

Gerhard Roth / Wolfgang Prinz (Hrsg.)

Kopf-Arbeit

Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen

Redaktionell bearbeitet von Sabine Maasen

9. Die Steuerung von Handlungen

Jochen Müsseler, Gisa Aschersleben
und Wolfgang Prinz

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg · Berlin · Oxford

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kopf-Arbeit : Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen / Gerhard Roth/Wolfgang Prinz (Hrsg.). – Heidelberg ; Berlin ; Oxford : Spektrum, Akad. Verl., 1996
ISBN 3-86025-256-9
NE: Roth, Gerhard [Hrsg.]

© 1996 Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg · Berlin · Oxford

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind vorbehalten. Kein Teil des Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages photokopiert oder in irgendeiner anderen Form reproduziert oder in eine von Maschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Es konnten nicht sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen ermittelt werden. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

Lektorat: Merlet Behncke-Braunbeck, Sabine Loss (Ass.)
Redaktion: Sabine Maasen
Produktion: Brigitte Trageser
Umschlaggestaltung: Kurt Bitsch, Birkenau
Druck und Verarbeitung: Konrad Tritsch, Würzburg

9. Die Steuerung von Handlungen

Jochen Müsseler, Gisa Aschersleben
und Wolfgang Prinz

9.1 Einleitung

In diesem Kapitel untersuchen wir, wie einfache Handlungen gesteuert werden, und wie experimentalpsychologische Forschung vorgeht, um diese Frage zu beantworten. Was soll dabei unter Handlungen verstanden werden? Wir wollen uns hier mit einer pragmatischen Arbeitsdefinition begnügen, die einigermaßen dem Sprachgebrauch der Alltagssprache entspricht. Sie hat den Nachteil, nicht besonders präzise zu sein, bietet dafür aber den Vorteil, daß sie unsere Aufmerksamkeit auf ein wichtiges Problem lenkt, das eine Theorie der Handlungssteuerung lösen muß. Unter *Handlungen* werden Segmente menschlichen (oder natürlich auch tierischen) Verhaltens verstanden, die auf ein bestimmtes *Ziel* hin organisiert sind und zu dessen Verwirklichung sie beitragen. Diese Definition ist noch so allgemein, daß vieles in sie hineinpaßt: vom Anknippen eines Lichtschalters über das morgendliche Zähneputzen bis hin zu der Planung einer Geburtstagsfeier oder gar der Durchführung einer Weltreise. Handlungen sind also bestimmte Ausschnitte aus dem fortlaufenden Verhalten der Lebewesen – dem sogenannten Verhaltensstrom –, und sie sind ausgeschnitten und zusammengebunden nach dem Kriterium des gemeinsamen Ziels.

Daß wir uns hier auf *einfache Handlungen* beschränken, hat überwiegend praktische Gründe. Unter einfachen Handlungen wollen wir solche verstehen, 1) die nur von kurzer Dauer sind, 2) die aus einfachen und überschaubaren Bewegungen bestehen und 3) deren Komponenten kontinuierlich miteinander zusammenhängen (so daß sie im Grunde nur einen einzigen kohärenten Verhaltensausschnitt bilden). Einfache und kurzlebige Hand- oder Armbewegungen, die diese Bedingungen erfüllen, sind seit jeher ein beliebtes Studienobjekt der experimentellen Motorikforschung. Sie können ohne besonderen Aufwand beliebig oft im Labor erzeugt werden. Hinzu kommen meßtechnische Vorteile: Je einfacher die Bewegungen sind, desto einfacher gestaltet sich die meßtechnische Erfassung ihrer räumlichen und zeitlichen Form (= Kinematik) und der zugrundeliegenden Kräfte (= Dynamik). Schon die kinematische und dynamische Erfassung einer so bescheidenen Handlung wie des Zähneputzens würde die meßtechnischen Möglichkeiten der meisten Labors deutlich überfordern – ganz zu schweigen von den theoretischen Möglichkeiten, Handlungen dieser Komplexität adäquat zu beschreiben und zu modellieren.

Die Frage, wie Handlungen gesteuert werden, hat in der experimentellen Psychologie seit jeher weniger Beachtung erfahren als die Frage nach den Funktionsgrundlagen von Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Vergleicht man den heutigen Entwicklungsstand der psychologischen Motorikforschung mit dem der Wahrnehmungs- und Aufmerksamkeitsforschung, kommt man rasch zu dem Ergebnis, daß das Volumen der Forschung auf der Wahrnehmungsseite das Volumen auf der Handlungsseite um ein

Mehrfaches übersteigt; ein Blick in die Geschichte der Psychologie zeigt, daß dies auch in früheren Zeiten kaum jemals anders war. Auch in der Neurobiologie scheint die Forschung auf der afferenten Seite seit jeher stärker entwickelt zu sein, wenn auch das Ungleichgewicht der beiden Seiten dort etwas weniger ausgeprägt ist als in der Psychologie.

Die Gründe für dieses Defizit sind überwiegend in der Entstehungsgeschichte der modernen Psychologie zu suchen, die ja – jedenfalls im 19. Jahrhundert – noch weitgehend mit der Entstehungsgeschichte der modernen Neurobiologie zusammenfällt (vgl. Teil II). Danach wurde ein wichtiges Ziel psychologischer und neurophysiologischer Forschung darin gesehen, einen Beitrag zur Beantwortung philosophischer Fragen zu leisten, und zwar insbesondere zu Fragen aus dem Bereich der Erkenntnistheorie. Für Wissenschaftler wie Johannes Müller, Hermann von Helmholtz, Ewald Hering, Gustav Theodor Fechner oder Wilhelm Wundt – Wissenschaftler, die heute als Gründungsväter der experimentellen Psychologie angesehen werden – lag es auf der Hand, daß die damals neuartigen experimentellen Forschungen zur Wahrnehmungspsychologie und zur Sinnesphysiologie neues Licht auf die erkenntnistheoretische Grundsatzfrage werfen mußten, in welchem Verhältnis das, was wir von der Welt *sehen und erkennen*, zu dem steht, was in der Welt *tatsächlich der Fall ist*. Hierzu kann nur Wahrnehmungsforschung etwas beitragen, nicht aber Handlungsforschung, und so wird verständlich, warum die Wahrnehmungsseite mehr Beachtung fand als die Handlungsseite.

Auch in neuerer Zeit hat sich an dieser Situation im Prinzip nicht viel geändert: Nach wie vor ist in der Forschung die Wahrnehmungsseite gegenüber der Handlungsseite dominant. Das bedeutet aber keineswegs, daß wir über die Steuerung von Handlungen nichts wissen. Ganz im Gegenteil hat uns insbesondere die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts wichtige Erkenntnisse über die Funktionsgrundlagen der Handlungssteuerung beschert. Möglich wurden diese Erkenntnisse nicht zuletzt deshalb, weil in dieser Zeit die methodischen Möglichkeiten zur objektiven Messung von Handlungseigenschaften und der damit verbundenen theoretischen Interpretation dieser Meßwerte erheblich verbessert wurden. Dies betraf zunächst die zeitlichen Eigenschaften von Handlungen, die von der geradezu stürmischen Entwicklung von Reaktionszeitmethoden profitierten, die in den fünfziger Jahren einsetzte, und es betrifft in den letzten Jahren zunehmend auch die räumlichen Eigenschaften von Handlungen, die mit Hilfe einer Reihe neu entwickelter Registrier- und Analysetechniken zunehmend präzise erfaßt und ausgewertet werden können.

Wir beschäftigen uns im folgenden mit Fragen der Initiierung (Abschnitt 9.2) und der Steuerung von Handlungen (Abschnitte 9.3–9.5). Die Frage der Initiierung betrifft das Problem, wie aus Absichten konkrete Handlungen und Bewegungen werden bzw. wie im Zentralen Nervensystem die Kommandos generiert werden, mit denen dann die peripheren Effektoren gespeist werden, so daß Absichten in reale Handlungen umgesetzt werden. Die Frage der Steuerung betrifft das Problem, wie die in der Umwelt verfügbare Information dazu beiträgt, Einzelheiten der Bewegungsausführung festzulegen. In den beiden ersten Abschnitten, die sich mit diesem Problem beschäftigen, betrachten wir Aufgaben, in denen räumliche bzw. zeitliche Eigenschaften von vorher festliegenden, einfachen Handlungen durch die aktuelle Reizinformation bestimmt werden – d.h. *wo* bzw. *wann* eine eindeutig bestimmte Handlung zu erfolgen hat –, und wir untersuchen, was man aus der Analyse dieser Aufgaben über die Steuerung räumlicher und zeitlicher Eigenschaften von Handlungen lernen kann (Abschnitte 9.3 und 9.4). In Abschnitt 9.5 betrachten wir Aufgaben mit komplexeren zielgerichteten

Handlungen wie z. B. Zeigen, Greifen oder Fangen – Aufgaben also, bei denen es nicht um das *Wo?* oder das *Wann?* einer vorher festliegenden, eindeutigen Bewegung geht, sondern um das *Wie?* einer Handlung, deren Ziel durch eine Vielzahl unterschiedlicher Bewegungskonfigurationen erreicht werden kann. Zum Schluß erörtern wir noch die Frage, wie die Beziehung zwischen Intentionen und Handlungen erklärt werden kann (Abschnitt 9.6).

9.2 Initiierung von Handlungen

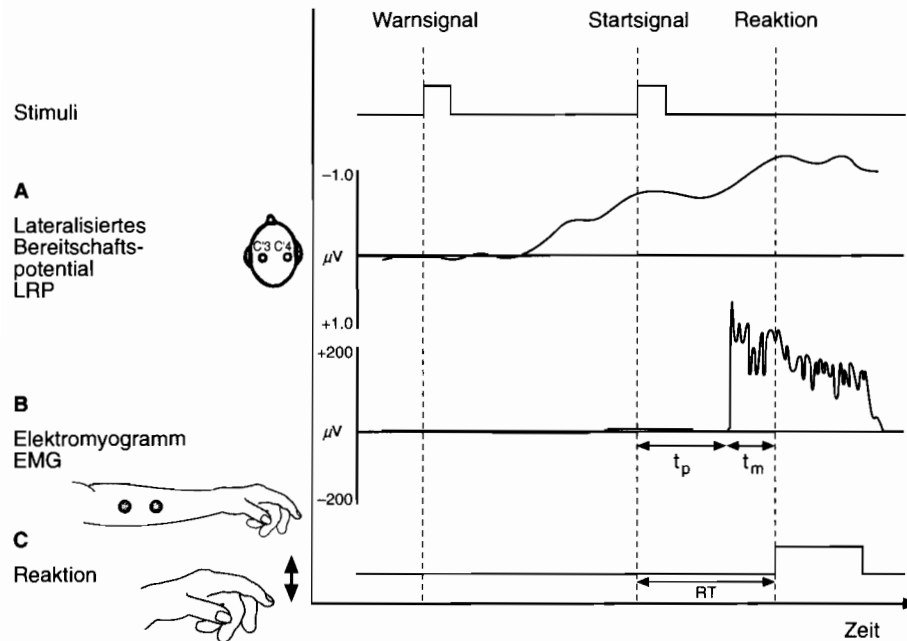
Im folgenden beschäftigen wir uns mit den Faktoren, die die Initiierung von Handlungen beeinflussen. Im Vordergrund stehen dabei *vorbereitende* Prozesse – Prozesse also, die *vor* der offen beobachtbaren Handlung oder Handlungssequenz ablaufen. Zunächst gehen wir darauf ein, welcher Methoden sich die Forschung bei der Registrierung solcher Prozesse bedient. Anschließend erörtern wir aktuelle Modellvorstellungen über die Vorbereitung und die Initiierung einfacher Reaktionen und Reaktionssequenzen.

Psychologische und physiologische Indikatoren. Daß kognitive Prozesse bereits vor der Initiierung einer ersten Bewegung die Reaktion einleiten und entsprechend vorbereiten, läßt sich durch eine Reihe von Befunden nachweisen. Auf corticaler Ebene kann man beispielsweise an Kopfhautelektroden feststellen, daß unmittelbar vor und mit einer motorischen Reaktion eine höhere Potentialnegativierung auf der zur jeweiligen Reaktion kontralateralen Hirnhälfte zu beobachten ist (Abbildung 9.1). Eine derartig höhere Negativierung gegenüber der ipsilateralen Seite wird mit reaktionsvorbereitenden Prozessen in Verbindung gebracht und ist kennzeichnend für das *lateralisierte Bereitschaftspotential* (LRP, einführender Überblick bei Coles, 1989).

