (2003). Common neural mechanisms for response selection and perceptual processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 1095–1110.
- Jiang, Y., Saxe, R. & Kanwisher, N. (2004). Functional magnetic resonance

- imaging provides new constraints on theories of the psychological refractory period. *Psychological Science*, 15, 390–396.
- Jolicoeur, P. & Dell'Acqua, R. (1999). Attentional and structural constraints on visual encoding. *Psychological Research*, 62, 154–164.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387–403.
- Kiesel, A. & Hoffmann, J. (2004). Variable action effects: Response control by context-specific effect anticipations. *Psychological Research*, 68, 155–162.
- 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, 1015–1027.
- Klapp, S. T., Porter-Graham, K. A. & Hoifeld, A. R. (1991). The relation of perception and motor action: Ideomotor compatibility and interference in divided attention. *Journal of Motor Behavior*, 23, 155–162.
- Koch, I. (in press). Mechanismen der Interferenz in Doppelaufgaben. *Psychologische Rundschau*.
- Koch, I. & Jolicoeur, P. (2006). Process-based and code-based interference in dual-task performance. *Psychological Research*, 70, 403–404.
- Koch, I. & Jolicoeur, P. (2007). Orthogonal cross-task compatibility: Abstract spatial coding in dual tasks. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 45–50.
- Koch, I. & Kunde, W. (2002). Verbal response-effect compatibility. *Memory & Cognition*, 30, 1297–1303.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T. & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility—A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97, 253–270.
- Kornblum, S. & Stevens, G. T. (2002). Sequential effects of dimensional overlap: Findings and issues. In W. Prinz & B. Hommel (Hg.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 9–54). Oxford: Oxford University Press.
- Kornblum, S., Stevens, G. T., Whipple, A. & Requin, J. (1999). The effects of irrelevant stimuli: 1. The time course of stimulus-stimulus and stimulus-

- response consistency effects with Stroop-like stimuli, Simon-like tasks, and their factorial combinations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 688–714.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 387–394.
- Kunde, W. (2003). Temporal response-effect compatibility. *Psychological Research*, 67, 153–159.
- Kunde, W. (2004). Response priming by supraliminal and subliminal action effects. *Psychological Research*, 68, 91–96.
- Kunde, W., Hoffmann, J. & Zellmann, P. (2002). The impact of anticipated action effects on action planning. *Acta Psychologica*, 109, 137–155.
- Kunde, W., Koch, I. & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57A, 87–106.
- Kunde, W. & Stöcker, C. (2002). A Simon effect for stimulus-response duration. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 581–592.
- Kunde, W. & Weigelt, M. (2005). Goal congruency in bimanual object manipulation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 145–156.
- Levy, J., Pashler, H. & Boer, E. (2006). Central interference in driving: Is there any stopping the psychological refractory period? *Psychological Science*, 17, 228–235.
- Lien, M.-C. (2001). *An interactive conception of the psychological refractory period effect*. Unveröffentlichte Dissertation, Purdue University, West Lafayette.
- Lien, M.-C., McCann, R., Ruthruff, E. & Proctor, R. (2005a). Confirming and disconfirming theories about ideomotor compatibility in dual-task performance: a reply to Greenwald (2005). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 226–229.
- Lien, M.-C., McCann, R., Ruthruff, E. & Proctor, R. (2005b). Dual-task performance with ideomotor-compatible tasks: Is the central processing

- bottleneck intact, bypassed, or shifted in locus? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 122–144.
- Lien, M.-C. & Proctor, R. W. (2000). Multiple spatial correspondence effects on dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1260–1280.
- Lien, M.-C. & Proctor, R. W. (2002). Stimulus-response compatibility and psychological refractory period effects: Implications for response selection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 212–238.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W. & Allen, P. A. (2002). Ideomotor compatibility in the psychological refractory period effect: 29 years of oversimplification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 396–409.
- Lien, M.-C., Proctor, R. W. & Ruthruff, E. (2003). Still no evidence for perfect timesharing with two ideomotor-compatible tasks: A reply to Greenwald (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 1267–1272.
- Lien, M.-C., Ruthruff, E., Hsieh, S. & Yu, Y. (2007). Parallel central processing between tasks: evidence from lateralized readiness potentials. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14, 133–141.
- Lien, M.-C., Schweickert, R. & Proctor, R. W. (2003). Task switching and response correspondence in the psychological refractory period paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 692–712.
- Logan, G. D. & Gordon, R. D. (2001). Executive control of visual attention in dual-task situations. *Psychological Review*, 108, 393–434.
- Lotze, H. (1852). *Medicinische Psychologie oder Physiologie der Seele*. Amsterdam: E. J. Bonset.
- Lu, C. & Proctor, R. (1994). Processing of an irrelevant location dimension as a function of the relevant stimulus dimension. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 286–298.
- Magen, H. & Cohen, A. (2002). Action-based and vision-based selection of input: Two sources of control. *Psychological Research*, 66, 247–259.