Auch an den Muskeln selbst ist bereits ca. 50 ms vor der ersten offen beobachtbaren Reaktion ein Potentialanstieg im *Elektromyogramm* (EMG) vorhanden. Diese sogenannte motorische Zeit t_m repräsentiert elektromechanische Prozesse am Muskel und ist von der sogenannten prämotorischen Zeit t_p zu unterscheiden, die auf zentraler Ebene zur Bereitstellung der Reaktion benötigt wird.

Änderungen in der *Reaktionszeit* (RT) schließlich, also der Zeit zwischen dem Darbietungsbeginn eines Reizes und der zugehörigen ersten beobachtbaren Reaktion, werden durch viele dieser psychophysiologischen Indikatoren bzw. der sich darin widerspiegelnden Mechanismen bedingt. Derartige Indikatoren ergänzen und erweitern damit heutzutage eine Forschungstradition, die seit Beginn der experimentellen Psychologie im Blickpunkt des Interesses steht: Aus der Analyse von Reaktionszeiten erhofft man sich Rückschlüsse auf kognitive Verarbeitungsprozesse und damit auch auf die übrigen Prozesse, die für die Ausführung motorischer Handlungen relevant sind. Posner (1978) hat für dieses Vorgehen den Begriff der mentalen Chronometrie geprägt. Tatsächlich wurde auch in Untersuchungen zur motorischen Vorbereitung zunächst das Reaktionszeitparadigma verwendet.

Welche Schlußfolgerungen kann man denn daraus ziehen, wenn die Reaktionszeit für die Ausführung einer Bewegung kürzer ist als für die Ausführung einer anderen? Kann man aus Reaktionszeiten überhaupt auf entsprechende Verarbeitungsunterschiede schließen? Dies ist unter bestimmten Voraussetzungen durchaus zu bejahen. Man muß dabei aber berücksichtigen, daß sich das interne Generieren von Reaktionen in



9.1 Beispiele psychophysiologischer Registrierungen, mit denen sich kognitive Vorbereitungsprozesse motorischer Reaktionen zeigen lassen: In dieser Anordnung wird nach einem Warnsignal ein Startsignal präsentiert, auf das mit einer definierten Bewegung der rechten Hand reagiert wird. (A) Weit vor der Reaktion und unter diesen Bedingungen bereits vor Darbietung des Startsignals ist auf der zur Bewegung kontralateralen Kopfhautoberfläche (an Elektrode C'3) eine höhere Potentialnegativierung meßbar als auf der entsprechenden ipsilateralen Seite (an C'4). Die zugehörigen Differenzen finden ihren Niederschlag im lateralisierten Bereitschaftspotential (LRP), das als Ausdruck motorisch vorbereitender Prozesse interpretiert wird. (B) Auch an den Muskeln ist bereits vor der offen beobachtbaren Reaktion eine zunehmende elektromyographische Aktivität (EMG) vorhanden. Die erste registrierbare Veränderung dort findet ihren Niederschlag in der prämotorischen Zeit (t_p , die Zeit zwischen Startsignal und ersten Potentialänderungen am Muskel), also einer Zeit, die offensichtlich auf zentraler Ebene zur Bereitstellung der Reaktion benötigt wird. Die dann verbleibende Zeit bis zur ersten offenen Reaktion repräsentiert die motorische Zeit (t_m), die die peripheren elektromechanischen Prozesse am Muskel reflektiert. (C) Die Reaktionszeit (RT) schließlich (z. B. bis zum Niederdrücken einer Taste) reflektiert einen offen beobachtbaren Verhaltensparameter. Da sie unter anderem durch die entsprechenden Auftretenszeitpunkte der LRP- und EMG-Aktivitäten determiniert wird, kann sie ebenfalls zur Analyse motorischer Vorbereitungsprozesse herangezogen werden.

zwei beobachtbare, aber nicht unbedingt unabhängige Leistungsparameter niederschlägt: erstens in der Güte der Reaktionen (d.h. in deren Richtigkeit und Präzision) und zweitens in deren Zeitbedarf. Wie man sich leicht klarmachen kann, hängt die Präzision einer Bewegung davon ab, wieviel Zeit man für deren Ausführung verwendet, d.h. je mehr Zeit man aufwendet, desto höher deren Güte und umgekehrt¹. Dies gilt im gleichen Maße nicht nur während der Ausführung einer Bewegung, sondern auch für den Reaktionsbeginn, also der Reaktionszeit.

¹ In Abschnitt 9.5 wird dieser Zusammenhang exemplarisch an einer Gesetzmäßigkeit, dem sogenannten Fittschen Gesetz, detailliert erörtert.

Unterschiede in Reaktionszeiten lassen sich demnach nur dann eindeutig als kognitive Verarbeitungsunterschiede interpretieren, wenn die entsprechenden Reaktionen mit einer gleichen Güte erfolgen, wenn also die Präzision der Reaktion möglichst hoch bzw. deren Fehlerquote möglichst gering ist. Reaktionszeitstudien versuchen, dies durch entsprechende experimentelle Manipulationen zu gewährleisten. Meistens wird daher die Reaktionszeit an einfachen Reaktionen (z.B. dem Heben eines Fingers) erhoben, deren Güte somit wenig variieren kann.

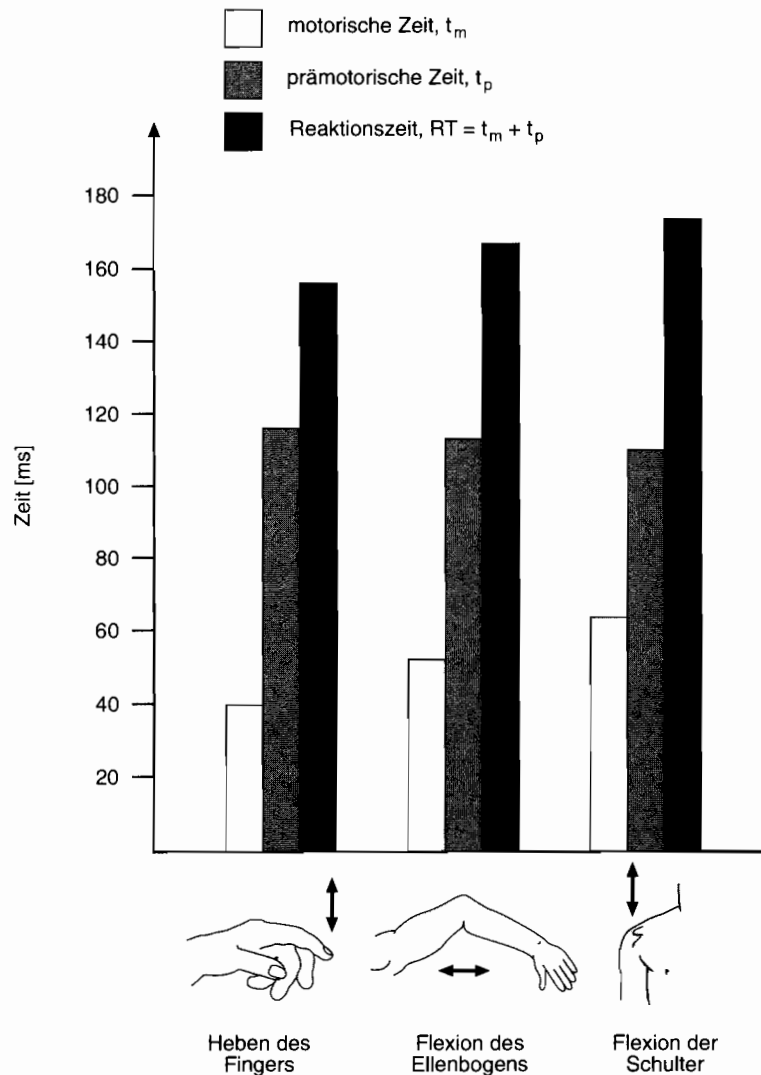
Jedes einzelne Maß, sei es nun das lateralisierte Bereitschaftspotential, die elektro-myographische Potentialänderung, die Reaktionszeit oder eine andere in diesem Zusammenhang meßbare Größe, kann ein Indikator dafür sein, daß eine gewisse motorische Vorbereitung innerhalb des kognitiven Systems stattfindet; jedes Maß allein spezifiziert den Vorbereitungsmechanismus allerdings unzureichend, es kann aber seinen Beitrag zur Entwicklung von Modellvorstellungen liefern. Im folgenden fokussieren wir deshalb zunächst auf die Faktoren, die einen Einfluß auf einfache Reaktionen und deren Initialisierungszeiten ausüben. Danach wird erörtert, wie man sich den Prozeß der motorischen Programmierung vorstellen kann.

Einfache Reaktionen. Einfache Reaktionen (z.B. ein Tastendruck) auf das Erscheinen eines Reizes sind nach durchschnittlich 180 ms beobachtbar; diese Zeit wird allerdings von einer Vielzahl von Faktoren determiniert. So hat sich gezeigt, daß auf Töne schneller reagiert werden kann als auf visuelle Reize und daß Dauer, Größe, Intensität und Kontrast der Reize die Reaktionszeit beeinflussen (Überblick bei Woodworth & Schlosberg, 1954; Keele, 1986). Derartige Reaktionszeitunterschiede wird man eher peripheren Reizverarbeitungs- und Identifikationsmechanismen als Reaktionsprogrammierungsprozessen zuschreiben können. Aufschlußreicher sind daher in unserem Zusammenhang Reaktionssituationen, in denen auf ein immer gleiches Startsignal zuvor festgelegte, aber verschiedene Handlungen initiiert und ausgeführt werden². In diesem Fall können die für jede Handlung spezifischen motorischen Anforderungen und Programmierungen ihren Niederschlag in der Reaktionszeit finden. Diesen Untersuchungen wenden wir uns im folgendem zu.

Anson (1982) berichtet beispielsweise, daß bei einfachen Reaktionen auf einen akustischen Reiz die Reaktionszeit von 156 auf 166 bzw. 173 ms ansteigt, wenn die Reaktion statt mit dem Finger mit dem Ellbogen oder der Schulter ausgeführt wird (Abbildung 9.2). Eine Interpretation wäre die, daß die zentrale motorische Programmierung dieser Effektoren unterschiedlich ist. Man weiß z.B. seit längerem, daß die Größe des corticalen motorischen Areals, welches für die Fingerbewegung zuständig ist, im Vergleich riesig zu den Arealen ist, die Schulter und Ellbogen innervieren. Die Größe des versorgenden Hirnareals könnte demnach einen Zusammenhang zum Reaktionszeitbefund aufweisen.

Anson fand aber auch, daß die prämotorische Zeit t_p (vgl. auch Abbildung 9.1) relativ unabhängig ist vom ausführenden Effektor (etwa um 115 ms), wohingegen die

² In der Taxonomie von Donders (1868/1969) wird diese Reaktionszeit als einfache a-Reaktionszeit betrachtet, um sie von b- und c-Wahlreaktionszeiten zu unterscheiden, die in Situationen zu beobachten sind, in denen auf (einen) bestimmte(n) Reiz(e) mit einer bestimmten Reaktion reagiert werden muß. Auch Wahlreaktionszeitexperimente können erfolgreich herangezogen werden, um reaktionsvorbereitende Mechanismen zu demonstrieren. In Abschnitt 9.3 werden wir daher auf Kompatibilitätsphänomene eingehen, die sich einer spezifischen Form des Wahlreaktionszeitparadigmas bedienen. Ein Überblick über Wahlreaktionszeitexperimente und deren Implikationen für informationsverarbeitende Ansätze liefern z.B. Prinz (1983, Kapitel 4; 1990) und Keele (1986).

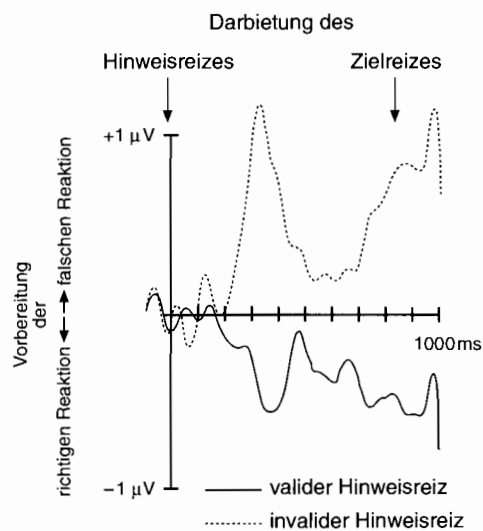


9.2 Reaktionszeit, prämotorische und motorische Zeit auf das Heben des Fingers, dem Beugen des Ellenbogens und das Heben der Schulter (nach Anson, 1982, Experiment 2).

motorische Zeit t_m davon abhängt, welcher Effektor benutzt wird. Bis zu einer ersten beobachtbaren Bewegung des Fingers vergehen durchschnittlich weitere 40 ms nach der ersten elektromyographischen Aktivität, während beim Ellbogen durchschnittlich weitere 52 ms und bei der Schulter 63 ms verstreichen. Dieser Befund ist kontrovers interpretierbar: Nach Anson sind die offen beobachtbaren Reaktionszeitveränderungen in diesem Falle eher nicht durch zentrale neuropsychologische Bewegungsprogrammierungen bedingt, sondern auf elektromechanische Prozesse an den Muskeln zurückzuführen. Nach seiner Meinung benötigt der Erregungsaufbau aufgrund der größeren Muskelmasse in den beteiligten Ellbogen- und Schultermuskeln mehr Zeit. Ebenso ist aber auch denkbar, daß die motorische Programmierung einer Fingerbewegung auf-

grund der ausgedehnteren corticalen Strukturen differenzierter ist und daß damit auch eine effizientere neuronale Erregungsübertragung an die beteiligten Fingermuskeln gewährleistet ist. In diesem Fall wären die Unterschiede in der motorischen Zeit doch zentral verursacht.

Ein weiterer Faktor, der die Reaktionszeit nachhaltig beeinflußt, ist das Ausmaß der Vorbereitung, mit der ein Reiz, auf den reagiert werden soll (imperativer Reiz), erwartet wird. Wird ein Reiz durch ein Vorsignal angekündigt, wird die Reaktionszeit allgemein kürzer. Allerdings variiert diese Abnahme mit dem Zeitintervall zwischen Vorsignal und imperativem Reiz: Nach einer Studie von Klemmer (1956) steigt die Reaktionszeit wieder von 209 auf 252 bzw. 269 ms an, wenn der imperative Reiz nach dem Vorsignal um 0,25, 4,25 oder 8,25 Sekunden verzögert dargeboten wird. Ebenso konnte gezeigt werden, daß die Reaktionszeit mit zunehmender zeitlicher Signalungewißheit anwächst, d. h. je unsicherer der Zeitpunkt der Reaktionsausführung ist, desto weniger ist die Reaktion vorbereitet (Klemmer, 1957). Eine naheliegende Interpretation dieses Befundmusters ist die, daß die Aktivierung des nach dem Warnsignal erzeugten motorischen Programms nicht beliebig lange aufrecht erhalten werden kann und dadurch die Programmierung bei Auftreten des Startsignals erneuert werden muß (vgl. auch die Diskussion bei Sternberg et al., 1978; Canic & Franks, 1989; Hommel, 1995; Müsseler, 1995; Müsseler & Prinz, 1996). Anhaltspunkte dafür ergeben sich auch aus Studien, in denen ein zuvor dargebotener Pfeil die reaktionsausführende Hand mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit anzeigt, aber zwischen Pfeil und eigentlichem imperativem Reiz eine Zeitspanne von 900 ms liegt. Hier ist 200 ms nach dem Pfeil zunächst ein lateralisiertes Bereitschaftspotential für die entsprechende Hand



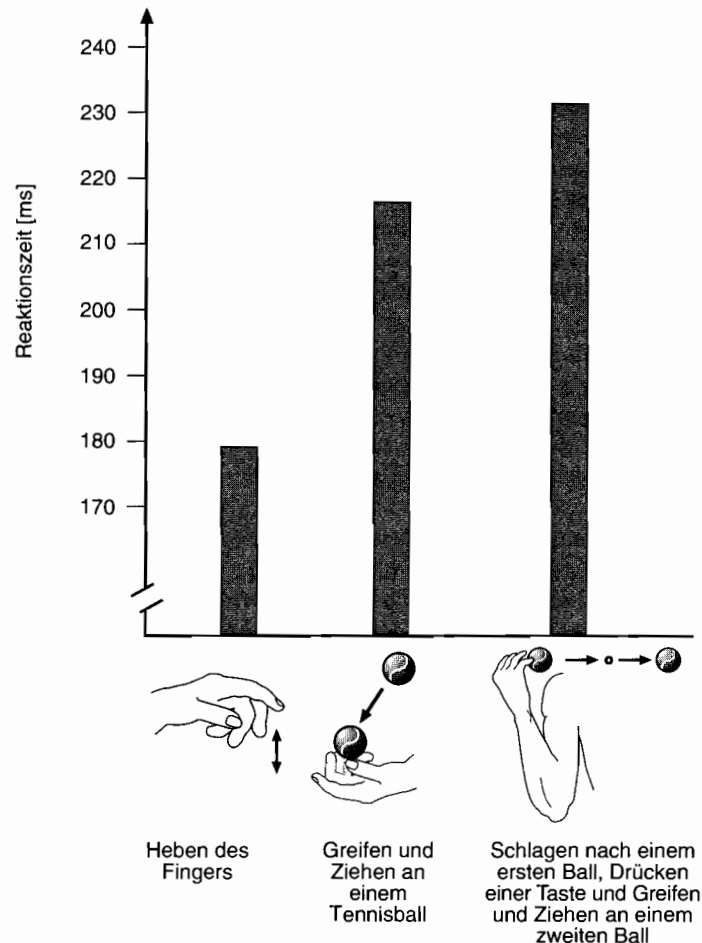
9.3 Lateralisierte Bereitschaftspotentiale für Versuchsdurchgänge, in denen die Reaktion auf einen Zielreiz 900 ms zuvor korrekt (valide) bzw. falsch (invalide) durch einen Hinweisreiz angezeigt wird. Wie zu sehen, wird bei korrekten Hinweisreizen bereits vor Auftauchen des imperativen Reizes die richtige, und bei inkorrekten Hinweisreizen die falsche Reaktion vorbereitet – eine Aktivierung, die aber zwischenzeitlich abfällt und kurz vor dem erwarteten Reaktionszeitpunkt wieder ansteigt (nach Eimer, 1995, Experiment 2).

vorhanden, das nach 500 ms allerdings wieder abfällt, um 200 bis 300 ms vor dem erwarteten Reaktionszeitpunkt wieder langsam anzusteigen (Eimer, 1995). Das zwischenzeitliche Absinken des Bereitschaftspotentials kann darauf zurückgeführt werden, daß eine Reaktion immer nur kurz vor ihrer Ausführung entsprechend vorbereitet und programmiert wird.

Motorische Programmierung bei komplexen Reaktionsanforderungen. Implizit wird in den obigen Ausführungen bereits eine Modellvorstellung verwendet, die annimmt, daß vor Initiierung einer Bewegung die entsprechenden Kommandos in Form eines *motorischen Programms* bereitgestellt werden. In einer extremen Variante dieser Vorstellung enthält diese Programmierung alle für eine erfolgreiche Ausführung einer Bewegung erforderlichen Parameter, so daß die Bewegung – einmal programmiert und initiiert – nach der durch das Programm bereitgestellten Kommandoabfolge ausgeführt wird (neuerer Überblick bei Rosenbaum & Krist, 1994). Dies ist bei einfachen Reaktionen wie dem Drücken einer Taste oder dem Heben der Schulter unmittelbar einleuchtend. Hinweise auf eine motorische Programmierung dieser Art glaubt man aber auch in Untersuchungen gefunden zu haben, in denen Reaktionszeiten auf Reaktionen mit unterschiedlich komplexen Anforderungen erhoben wurden.

Henry und Rogers (1960) verglichen die einfachen Reaktionszeiten beim Heben eines Fingers, beim Greifen nach einem Tennisball und beim sukzessiven Schlagen und Greifen nach zwei Tennisbällen, wobei als Zwischenhandlung eine Taste berührt werden mußte. Es zeigte sich, daß die Reaktionszeit des Fingerhebens um 20% schneller war als das Greifen nach dem Tennisball und dies wiederum 7% schneller als das doppelte Schlagen und Greifen nach den Bällen. Henry und Rogers interpretierten dieses Ergebnis damit, daß das Erzeugen eines aktuellen Programms in einem an der konkreten Bewegungsausführung beteiligten Arbeitsspeicher länger dauert, je komplexer die zu erstellende Bewegung ist (*memory drum*-Theorie). Die Bewegung wird also von einer überdauernden Bewegungsrepräsentation des Langzeitspeichers in einen motorischen Ausgabespeicher überführt. Dabei gilt: Je mehr Bewegungssegmente eine auszuführende Handlung enthält (Henry, 1980), desto länger ist die Übertragungs- bzw. Generierungszeit der motorischen Kodierungen in dem entsprechenden motorischen Ausgabespeicher und desto länger ist daher auch die Reaktionszeit (Komplexitätseffekt).

Diese Idee, daß vor der motorischen Reaktion ein motorischer Ausgabespeicher (vgl. auch *motor output buffer*, Rosenbaum, 1991, Kapitel 3; Verwey, 1996) „geladen“ wird und daß sich die Komplexität dieses Prozesses in einfachen Reaktionszeiten niederschlägt, läßt sich auf verschiedene Aufgabentypen anwenden: Der Komplexitätseffekt findet sich bei Tasten- bzw. Tippsequenzen (Sternberg et al., 1978; Inhoff et al., 1984; Neumann, 1987; Müsseler & Prinz, 1996) genauso wie bei Sprechsilben (Klapp, 1971, 1974; Sternberg et al., 1978, 1990; Rosenbaum et al., 1987) oder beim Schreiben von Wörtern mit unterschiedlicher Länge (Hulstijn & van Galen, 1983; Thomassen & van Galen, 1992; van Galen, 1991). Andere Untersuchungen spezifizieren diese Idee dahingehend (Marteniuk & McKenzie, 1980), daß die Reaktionszeit nicht nur mit der Zahl der sukzessiv auszuführenden Bewegungssegmente (z.B. die Anzahl der Tastendrucke oder der Sprechsilben) steigt, sondern auch dann, wenn die *Komplexität* der einzelnen Segmente variiert – wenn also beispielsweise anstelle eines Armes beide Arme zu bewegen sind (Glencross, 1973) oder wenn während einer Hebelbewegung zusätzlich eine Taste am Hebel zu betätigen ist (Klapp & Erwin, 1976).



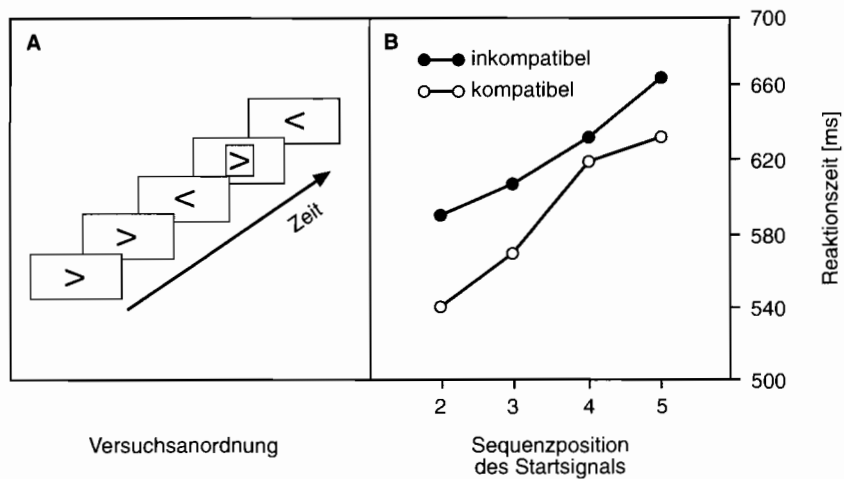
9.4 Reaktionszeit auf drei unterschiedlich komplexe Bewegungen: dem Heben eines Fingers, dem Greifen und Ziehen nach einem Tennisball und dem sukzessiven Schlagen nach einem ersten Ball, dem anschließenden Druck auf eine Taste und abschließendem Greifen und Ziehen nach einem zweiten Tennisball (nach Henry & Rogers, 1960).