- Magen, H. & Cohen, A. (2005). Location specificity in response selection processes for visual stimuli. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 541–548.
- Marois, R. & Ivanoff, J. (2005). Capacity limits of information processing in the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 296–305.
- Massaro, D. W. (1990). An information-processing analysis of perception and action. In O. Neumann & W. Prinz (Hg.), *Relationships between perception and action: Current approaches* (S. 133–166). Berlin: Springer.
- Mattes, S., Leuthold, H. & Ulrich, R. (2002). Stimulus-response compatibility in intensity-force relations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 1175–1191.
- McCann, R. S. & Johnston, J. C. (1992). Locus of the single-channel bottleneck in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 471–484.
- Melcher, T., Weidema, M., Eenshuistra, R. M., Hommel, B. & Gruber, O. (in press). The neural substrate of the ideomotor principle: An event-related fMRI analysis. *NeuroImage*.
- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1997). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part II. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review*, 104, 749–791.
- Meyer, D. E. & Kieras, D. E. (1998). Precise to a practical unified theory of cognition and action: Some lessons from EPIC computational models of human multiple-task performance. In D. Gopher & A. Koriat (Hg.), *Attention and performance XVII. Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application* (S. 17–88). Cambridge, MA: MIT Press.
- Miller, J. & Alderton, M. (2006). Backward response-level crosstalk in the psychological refractory period paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 149–165.
- Miller, J. & Reynolds, A. (2003). The locus of redundant-targets and non-



- targets effects: evidence from the psychological refractory period paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 1126–1142.
- Miller, J., Ulrich, R. & Rolke, B. (in press). On the optimality of serial and parallel processing in the psychological refractory period paradigm: Effects of the distribution of stimulus onset asynchronies. *Cognitive Psychology*.
- Müller, D. & Schwarz, W. (2007). Exploring the mental number line: Evidence from a dual-task paradigm. *Psychological Research*, 71, 598–613.
- Müsseler, J., Koch, I. & Wühr, P. (2005). Testing the boundary conditions for processing irrelevant location information: The cross-task Simon effect. *The European Journal of Cognitive Psychology*, 17, 708–726.
- Navon, D. & Miller, J. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193–251.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York, NY: Appleton-Century-Crofts.
- Oriet, C. & Jolcoeur, P. (2003). Absence of perceptual processing during reconfiguration of task set. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 1036–1049.
- Osman, A. & Moore, C. (1993). The locus of dual-task interference: psychological refractory effects on movement-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 1292–1312.
- Paelecke, M. & Kunde, W. (2005). How the mind controls the body: Anticipatory effect codes in action planning. In D. T. Rosen (Hg.), *Trends in experimental psychology research* (S. 187–202). New York: Nova Science.
- Pashler, H. (1984). Processing stages in overlapping tasks: Evidence for a central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 358–377.
- Pashler, H. (1989). Dissociations and dependencies between speed and accuracy: Evidence for a two-component theory of divided attention

- in simple tasks. *Cognitive Psychology*, 21, 469–514.
- Pashler, H. (1994a). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116, 220–244.
- Pashler, H. (1994b). Graded capacity-sharing in dual-task interference? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 330–342.
- Pashler, H. & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 19–45.
- Pashler, H. & Johnston, J. C. (1998). Attentional limitations in dual-task performance. In H. Pashler (Hg.), *Attention*. Hove, England: Psychology Press.
- Pollatsek, A. & Well, A. (1995). On the use of counterbalanced designs in cognitive research: A suggestion for a better and more powerful analysis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 21, 785–794.
- Prinz, W. (1983). *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Berlin: Springer.
- Prinz, W. (1987). Ideo-motor action. In H. Heuer & A. F. Sanders (Hg.), *Perspectives on perception and action* (S. 47–76). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In O. Neumann & W. Prinz (Hg.), *Relationships between perception and action: Current approaches* (S. 167–203). Berlin: Springer.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 129–154.
- Prinz, W. (1998). Die Reaktion als Willenshandlung. *Psychologische Rundschau*, 49, 10–20.
- Proctor, R., Lu, C. & Van Zandt, T. (1992). Enhancement of the Simon effect by response precuing. *Acta Psychologica*, 81, 53–74.
- Pylyshyn, Z. W. (2002). Mental imagery: In search of a theory. *Behavioral And Brain Sciences*, 25, 157–238.
- Ratcliff, R. (1979). Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. *Psychological Bulletin*, 86, 446–461.