Problematisch am Programmierungskonzept von Henry und Rogers (1960) ist die genaue Definition dessen, was eine komplexe gegenüber einer weniger komplexen Bewegung auszeichnet. Das, was uns komplex erscheint, muß nicht notwendigerweise durch ein längeres Programm gesteuert werden (Heuer, 1990). Jeder Computerprogrammierer weiß, daß sich eine komplex erscheinende Bildausgabe auf einem Monitor durch ein recht simples Programm realisieren lassen kann und umgekehrt. Auch die Definition von Henry (1980), nach der sich die Komplexität aus der Anzahl der zu verbindenden Bewegungssegmente ergibt, schafft in dieser Hinsicht keine Verbesserung. Sie wäre nur dann sinnvoll, wenn klar ist, was ein Bewegungssegment ausmacht. Dies ist umso schwieriger, wenn – wie in dem Beispiel von Henry und Rogers (1960) – verschiedenartige Bewegungen unter Hinzuziehung verschiedenster Effektoren miteinander verglichen werden (vgl. hierzu auch die oben genannten Untersuchungen von

Anson, 1982). Selbst bei einfachen Tipp- und Tastensequenzen können die Segmente nur auf den ersten Blick besser isoliert werden, denn aufgrund von Gruppierungsprozessen einzelner Tastendrucke könnten ganz andere Segmentgrenzen kognitiv wirksam werden. Entsprechende Erweiterungen lassen so den Ansatz unwiderlegbar werden (Heuer, 1990).

Außerdem zeigen andere Untersuchungen, daß eine vollständige Programmierung bei *sehr* komplexen Bewegungsmustern eher unwahrscheinlich ist. So reduziert sich der Komplexitätseffekt bei längeren Bewegungssequenzen (Sternberg et al., 1978, 1988) oder verkehrt sich sogar ins Gegenteil (Chamberlin & Magill, 1989; García-Colera & Semjen, 1988; Rosenbaum et al., 1987). Dies ist auch plausibel, weil längere Bewegungssequenzen *während* der Ausführung vervollständigt werden können (anhand einer sogenannten Online-Programmierung). Der Gedanke, daß Bewegungsprogramme in einem motorischen Ausgabespeicher vorbereitet werden, ist deshalb in den letzten Jahren zwar nicht gänzlich verworfen, aber in einigen Punkten spezifiziert und erweitert worden. Wir wollen daher im folgenden neben einer motorischen Programmierungsebene eine kognitive Planungsebene einführen.

Kognitive Planungs- und motorische Programmierungsebene. Die Unterscheidung einer motorischen Programmierungs- von einer kognitiven Planungsebene wird nicht zuletzt in Untersuchungen notwendig, in denen eine Reaktion(ssequenz) zwar hinreichend spezifiziert, aber der Ausführungszeitpunkt nicht festgelegt ist. In einer Versuchsordnung unseres Labors wurden beispielweise fünf Pfeile, die zufällig nach rechts oder links wiesen, nacheinander im Sekundentakt präsentiert (Müsseler, 1995; Müsseler & Prinz, 1996). Aufgabe der Versuchspersonen war es, diese Sequenz durch Druck auf linke und rechte Tasten zu reproduzieren – allerdings durften sie damit erst



9.5 A: Im Sekundentakt werden fünf zufällig nach links oder rechts weisende Pfeile dargeboten. Die Aufgabe der Vp besteht darin, die bis dahin dargebotene Pfeilsequenz auf ein Startsignal hin (ein rechteckiger Rahmen) mit linken und rechten Tastendrücken zu reproduzieren. Das Startsignal erscheint für die Vp unvorhersehbar mit einem der Pfeile. B: Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Sequenzposition des Startsignals und der Übereinstimmung (kompatibel versus inkompatibel) zwischen der ersten auszuführenden Reaktion und dem mit dem Startsignal präsentierten Reiz (nach Müsseler & Prinz, 1996).

dann beginnen, wenn ein Startsignal gegeben wurde. Das Startsignal erschien unvorhersehbar mit einem der fünf Pfeile und bestand aus einem rechteckigen Rahmen, welcher den entsprechenden Pfeil umgab (Abbildung 9.5A).

Vor Darbietung des Startsignals sind also die ersten Teilhandlungen spezifiziert. Erscheint das Startsignal beispielsweise erst an vierter Position, sind die drei ersten Teilhandlungen bereits festgelegt. Diese Teilsegmente der gesamten Reaktionssequenz können demnach von den Versuchspersonen in einem gewissen Umfang und im voraus „geplant“ werden, worauf die geringen Reproduktionsfehler bei dieser Aufgabe auch tatsächlich hindeuten. Die Ergebnisse offenbaren aber weiter, daß eine konkrete motorische Programmierung nicht vor der Präsentation des Startsignals eingeleitet wird: Dafür ist erstens der Reaktionszeitanstieg in Abhängigkeit von der Sequenzposition kennzeichnend (Abbildung 9.5B). Dieser Befund entspricht dem oben genannten Komplexitätseffekt, da bei Erscheinen des Startsignals an zweiter Sequenzposition nur ein vorheriges Teilsegment, bei Erscheinen des Startsignals an fünfter Sequenzposition aber vier zuvor festgelegte Teilsegmente berücksichtigt werden müssen. Zweitens spricht gegen eine vorzeitig eingeleitete, konkrete motorische Programmierung der Befund, daß die erste auszuführende Teilreaktion sich als interferenzanfällig gegenüber dem Pfeil erweist, der mit dem Startsignal präsentiert wurde. Weist beispielsweise dieser Pfeil nach rechts, kann eine erste rechte (und kompatible) Teilreaktion schneller ausgeführt werden als eine linke (und inkompatible) Teilreaktion. Würde zu diesem Zeitpunkt bereits ein motorisches Programm mit einem zugehörigen motorischen Kode existieren, wäre schwer vorstellbar, warum dieser Kode noch interferenzanfällig auf neue Wahrnehmungsinhalte reagieren sollte (vgl. auch die Befunde von Hommel, 1995).

Die Bereitstellung eines konkreten Bewegungsprogramms in einem der Motorik zugeordneten Ausgabespeicher ist also eher peripher anzusiedeln, was die Auffassung nahelegt, daß das Programm – einmal generiert und initiiert – zumindest bis zu einem gewissen Grad auch „abgearbeitet“ werden muß. Nach Logan (1982) sind Versuchspersonen beim Schreibmaschineschreiben aber sehr wohl in der Lage, auf ein Stoppsignal hin die gerade ausgeführte Handlung relativ kurzfristig zu unterbrechen, zum Teil schon nach einem einzelnen Tastendruck. In einer anderen Versuchsanordnung konnten De Jong et al. (1990) zeigen, daß der letzte Zeitpunkt, zu dem eine einfache Reaktion noch gestoppt werden kann, *nach* der kognitiven Initiierung der Bewegung anzusiedeln ist; dabei diente als Indikator dieser Initiierung das Auftreten des lateralisierten Bereitschaftspotentials. All dies deutet darauf hin, daß das motorische Programm noch kurz vor der Ausführung der einzelnen Bewegungssegmente unter Kontrolle der zentralen kognitiven Planungsebene steht und daß damit die Bewegungsausführung nicht in jedem Fall einem starren und unveränderbaren Steuerungsprozeß unterliegt.

Die obigen Ausführungen zur motorischen Programmierung nach Henry und Rogers (1960) legen weiter nahe, daß für jede Bewegung ein einzigartiges Bewegungsprogramm erstellt wird. Voraussetzung dafür wiederum ist, daß jede Bewegung ihre Entsprechung in einer überdauernden Bewegungsrepräsentation eines Langzeitspeichers hat. Folgerichtig müßte eine nahezu unbegrenzte Anzahl von Bewegungsrepräsentationen existieren, was zumindest aus Kapazitätsüberlegungen eher unwahrscheinlich ist. Heuer (1984, vgl. auch 1994) kommt dagegen zu dem Schluß, daß vielmehr Programme rekrutiert werden können, die unterschiedliche Spezifikationen erfahren. Ähnlich geht das Postulat der „generalisierten motorischen Programme“ von Schmidt (1988) zwar zunächst davon aus, daß vor Bewegungsbeginn motorische Kommandos

bereitgestellt werden. Im Unterschied zu den frühen Programmierungstheorien wird jetzt aber angenommen, daß auf Prototypen derartiger Programme zurückgegriffen wird, deren Parameterspezifikationen zu ganz unterschiedlichen Handlungen führen können. Außerdem ist dieser Ansatz in der Lage, während der Programmausführung visuelle und propriozeptive Rückmeldungen zu berücksichtigen, mit denen während der Bewegungsausführung Korrekturen am Programm und dessen Ausführung vorgenommen werden können.

Einigkeit herrscht heute weitgehend darüber, daß relativ einfache und kurze Bewegungen allein durch ein zuvor erstelltes motorisches Programm gesteuert werden können. Bei komplexeren zielgerichteten Bewegungen hingegen reicht die Programmsteuerung oft nicht aus, weil Korrekturen und Modifikationen während der Ausführung unerlässlich sind. Weiter unten (in Abschnitt 9.5) wird dies aufgegriffen und eine Alternative zur (reinen) Programmsteuerung erörtert.

Eine weitere Frage ist die, wie eine einmal gefaßte und schließlich auch von uns bewußt registrierte Handlungs*intention* zeitlich mit dem beobachtbaren Ausführungsbeginn einer Handlung zusammenfällt. Oder anders ausgedrückt: In welchem zeitlichen Verhältnis steht der Beginn der subjektiv wahrnehmbaren Handlungsintention zum Beginn physiologisch und psychologisch registrierbarer Veränderungen? Zu diesem Zwecke hat Libet (1985) eine Versuchsanordnung entwickelt, die es gestatten soll, den Zeitpunkt der bewußten Intention zu messen. Die Aufgabe der Versuchsperson ist denkbar simpel: Sie beobachtet einen rotierenden Zeiger einer Uhr und führt eine kurze Bewegung mit dem Handgelenk aus, wann immer es ihr in den Sinn kommt (*self-initiated acts*). Der Zeitpunkt, an dem sie das erstmal den Impuls zur Handlungsausführung verspürt hat, zeigt sie nach jedem Versuchsdurchgang durch die Position des Zeigers auf der Uhr an. Dieser Zeitpunkt wird dann mit den entsprechenden Ausschlägen im lateralisierten Bereitschaftspotential und im Elektromyogramm verglichen.

Auch wenn man die Präzision, mit der diese Methode den Zeitpunkt des Beginns der bewußten Intention erfaßt, kritisch betrachtet (vgl. die Kommentare zu Libet, 1985, 1987, 1989), so sind dennoch die Ergebnisse verblüffend: Das Bereitschaftspotential setzt 350 bis 400 ms *vor* der bewußten Intention ein (und diese wiederum geht der elektromyographischen Reaktion selbst um ca. 200 ms voraus). Danach scheint es, als sei die Handlungsentscheidung längst gefallen, wenn die bewußte Intention ausgebildet wird. Die Handlungsentscheidung kommt offenbar durch andere Prozesse zustande, die Libet als unbewußt bezeichnet. Wir werden diesen Punkt in Abschnitt 9.5 nochmals aufgreifen. Zuvor werden in den nächsten beiden Abschnitten aber noch die Mechanismen erörtert, die zum Erreichen räumlicher und zeitlicher Handlungsziele berücksichtigt werden müssen.

9.3 Räumliche Steuerung von Handlungen

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit der räumlichen Steuerung einfacher Handlungen. Dazu untersuchen wir elementare räumliche Eigenschaften von Handlungen wie z.B. den Ort ihrer Ausführung (Wo?) oder die Richtung ihrer Bewegung (Wohin?), und wir stellen die Frage, wie sie durch Eigenschaften der zugrundeliegenden Reize gesteuert werden. Erleichtern oder behindern beispielsweise bestimmte räumliche Eigenschaften von Reizen (z.B. deren räumliche Anordnungen) die Ausfüh-

rung von Reaktionen, die entsprechende räumliche Eigenschaften aufweisen – und wie kann man sich die Prozesse vorstellen, die diese Zusammenhänge bewirken?

Zur Untersuchung dieser Prozesse bieten sich wiederum einfache Reaktionsaufgaben an, wie wir sie im vergangenen Abschnitt bereits diskutiert haben. Während dort allerdings *einfache Reaktionen* im Vordergrund standen, konzentrieren wir uns in diesem Abschnitt auf *Wahlreaktionen* (vgl. bereits Fußnote 2). Wahlreaktionsaufgaben unterscheiden sich von einfachen Reaktionsaufgaben dadurch, daß mehrere Reaktionen zur Wahl stehen und daß der jeweilige Reiz bestimmt, welche Reaktion jeweils auszuführen ist. Die Reaktionen, die zur Wahl stehen, können z.B. verschiedene Morsetasten sein, die in einer Reihe oder im Quadrat angeordnet ist. Es kann sich dabei aber auch um verschiedene Bewegungen mit einem Joystick handeln – nach vorne, nach hinten, nach rechts, nach links – oder auch um verschiedene künstliche Silben oder natürliche Wörter, die so schnell wie möglich auszusprechen sind. Ebenso vielfältig sind die Reize, die in solchen Experimenten zur Anwendung kommen: Dabei kann es sich z.B. um verschiedene Ziffern, Buchstaben, Wörter, Figuren oder Silben handeln – oder auch um einen einzigen Reiz, der an verschiedenen räumlichen Positionen erscheint. Entscheidend ist nur, daß die beteiligten Reize sich hinreichend unterscheiden, um die Reaktionen eindeutig festlegen zu können.

Jedem Wahlreaktionsexperiment liegt eine Zuordnungsvorschrift zugrunde, die festlegt, welche Reaktion welchem Reiz zugeordnet ist. Über diese Zuordnungsvorschrift wird die Versuchsperson zu Beginn des Versuchs instruiert und darauf verpflichtet, sie streng einzuhalten, d.h. Fehlreaktionen zu vermeiden. Gleichzeitig wird sie darauf verpflichtet, die jeweils geforderte Reaktion so schnell wie möglich abzugeben.

Die Begründung der Wahlreaktionszeitmethode als eines Instruments der psychologischen Forschung geht auf den holländischen Physiologen Frans Cornelis Donders zurück. Wie er bereits in seiner klassischen Arbeit *Über die Schnelligkeit psychischer Prozesse* dargelegt hat (1868/1969), unterscheiden sich Wahlreaktionen von einfachen Reaktionen in den Anforderungen, die die Aufgabe stellt, und zwar in zweierlei Hinsicht. Erstens muß hier jeder Reiz erkannt, d.h. als einer der n möglichen Reize identifiziert werden (*Reizidentifikation*). Zweitens muß daraufhin die richtige Reaktion bestimmt, d.h. unter den n möglichen Reaktionen ausgewählt werden (*Reaktionswahl*). Da für einfache Reaktionen weder das eine noch das andere erforderlich ist, muß man erwarten, daß die Zeiten für Wahlreaktionen länger als für einfache Reaktionen sind. Dies ist – wie bereits Donders feststellte – auch durchweg der Fall. Wir wissen heute aus einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen, 1) daß Wahlreaktionszeiten durchweg länger sind als einfache Reaktionszeiten und 2) daß Wahlreaktionszeiten um so länger dauern, je größer die Zahl der Alternativen ist, zwischen denen zu wählen ist (vgl. z.B. Sanders, 1971; Prinz, 1983, Kapitel 4). Diese Befunde gelten für Reize und Reaktionen aller beliebigen Modalitäten.

Wahlreaktionsaufgaben können dann etwas zur Aufklärung der Mechanismen beitragen, die der räumlichen Steuerung von Handlungen zugrunde liegen, wenn sich die Reaktionen, die zur Wahl stehen, in bestimmten räumlichen Merkmalen unterscheiden – also in dem schon erwähnten Fall der Betätigung einer von mehreren Tasten, die in einer bestimmten Weise räumlich arrangiert sind, oder der Bewegung eines Joysticks in einer von mehreren zur Wahl stehenden Richtungen. In derartigen Aufgaben muß das *Wo?* bzw. das *Wohin?* der jeweiligen Reaktion durch den jeweils dargebotenen Reiz festgelegt werden, und es läßt sich untersuchen, wie gut bestimmte Reize bzw. Reizeigenschaften geeignet sind, bestimmte räumliche Eigenschaften von Reaktionen zu spezifizieren.

9.3.1 Räumliche Kompatibilitätseffekte

Das erste Experiment, das dieser Logik folgt und das in der Literatur verbürgt ist, geht abermals auf Donders (1868/1969) zurück. In einem seiner Experimente verglich Donders die Reaktionszeiten in zwei Aufgaben, in denen sich zeigte, daß räumliche Eigenschaften von Reaktionen durch verschiedene Reize unterschiedlich gut spezifiziert werden können.

Eine der beiden Aufgaben bestand darin, so schnell wie möglich die linke bzw. rechte Hand zu bewegen, wenn der linke bzw. rechte Fuß elektrisch gereizt wurde. Donders realisierte diese Aufgaben in zwei Bedingungen: a) Wenn die Versuchsperson wußte, welcher Fuß gereizt wird (einfache Reaktion) und b) wenn sie vorher nicht wußte, welcher Fuß gereizt werden würde (Wahlreaktion). Das Ergebnis war, daß die Wahlreaktion – wie erwartet – 66 ms länger als die einfache Reaktion dauerte. In der anderen Aufgabe war mit den gleichen Reaktionen (Handbewegungen) auf zwei visuelle Reize zu reagieren, nämlich auf zwei verschiedene Farben. Auch hier wurden wieder einfache Reaktionen und Wahlreaktionen erhoben und die Differenz der Reaktionszeiten gebildet. Diesmal zeigte sich, daß die Wahlreaktionszeit um 180 ms länger war als die einfache Reaktionszeit, die Differenz also fast dreimal so groß war wie in der ersten Aufgabe.

Wie kann man diesen Unterschied erklären? Es scheint, als sei es leichter, die Wahl zwischen einer Bewegung der rechten oder linken Hand auf eine Reizung des rechten bzw. linken Fußes zu gründen, als auf die Darbietung eines roten bzw. grünen Signals. Donders kommentierte diese Befunde so, daß er zwischen „natürlichen“ und „bloß conventionellen“ Zuordnungen zwischen Reizen und Reaktionen unterschied. „Bloß conventionell“ sind willkürliche Festlegungen, die für den Zweck eines Experiments irgendwelche Reize mit irgendwelchen Reaktionen verbinden – z. B. einen roten Reiz mit der rechten Hand und einen grünen mit der linken. „Natürlich“ sind demgegenüber Reiz-Reaktionsverbindungen, die schon vor und unabhängig von der experimentellen Aufgabe wirksam waren und deshalb durch Übung geläufig geworden sind. So kommentiert Donders den geringen Zeitverbrauch für die Reaktionsauswahl bei elektrischer Stimulation der Füße wie folgt: »Auch dies Ergebniss kann uns nicht befremden. Wir liessen die Reizung der rechten Seite mit der rechten Hand, die der linken Seite mit der linken beantworten. Dazu ist sicher die Neigung bereits gegeben, als Resultat von Gewohnheit oder Uebung: denn verlangte man Bewegung der rechten Hand bei Reizung der linken Seite, oder umgekehrt, dann war die Zeit länger und Verwechslung nicht selten. (S. 669)« Was Donders hier zu verstehen gibt, würden wir in modernen Worten so paraphrasieren: Die Zeit für die Auswahl der Reaktion ist in dieser Aufgabe deshalb so gering, weil das kritische Merkmal, in dem sich die beiden Reaktionen unterscheiden (Reaktionsausführung mit der *rechten* versus *linken* Hand) bereits in der Stimulation enthalten ist (Reizung des *rechten* bzw. *linken* Fußes). Es scheint also, als würde die Steuerung eines räumlichen Merkmals der geforderten Handlung dadurch erleichtert, daß der Reiz, der diese Handlung hervorruft, selbst bereits ein entsprechendes Merkmal aufweist.

Der Effekt, den Donders hier zum ersten Mal beschrieben hat, wird in der neueren Literatur als Effekt der *Reiz-Reaktions-Kompatibilität* oder auch kurz als Kompatibilitätseffekt bezeichnet. Von Kompatibilitätseffekten sprechen wir immer dann, wenn sich in Wahlreaktionsaufgaben zeigt, daß die Reaktionszeiten für die Auswahl zwischen einem gegebenen Satz von Handlungsalternativen (= Reaktionen) davon abhängen, welchen Reizen die Reaktionen zugeordnet sind. Gewöhnlich haben *kompatible*

Reiz-Reaktions-Zuordnungen kurze Reaktionszeiten (z.B. auf einen linken Reiz mit einer linken Reaktion reagieren), während *inkompatible* Reiz-Reaktions-Zuordnungen lange Reaktionszeiten aufweisen (z.B. auf einen linken Reiz mit einer rechten Reaktion reagieren).

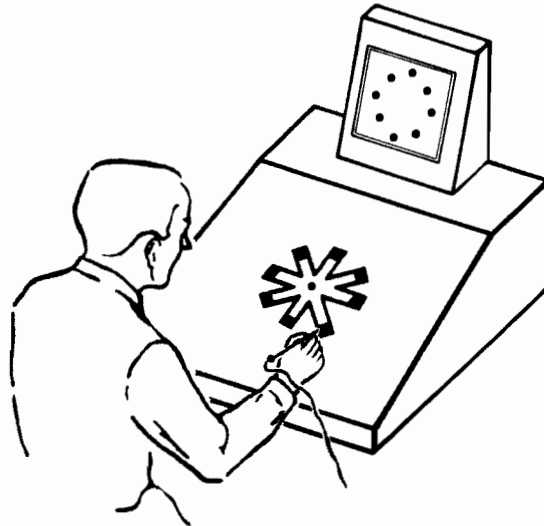
Kompatibilitätseffekte können natürlich nicht nur bei Reaktionen auftreten, die sich in räumlichen Merkmalen unterscheiden. So beschrieb z.B. bereits Donders auch einen akustischen Kompatibilitätseffekt. Er besteht darin, daß das Aussprechen eines von mehreren Vokalen weniger Zeit beansprucht, wenn der entsprechende Laut als akustischer Reiz vorgegeben wird, als dann, wenn der entsprechende Buchstabe als visueller Reiz dargeboten wird (ein neuerer Überblick über verschiedene Kompatibilitätseffekte findet sich bei Kornblum, 1992). Wir wollen uns hier aber ausschließlich auf *räumliche Kompatibilitätseffekte* konzentrieren, d.h. auf solche Aufgaben, in denen die zur Wahl stehenden Reaktionen sich in räumlichen Merkmalen unterscheiden.

Die methodische Logik moderner Kompatibilitätsexperimente ist denkbar einfach – einfacher noch als die etwas umständliche Logik der Dondersschen Pionierexperimente. In den Bedingungen, die Donders miteinander verglich, waren jeweils mehrere Faktoren miteinander konfundiert. So unterschieden sich die Fuß- und die Farbstimulationsaufgabe z.B. nicht nur in der Geläufigkeit der Reiz-Reaktions-Zuordnungen, sondern zugleich auch 1) in der Modalität der Stimulation (elektrisch versus visuell), 2) im Ort der Stimulation (elektrischer Reiz *am Fuß* versus farbiger Reiz *an der Wand*) sowie möglicherweise 3) in der Unterscheidbarkeit der beiden Reize. Unterschiede, die zwischen den beiden Aufgaben auftreten, können daher nicht eindeutig auf einen dieser Faktoren zurückgeführt werden. Mit der Subtraktion der einfachen von den Wahlreaktionszeiten hat Donders zwar versucht, diese Faktoren zum Teil zu eliminieren. Doch bleibt es dabei, daß er im Grunde Äpfel mit Birnen verglich, so daß eindeutige Schlußfolgerungen schwer zu ziehen sind.