- Reynolds, M. & Besner, D. (2006). Reading aloud is not automatic: Processing capacity is required to generate a phonological code from print. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 1303–1323.
- Ridderinkhof, K. R. (2002). Activation and suppression in conflict tasks: Empirical clarification through distributional analyses. In W. Prinz & B. Hommel (Hg.), *Common Mechanisms in Perception and Action. Attention & Performance, Vol. XIX* (S. 494–519). Oxford: Oxford University Press.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V. & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131–141.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extend. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 444–474.
- Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control*. San Diego: Academic Press.
- Ruthruff, E., Pashler, H. & Hazeltine, E. (2003). Dual-task interference with equal task emphasis: Graded capacity sharing or central postponement? *Perception & Psychophysics*, 65, 801–816.
- Ruthruff, E., Pashler, H. & Klaassen, A. (2001). Processing bottlenecks in dual-task performance: Structural limitation or strategic postponement? *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 73–80.
- Sanders, A. F. (1980). Stage analysis of reaction processes. In G. E. Stelmach & J. Requin (Hg.), *Tutorials in motor behavior* (S. 331–354). Amsterdam: North-Holland.
- Sanders, A. F. (1990). Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information. *Acta Psychologica*, 74, 123–167.
- Sanders, A. F. (1998). *Elements of human performance: Reaction processes and attention in human skill*. Mahwah, N.J.: Erlbaum.
- Sangals, J., Roß, L. & Sommer, W. (2004). Time pressure effects on information processing in overlapping tasks: Evidence from the lateralized

- readiness potential. *Acta Psychologica*, 117, 275–294.
- Schlaghecken, F. & Eimer, M. (2002). Motor activation with and without inhibition: evidence for a threshold mechanism in motor control. *Perception & psychophysics*, 64, 148–162.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225–260.
- Schuch, S. & Koch, I. (2004). The costs of changing the representation of action: Response repetition and response-response compatibility in dual tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 566–582.
- Schweickert, R. (1978). A critical path generalization of the additive factor method: Analysis of a stroop task. *Journal of Mathematical Psychology*, 18, 105–139.
- Selst, M. van & Jolicoeur, P. (1994). A solution to the effect of sample size on outlier elimination. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 631–650.
- Simon, J. R. (1967). Choice reaction time as a function of auditory S-R correspondence, age and sex. *Ergonomics*, 10, 659–664.
- Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 174–176.
- Singer, W. (1993). Synchronization of cortical activity and its putative role in information processing and learning. *Annual Review of Physiology*, 55, 349–374.
- Steininger, S. (1999). *Handeln und Wahrnehmen: Eine experimentelle Analyse einer Wahrnehmungsbeeinträchtigung bei simultan ausgeführten Handlungen*. Aachen: Shaker.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276–315.
- Stevens, G. T. & Kornblum, S. (2000). *Goals and dimensional overlap: The effect irrelevant response dimensions*. Poster presented at the 19th International Symposium on Attention & Performance XIX Kloster Irsee, Juli 2000.

- Stock, A. & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, 68, 176–188.
- Stoet, G. & Hommel, B. (1999). Action Planning and the Temporal Binding of Response Codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1625–1640.
- Stoet, G. & Hommel, B. (2002). Interaction between feature binding in perception and action. In W. Prinz & B. Hommel (Hg.), *Common mechanisms in perception and action: Attention & Performance XIX* (S. 538–552). Oxford: Oxford University Press.
- Stoet, G. & Snyder, L. (2007). Correlates of stimulus-response congruence in the posterior parietal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 194–203.
- Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, 14, 1–36.
- Thompson, G. L. (2006). An SPSS implementation of the non-recursive outlier deletion procedure with shifting z-score criterion (Van Selst & Jolicoeur, 1994). *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 38, 344–352.
- Tombu, M. & Jolicoeur, P. (2002). All-or-none bottleneck versus capacity sharing accounts of the psychological refractory period phenomenon. *Psychological Research*, 66, 274–286.
- Tombu, M. & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 3–18.
- Tombu, M. & Jolicoeur, P. (2004). Virtually no evidence for virtually perfect time-sharing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 795–810.
- Van Selst, M., Ruthruff, E. & Johnston, J. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1268–1283.
- Vince, M. A. (1949). Rapid response sequences and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology*, 40, 23–40.

- Vu, K. & Proctor, R. (2006). Emergent perceptual features in the benefit of consistent stimulus-response mappings on dual-task performance. *Psychological Research*, 70, 468–483.
- Waszak, F. & Herwig, A. (in press). Effect anticipation modulates deviance processing in the brain. *Brain Research*.
- Welford, A. T. (1952). The 'psychological refractory period' and the timing of high-speed performance: A review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43, 2–19.
- Welford, A. T. (1967). Single-channel operation in the brain. *Acta Psychologica*, 27, 5–22.
- Welford, A. T. (1968). *Fundamentals of skill*. London: Methuen.
- Ziessler, M. & Nattkemper, D. (2002). Effect anticipation in action planning. In W. Prinz & B. Hommel (Hg.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and Action* (S. 646–672). Oxford: Oxford University Press.
- Ziessler, M., Nattkemper, D. & Frensch, P. A. (2004). The role of anticipation and intention for the learning of effects of self-performed actions. *Psychological Research*, 68, 163–175.