Moderne Kompatibilitätsexperimente gehen diesem Problem dadurch aus dem Weg, daß sie Aufgaben verwenden, in denen nicht nur die gleichen Reaktionen, sondern auch die gleichen Reize vorkommen und die sich ausschließlich in den Zuordnungsvorschriften zwischen Reizen und Reaktionen unterscheiden, die in der Instruktion niedergelegt sind. Im folgenden diskutieren wir zwei Aufgaben dieser Art, die in der Literatur besonders intensiv diskutiert worden sind: *Fitts-Aufgaben* und *Simon-Aufgaben*.

Fitts-Aufgaben. Die systematische Untersuchung von Kompatibilitätseffekten wurde in den fünfziger Jahren durch den amerikanischen Psychologen Paul Fitts begründet. Motiviert war diese Forschung keineswegs nur von theoretischer Neugier, sondern auch von praktischen Problemen – Problemen, die z.B. die Optimierung der Gestaltung von Arbeitsplätzen und Kontrollständen in komplexen technischen Systemen wie z.B. Flugzeug-Cockpits oder Kraftwerkzentralen betraf. Eines der Experimente, das Fragen der räumlichen Kompatibilität in den Vordergrund stellt, ist eine Untersuchung von Fitts und Deininger (1954). In diesem Experiment wurde die Ausführung einer bestimmten Wahlreaktionsaufgabe unter unterschiedlichen Reizbedingungen untersucht.

Die Grundstruktur der Aufgabe, die in allen Bedingungen gleich war, ist in Abbildung 9.6 illustriert: Die Versuchsperson saß an einem Tisch und hielt einen Metallstift in der Hand, der auf ein entsprechendes Signal hin so schnell wie möglich in eine bestimmte Richtung bewegt werden mußte. Als Reaktionszeit wurde die Zeit gemessen, die vom Beginn der Darbietung des Reizes bis zu dem Moment verstreicht, in dem der Stift von der Ausgangsposition abhebt.



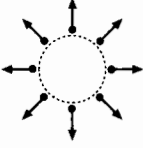
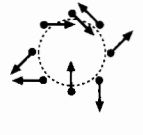
9.6 Illustration der Reaktionsaufgabe in dem Experiment von Fitts und Deininger (1954). Am oberen Ende des schrägen Pultes befindet sich das Reizdisplay. Die Reaktion ist in allen Fällen auf dem achtstrahligen Stern auf der Schrägfläche des Pultes auszuführen. Näheres im Text. (Nach Fitts & Deininger, 1954.)

Die Aufgabe verlangte also die Wahl zwischen acht Reaktionen, die sich in einem räumlichen Merkmal unterscheiden, nämlich der Richtung der auszuführenden Bewegung. Die kritische Manipulation betraf zum einen die Reize, die verwendet wurden, um diese Reaktionen hervorzurufen und zum anderen die Regeln für die Zuordnung von Reaktionen zu Reizen. Abbildung 9.7 illustriert vier Versuchsbedingungen, die sich aus der Kombination von zwei Reizbedingungen und zwei Zuordnungsbedingungen ergaben.

Die Darbietung der Reize konnte in kreisförmiger Anordnung oder symbolisch erfolgen. Bei *kreisförmiger Anordnung* bestand das Reizdisplay aus acht Lampen, die die gleiche räumliche Anordnung aufwiesen wie die acht Zielpositionen der Reaktionsanordnung (vgl. Abbildung 9.6). Bei dieser Reizanordnung konnte die Instruktion eine kompatible oder eine inkompatible Reaktionszuordnung verlangen. In der kompatiblen Aufgabe war das Aufleuchten einer der acht Lampen durch eine Reaktionsbewegung in die entsprechende Richtung zu beantworten. In der inkompatiblen Aufgabe war die Zuordnung zwischen Reizen und Reaktionen zufällig. In der *symbolischen Reizbedingung* wurden die Reaktionen durch digitale Uhrzeitangaben spezifiziert. Hier war die kompatible Zuordnung so gewählt, daß die Bewegung in der Richtung zu erfolgen hatte, die der kleine Zeiger einer Analoguhr bei der entsprechenden Uhrzeit anzeigen würde; für die inkompatible Zuordnung war abermals eine zufällig gewählte, willkürliche Zuordnung zwischen Uhrzeitangaben und Reaktionsrichtungen gültig.

Um Transfereffekte zwischen den Bedingungen zu vermeiden, wurde jede Bedingung mit einer unabhängigen Gruppe von jeweils zehn Versuchspersonen untersucht. Die Ergebnisse, die in Abbildung 9.7 eingetragen sind, geben die mittleren Reaktionszeiten und Fehlerraten der sechs Versuchsgruppen wieder. Der massivste Effekt, den diese Daten zeigen, ist der Kompatibilitätseffekt in der kreisförmigen Reizbedingung:

Reizbedingung

	kreisförmig	symbolisch
kompatible Zuordnung		12.00 ↑ 1.30 ↗ 3.00 → 4.30 ↘ 6.00 ↓ 7.30 ↙ 9.00 ← 10.30 ↖
	RZ: 397 ms FR: 1 %	675 ms 4.8 %
inkompatible Zuordnung		6.00 ↑ 12.00 ↗ 9.00 → 7.30 ↘ 10.30 ↓ 1.30 ↙ 4.30 ← 3.00 ↖
	RZ: 1111 ms FR: 13.7 %	886 ms 8.6 %

9.7 Versuchsbedingungen und Ergebnisse des Experiments von Fitts und Deininger (1954). In der Kreisbedingung geben die schwarzen Punkte die Anordnung der 8 Reize wieder. In der symbolischen Bedingung geben die Ziffern die 8 Reize wieder; sie sind als Uhrzeiten zu lesen. Die Pfeile geben die Richtung der Reaktionen an, mit denen auf die jeweiligen Reize zu reagieren ist. RZ: Reaktionszeit; FR: Fehlerraten. Weitere Erläuterung im Text.

Hier sind die Reaktionen in der kompatiblen Bedingung sehr schnell und praktisch fehlerfrei, in der inkompatiblen Bedingung dagegen außerordentlich langsam und mit vielen Fehlern durchsetzt. Numerisch deutlich geringer ist der Kompatibilitätseffekt dagegen in der symbolischen Reizbedingung; auch hier tritt er in den Reaktionszeiten und in den Fehlern in Erscheinung.

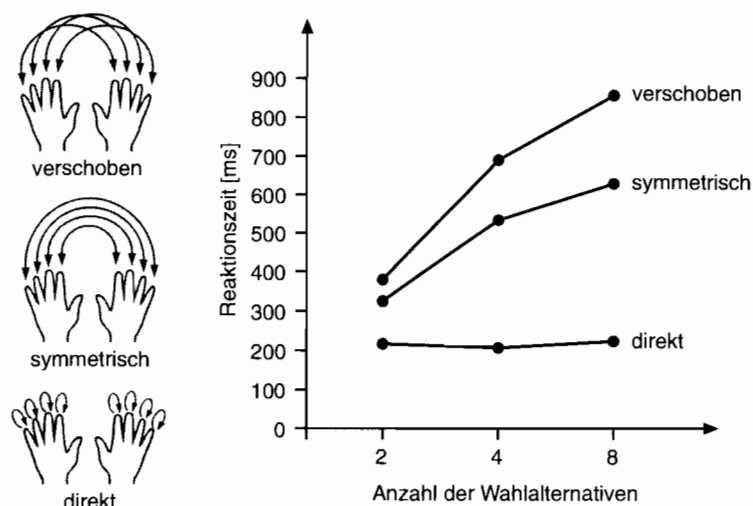
Welche Rückschlüsse lassen diese Ergebnisse auf die Mechanismen zu, die der räumlichen Steuerung der Reaktionen zugrunde liegen? Vergleicht man die kreisförmige und die symbolische Reizbedingung, wird deutlich, daß der räumliche Kompatibilitätseffekt zwei Komponenten hat. Zum einen ist ein deutlicher *Leistungsvorteil* zugunsten der kreisförmigen Anordnung zu verzeichnen: Bei Kreisanordnung sind Reaktionszeiten und Fehler deutlich niedriger als bei symbolischer Stimulation. Dies scheint ein Hinweis darauf zu sein, daß die Spezifikation von räumlichen Reaktionseigenschaften begünstigt und unterstützt wird, wenn die auslösenden Reize bereits selbst entsprechende Eigenschaften aufweisen. Zum anderen ist aber auch ein nicht minder ausgeprägter *Leistungsnachteil* bei inkompatibler räumlicher Zuordnung zu verzeichnen: Reaktionszeiten und Fehler sind hier bei der kreisförmigen Anordnung wesentlich höher als in der entsprechenden symbolischen Reizbedingung. Dies legt die Vermutung nahe, daß die von den Reizpositionen ausgehende räumliche Information auch dann wirksam wird, wenn sie nicht direkt in entsprechende Bewegungsrichtungen umgesetzt werden kann und deshalb bei der Auswahl der Reaktionen ignoriert werden muß. Die von den Reizen ausgehende räumliche Information scheint auf die Auswahl der Reaktionen durchzuschlagen und sich in hohen Reaktionszeiten und Fehlerraten bemerkbar zu machen.

Die Ergebnisse des Experiments lassen sich somit wie folgt zusammenfassen: Wenn die Reizinformation geeignet ist, räumliche Eigenschaften der geforderten Reaktion

direkt zu spezifizieren, tritt ein deutlicher Leistungsvorteil ein, und umgekehrt ist eine deutliche Leistungseinbuße zu beobachten, wenn sie räumliche Eigenschaften aufweist, die geeignet sind, irgendeine andere als die jeweils geforderte Reaktion zu spezifizieren. Ähnliche Effekte, die auf der Korrespondenz zwischen räumlichen Eigenschaften von Reizen und räumlichen Eigenschaften der ihnen zugeordneten Reaktionen beruhen, sind in zahlreichen weiteren Experimenten beschrieben worden (Loveless, 1961; Übersicht bei Welford, 1980). Noch einen Schritt weiter ging ein Experiment von Leonard (1959), in dem Reize und Reaktionen einander in räumlicher Hinsicht nicht nur entsprachen, sondern geradezu identisch waren. Leonards Experiment wurde später von Smith (1977, 1978) in erweiterter und besser kontrollierter Form wiederholt. Der methodische Trick dieser Experimente bestand darin, daß die Stimulation durch Vibrationsreize an den reagierenden Fingern erfolgte. Im kompatiblen Fall hatte der jeweils gereizte Finger zu reagieren, im inkompatiblen Fall irgendein anderer Finger.

In der Replikationsstudie von Smith (1978) wurden drei verschiedene Zuordnungsbedingungen untersucht: direkte Zuordnung (kompatible Zuordnung, bei der der jeweils gereizte Finger zu reagieren hat), symmetrische Zuordnung (bei der der jeweils entsprechende Finger der anderen Hand zu antworten hat) sowie verschobene Zuordnung, bei der die Zeigefinger und kleinen Finger sowie die Ringfinger und Mittelfinger der beiden Hände einander zugeordnet waren (Abbildung 9.8). In allen drei Zuordnungsbedingungen wurde außerdem die Zahl der zur Wahl stehenden Alternativen variiert. So konnten die Vibrationsreize an zwei, an vier oder an acht Fingern auftreten, und dementsprechend war eine von zwei, von vier oder von acht Reaktionen auszuwählen. Die Ergebnisse sind im rechten Teil von Abbildung 9.8 dargestellt.

Wie man sieht, unterscheiden sich die Reaktionszeiten für die direkte Zuordnung, bei der Reiz- und Reaktionsort zusammenfallen, von den Ergebnissen für die beiden indirekten Zuordnungen, bei denen keine derartige Ortsidentität gegeben ist, in zweifa-



9.8 Zuordnungsbedingungen und Ergebnisse des Experiments von Smith (1968, zitiert nach Welford, 1980, Tabelle 3.5, S. 94). Links (von oben nach unten): verschobene, symmetrische und direkte Zuordnung von Reiz- und Reaktionsfinger. Rechts: Reaktionszeit als Funktion der Wahlalternativen.

cher Weise: Erstens sind die Reaktionszeiten im Mittel wesentlich kürzer, und zweitens zeigen sie keinerlei Abhängigkeit von der Anzahl der Wahlalternativen – im Unterschied zu den beiden indirekten Zuordnungsbedingungen, in denen der übliche Anstieg der Reaktionszeit mit der Zahl der Alternativen zu beobachten ist. Danach scheint bei direkter Zuordnung gar keine Wahl zwischen verschiedenen Reaktionsalternativen stattzufinden, sondern eine direkte Aktivierung des jeweils stimulierten Fingers. In den indirekten Zuordnungsbedingungen scheint dagegen „Übersetzung“ von Reizen in Reaktionen zu erfolgen, die mehr Zeit beansprucht und darüber hinaus von der Zahl der Alternativen abhängt.

Als Zwischenbilanz ist festzuhalten, daß es für die Steuerung der Auswahl von Handlungen, die sich in räumlichen Eigenschaften unterscheiden, nicht gleichgültig ist, in welchen Eigenschaften sich die Reize unterscheiden, denen diese Handlungen in der jeweiligen experimentellen Zuordnungsvorschrift zugeordnet sind. Vielmehr scheint eine Art Ähnlichkeitsprinzip am Werk zu sein, das dafür sorgt, daß die Darbietung von Reizen, die bestimmte räumliche Merkmale tragen, solche Reaktionen begünstigen, die die gleichen Merkmale aufweisen und solche Reaktionen beeinträchtigen, die andere räumliche Merkmale zeigen.

Simon-Aufgaben. Was geschieht, wenn Reize und Reaktionen räumliche Merkmale tragen, die Zuordnungsvorschrift aber so angelegt ist, daß die Auswahl der Reaktionen von ganz anderen Eigenschaften der Reize abhängig gemacht wird als ihren räumlichen Merkmalen? Eine Aufgabe mit dieser Grundstruktur wurde in den späten sechziger Jahren von den amerikanischen Psychologen J. Richard Simon in die Literatur eingeführt (Simon & Rudell, 1967).

In einer Simon-Aufgabe stehen zwei Reaktionen zur Wahl, die sich in einem räumlichen Merkmal unterscheiden. In den meisten Experimenten wurden räumlich angeordnete Reaktionstasten verwendet, die z.B. mit der linken versus rechten Hand zu bedienen waren. Im Unterschied zu Fitts-Aufgaben werden die beiden Reaktionen in Simon-Aufgaben jedoch an ein nicht-räumliches Reizmerkmal gebunden – etwa an einen Sinuston, dessen Frequenz (z.B. 200 versus 500 Hz) die Reaktion bestimmt. Die Aufgabe besteht also darin, auf einen niedrigen Ton mit der linken und auf einen hohen Ton mit der rechten Taste zu reagieren.

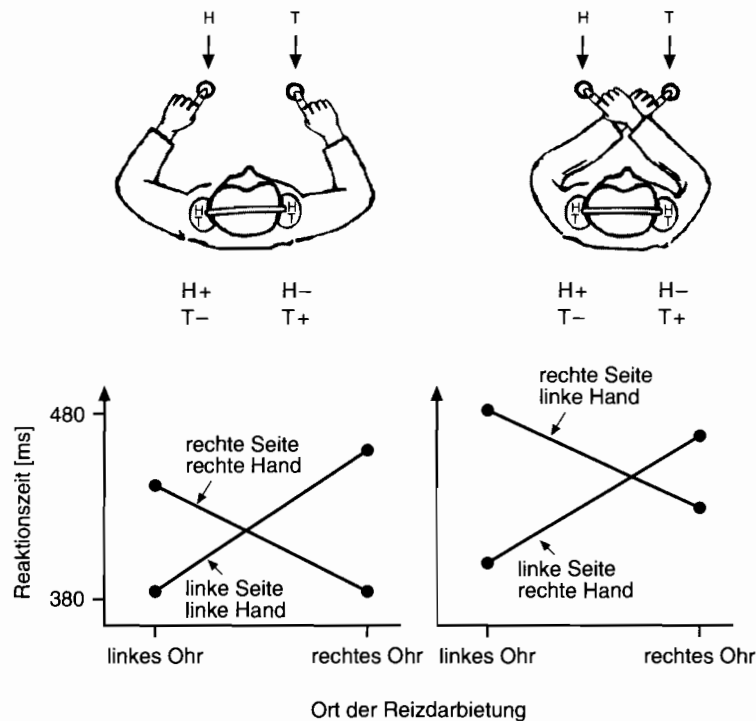
Kennzeichnend für Simon-Aufgaben ist nun, daß die Töne außerdem noch in ihrer räumlichen Position variieren: So werden sie z.B. über einen Kopfhörer auf dem rechten oder dem linken Ohr dargeboten. Dabei ist die *Identität des Reizes* (hoch versus tief) reaktionsrelevant, die *Position des Reizes* dagegen vollständig irrelevant. Mit anderen Worten: Die Auswahl der Reaktion hat sich nur nach der Reizidentität (Tonhöhe) zu richten und sich nicht darum zu kümmern, ob der betreffende Ton links oder rechts dargeboten wird. Der entscheidende Unterschied zwischen Fitts-Aufgaben und Simon-Aufgaben besteht also darin, daß die räumlichen Merkmale der Reize dort reaktionsrelevant sind, hier dagegen nicht.

Die linke Hälfte von Abbildung 9.9 zeigt ein typisches Simon-Experiment und sein charakteristisches Ergebnis (Simon, Hinrichs & Craft, 1970). In diesem Experiment wurden hohe (H) oder tiefe (T) Töne dargeboten, und in der hier illustrierten Teilbedingung verlangte die Zuordnungsvorschrift auf hohe Töne mit dem Zeigefinger der linken Hand und auf tiefe Töne mit dem Zeigefinger der rechten Hand zu reagieren. Die Töne wurden monaural dargeboten, d.h. immer nur auf jeweils einer Seite eines Kopfhörers. Daraus ergibt sich, daß bei Darbietung eines hohen Tones auf der linken und eines tiefen Tones auf der rechten Seite Kompatibilität besteht zwischen dem

irrelevanten räumlichen Reizmerkmal und dem räumlichen Merkmal der geforderten Reaktion (H+ bzw. T+), während die Verhältnisse inkompatibel sind, wenn ein tiefer Ton links oder ein hoher Ton rechts geboten wird (T- bzw. H-).

Wie die Ergebnisse zeigen, wird die Reaktionszeit von der Kompatibilität mit dem irrelevanten Reizmerkmal sehr stark beeinflusst: Für beide Hände gilt, daß die Reaktion, die sie ausführen, dann, wenn der ihnen zugeordnete Reiz auf der gleichen Seite dargeboten wird, sehr viel schneller ist als dann, wenn er auf der gegenüberliegenden Seite dargeboten wird. Die Reaktionszeitdifferenz, die von der irrelevanten Reizposition ausgeht, ist beträchtlich: Sie beträgt für beide Hände ungefähr 60 ms. Das Experiment zeigt also, daß räumliche Eigenschaften von Reizen auf die Steuerung räumlicher Eigenschaften von Reaktionen selbst dann durchschlagen, wenn die Instruktion ihnen überhaupt keine reaktionsrelevante Rolle zuschreibt.

Bisher haben wir uns damit begnügt, von der Steuerung räumlicher Merkmale von Reaktionen zu sprechen, ohne genau zu sagen, was damit gemeint ist. An der Simon-Aufgabe läßt sich veranschaulichen, daß die verführende Wirkung, die die Reizposition auf die Auswahl der Reaktion ausübt, auf verschiedenen Ebenen wirksam sein kann. Zum einen kann der Effekt in der *anatomischen Korrespondenz* von Reiz und



9.9 Simon-Effekt bei ungekreuzten und gekreuzten Armen (Simon, Hinrichs & Craft, 1970, Experiment 1). Links: normaler Simon-Effekt. Über den linken oder rechten Kopfhörer wird ein hoher oder tiefer Ton dargeboten (H bzw. T); die Tonhöhe legt fest, welche von zwei Tasten zu betätigen ist (im Beispiel: wenn H, dann links; wenn T, dann rechts). Unter diesen Bedingungen entsteht der normale Simon-Effekt (Begünstigung bei Korrespondenz zwischen Reizseite und Reaktionsseite: H+/T+ im Vergleich zu T-/H-). Rechts: Simon-Effekt bei überkreuzten Armen. Der Effekt bleibt unverändert, obwohl die Hände vertauscht sind.

Reaktion begründet sein. Reaktionen sind schnell, wenn der Reiz, der sie auslöst, auf der gleichen Körperseite dargeboten wird wie die Hand, die sie auszuführen hat, und sie sind langsam, wenn Reiz- und Reaktionsseite verschieden sind. Die anatomische Korrespondenz bezieht sich nicht nur auf die Körperanatomie, sondern zugleich auch auf die Hirnanatomie: Reize, die im linken Ohr dargeboten werden, erfahren ihre sensorische Primärprojektion in der rechten Hirnhemisphäre – derjenigen Hemisphäre, die auch die führende Rolle bei der Steuerung der linken Hand spielt – und Entsprechendes gilt für die rechte Körperseite und ihrer Vertretung in der linken Hirnhemisphäre. Denkbar ist danach, daß der Simon-Effekt nichts weiter als die anatomischen Verschaltungsverhältnisse im auditorischen und motorischen Cortex widerspiegelt.

Zum anderen könnte die Grundlage des Effekts aber auch in der *räumlichen Korrespondenz* von Reizorten und Reaktionsorten liegen. In den kompatiblen Durchgängen ist ein Reiz auf der linken Seite mit einer Reaktion auf der linken Seite zu beantworten, in inkompatiblen Durchgängen erscheint dagegen links ein Reiz, der rechts zu beantworten ist. Prinzipiell ist diese räumliche Korrespondenz von den anatomischen Verhältnissen völlig unabhängig, und sie könnte ebenso gut für den Effekt verantwortlich sein. Allerdings sind diese beiden Faktoren im normalen Simon-Versuch untrennbar konfundiert, denn es ist immer die (anatomisch) rechte bzw. linke Hand, die Reaktionen auf der (räumlich) rechten bzw. linken Seite ausführt. Kritisch muß dagegen sein, was geschieht, wenn die Aufgabe mit überkreuzten Armen zu bearbeiten ist. Dann sollte sich entscheiden, was zählt: die neuroanatomischen oder die räumlichen Verhältnisse.

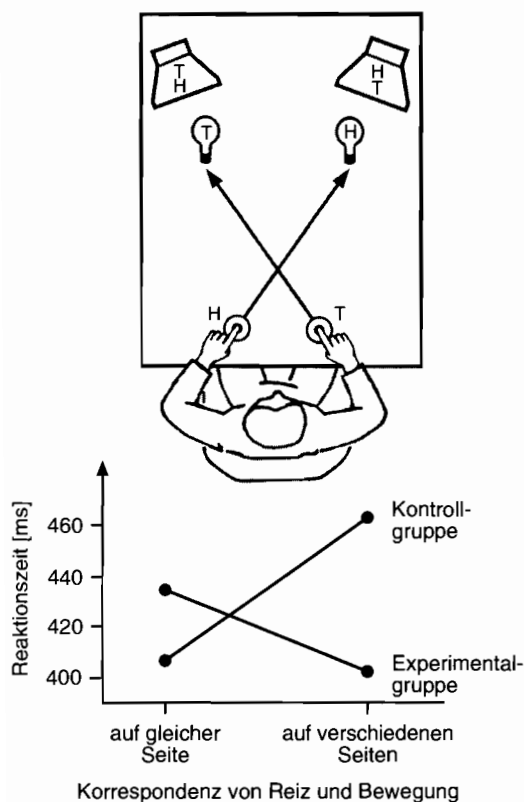
Das Ergebnis, das dem gleichen Experiment von Simon, Hinrichs und Craft (1970) entnommen ist, läßt an Eindeutigkeit nichts zu wünschen übrig (vgl. Abbildung 9.9): Wird der Reiz auf dem linken Ohr dargeboten, sind Reaktionen auf der linken Seite wesentlich schneller als auf der rechten Seite; wird der Reiz auf dem rechten Ohr dargeboten, gilt das Umgekehrte. Das Muster ist also das gleiche, wie im Ausgangsexperiment, *obwohl* sämtliche Reaktionen mit der anatomisch gegenseitigen Hand ausgeführt wurden. Zwar sind die Reaktionszeiten bei gekreuzten Händen durchweg etwas höher als bei ungekreuzten Händen, aber das Ergebnismuster und die Größenordnung des Simon-Effekts werden durch die Kreuzung der Hände nicht tangiert. Es sind also die räumlichen Korrespondenzbeziehungen zwischen Reizen und Reaktionen, die zählen, und nicht die anatomischen Verschaltungsverhältnisse.

Der Simon-Effekt beruht danach auf der räumlichen Korrespondenz zwischen dem Ort der Reizung und dem Ort der Handlung. Was aber definiert den Ort der Handlung? Bei einem einfachen Tastendruck mag das klar sein, aber bereits bei einer nur geringfügig komplizierteren Handlung wie z.B. dem Einschalten einer Lampe durch Betätigung eines Schalters ist die Antwort nicht ganz so klar. Viele Handlungen, die wir ausführen, haben (mindestens) zwei Komponenten, die räumlich getrennt sein können: Die *Bewegung*, die ausgeführt wird und der *Effekt*, der dadurch bewirkt wird. Die Bewegung, die den Schalter betätigt, findet dort statt, wo der Schalter montiert ist. Der Effekt kann aber an einer ganz anderen Stelle eintreten. Auf den ersten Blick scheint es allerdings, als gäbe es keinen vernünftigen Weg, diese Unterscheidung auf die bisher besprochenen Aufgaben anzuwenden, denn in ihnen fallen Bewegung und Effekt vollkommen zusammen: Die Bewegung besteht darin, daß eine Taste *betätigt wird*, und der dadurch bewirkte Effekt besteht darin, daß die Taste schließlich *betätigt ist*. Beides – das Betätigtwerden und das Betätigtsein – findet natürlich im gleichen Ort statt.

Was aber geschieht, wenn man Bewegung und Effekt räumlich trennt – z.B. derart, daß eine Bewegung auf der rechten Seite stets einen Effekt auf der linken Seite erzeugt

und vice versa? Bezieht sich die Korrespondenz zwischen Reiz- und Reaktionsort dann auf den Ort der Bewegung (*räumliche Korrespondenz*) oder auf den Ort des Effekts, der durch die Bewegung bewirkt werden soll (*intentionale Korrespondenz*)? Dieser Frage ist ein Experiment von Hommel (1993) nachgegangen. Hier waren nicht die Arme der Versuchsperson gekreuzt, sondern die Verbindungen zwischen Reaktionen und ihren Effekten. Als Reize dienten wieder hohe und tiefe Töne, die diesmal über links und rechts montierte Lautsprecher dargeboten wurden. Tonhöhe war die relevante Reizdimension, d. h. sie bestimmte die Reaktion. Die Position der Tondarbietung (links versus rechts) war das irrelevante räumliche Merkmal. Die Skizze in Abbildung 9.10 veranschaulicht eine Unterbedingung, in der hohe Töne mit der linken und tiefe Töne mit der rechten Taste zu beantworten waren. Die Besonderheit der Versuchsanordnung bestand darin, daß das Betätigen einer Taste dazu führte, daß auf der Gegenseite eine Lampe aufleuchtete. Das Aufleuchten der Lampe sollte als wahrnehmbarer Handlungseffekt fungieren. Die Überkreuzverbindung zwischen Tasten und Lampen sollte für die räumliche Dissoziation von Positionen der Handlungen (Tasten) und Positionen der Handlungseffekte (Lampen) sorgen.

Das Experiment wurde mit zwei Versuchspersonengruppen durchgeführt, die unterschiedliche Instruktionen erhielten. In der Kontrollgruppe wurden die Versuchspersonen (Vpn) instruiert, so schnell wie möglich die durch den Ton angezeigte Taste zu betätigen. Die Lampen spielten in dieser Instruktion keine Rolle und wurden nur beiläufig erwähnt. In der Experimentalgruppe verlangte die Instruktion dagegen, bei



9.10 Skizze zur Illustration des Simon-Effekts in dem Experiment von Hommel (1990, 1993). Oberer Teil: Jede Handlung, die die Vp ausführt, hat eine rechte und eine linke Komponente. Wenn sie die rechte Taste betätigt, ist die Bewegungskomponente der Handlung auf der rechten Seite angesiedelt, die Effektkomponente dagegen auf der linken Seite. Die beiden Versuchsgruppen unterscheiden sich darin, daß die Instruktion in der Kontrollgruppe die Bewegungskomponente betont, in der Experimentalgruppe dagegen die Effektkomponente. Unterer Teil: Reaktionszeiten für die beiden Versuchsgruppen in Abhängigkeit von der räumlichen Korrespondenz zwischen Reizseite und Bewegungsseite (Reiz und Bewegung auf gleicher Seite versus auf verschiedenen Seiten).

Darbietung eines Tons so schnell wie möglich die entsprechende Lampe anzuschalten – diesmal unter nur beiläufiger Erwähnung von Händen und Tasten.

Abbildung 9.10 zeigt das Ergebnis für die beiden Gruppen in komprimierter Form. Für die Kontrollgruppe ist ein gewöhnlicher Simon-Effekt zu erwarten: Bei Korrespondenz zwischen Reiz- und Reaktionsseite sind kürzere Reaktionszeiten zu erwarten als bei Nichtkorrespondenz. Dies war in der Tat der Fall; es wurde ein normaler Simon-Effekt beobachtet. In der experimentellen Gruppe sollte sich jedoch entscheiden, ob auch hier nach wie vor die Korrespondenz zwischen Reiz- und Reaktionsort zählt – oder ob es jetzt die Korrespondenz zwischen dem Ort des Reizes und dem Ort des Handlungseffekts ist, die die Reaktion begünstigt. Die Ergebnisse zeigen, daß dies tatsächlich der Fall war. In der experimentellen Gruppe ist nicht mehr der Ort der *Bewegung* für die resultierenden Kompatibilitätsverhältnisse ausschlaggebend, sondern der Ort des durch die Bewegung erzeugten *Effekts*. So ist z.B. unter dieser Instruktion die rechte Hand, die in dem in Abbildung 9.10 skizzierten Beispiel auf tiefe Töne antwortet, bei Darbietung des Tons im linken Lautsprecher schneller als bei Darbietung im rechten Lautsprecher. Mit anderen Worten: Reaktionen sind schnell, wenn räumliche Eigenschaften der Reize mit räumlichen Eigenschaften der Handlungseffekte korrespondieren (obgleich die betreffenden Bewegungen jeweils auf der nichtkorrespondierenden Seite auszuführen sind), und Reaktionen sind langsam, wenn keine derartige Korrespondenz zwischen Reizen und Effekten besteht (obgleich die Bewegungen in diesem Fall auf der Reizseite auszuführen sind).

Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen der Untersuchung von Simon-Aufgaben somit zwei Schlußfolgerungen ableiten, die für die Beantwortung der Ausgangsfrage dieses Abschnitts von Bedeutung sind. Die allgemeine Schlußfolgerung ist die, daß räumliche Eigenschaften von Reizen in Wahlreaktionsaufgaben auch dann in die Steuerung der räumlichen Aspekte von Reaktionen eingreifen, wenn sie aufgabenirrelevant sind. Die zweite, spezifischere Schlußfolgerung grenzt die Steuerungsebene ein, auf der diese Effekte zustandekommen. Wir sahen, daß die Ausführung von Handlungen dann erleichtert ist, wenn räumliche Reizmerkmale räumliche Merkmale der intendierten Handlungseffekte vorwegnehmen. Dieser Zusammenhang weist darauf hin, daß die zugrundeliegenden Steuerungsprozesse nicht auf der Ebene elementarer sensomotorischer Interaktionsprozesse angesiedelt sein können. Sie müssen sich vielmehr in einem höheren, kognitiven Repräsentationsmedium abspielen, in dem Handlungen nicht nur durch räumliche und zeitliche Eigenschaften von Körperbewegungen repräsentiert sind, sondern ebenso durch Eigenschaften der Effekte und Ziele, die durch diese Bewegungen bewirkt bzw. angestrebt werden.

9.3.2 Gemeinsame Repräsentationen

Wenn man nach einem theoretischen Rahmen zur Erklärung von Kompatibilitätseffekten sucht, kann man zwei Perspektiven einnehmen. Die eine geht vom Reiz aus und fragt, wie es möglich ist, daß bestimmte Reize bevorzugt bestimmte Reaktionen hervorrufen. Die andere geht von der Reaktion aus und fragt, wie es möglich ist, daß eine gegebene Reaktion durch bestimmte Reize leichter als durch andere hervorgerufen werden kann. Antworten auf diese Fragen lassen sich nur schwer finden, wenn man von den traditionellen theoretischen Rahmenvorstellungen ausgeht, die die Psychologie für die Erklärung des Funktionszusammenhangs zwischen Wahrnehmung und Handlungssteuerung bereithält. Diese Vorstellungen sind seit jeher von der Idee getra-

gen, daß zwischen den afferenten Prozessen, die der Wahrnehmung zugrunde liegen, und den efferenten Prozessen, auf denen Handlungen beruhen, eine scharfe Grenze gezogen werden muß, und sie nehmen dementsprechend an, daß die Endglieder von Wahrnehmungsprozessen und die Anfangsglieder von Prozessen der Handlungssteuerung getrennt repräsentiert sind. Die Vermittlungsvorgänge, in denen Wahrnehmung und Handlungssteuerung sich gegenseitig berühren, werden im Rahmen dieser Konzeption dann als Prozesse der Zuordnung oder Übersetzung interpretiert: Die Endprodukte der Wahrnehmung werden in die Anfangsprodukte der Handlungssteuerung „übersetzt“. Diese Übersetzung ändert aber nichts an der getrennten Repräsentation von Wahrnehmung und Handlung, im Gegenteil: Ein besonderer Übersetzungsprozeß ist notwendig, *weil* die Endglieder der Wahrnehmung und die Anfangsglieder der Handlungssteuerung getrennt repräsentiert sind.

Die räumlichen Kompatibilitätseffekte (und auch einige ähnliche Effekte im zeitlichen Bereich, auf die wir im kommenden Abschnitt eingehen) legen demgegenüber eine andere Konzeptualisierung der Beziehungen zwischen Wahrnehmung und Handlung nahe, die auf der Idee einer gemeinsamen Repräsentation der Endglieder des einen und der Anfangsglieder des anderen Prozeßzusammenhangs beruht. Der entscheidende Grund für diese theoretische Umorientierung ergibt sich aus dem Nachweis der Wirksamkeit eines Ähnlichkeitsprinzips zwischen Wahrnehmung und Handlung. Die räumlichen Kompatibilitätseffekte führen diesen Nachweis im räumlichen Bereich; in den im folgenden zu besprechenden Synchronisationsaufgaben zeigt sich das gleiche im zeitlichen Bereich.

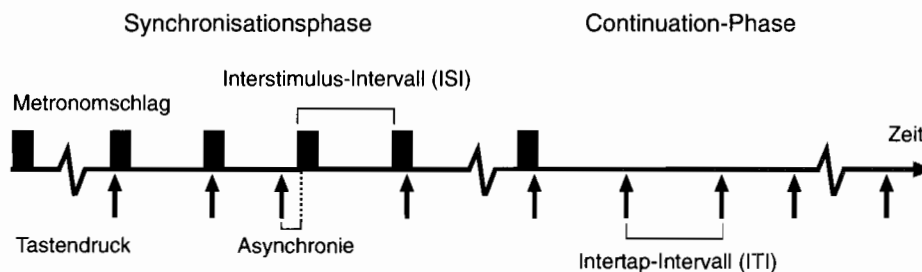
Die Idee der gemeinsamen Repräsentation geht von der Annahme aus, daß im kognitiven System ein Repräsentationsmedium existiert, in dem die Endprodukte von Wahrnehmungsprozessen und die Anfangsglieder von Prozessen der Handlungssteuerung in vergleichbarer Form vertreten sind (*Common-Coding-Hypothese*, vgl. Prinz, 1990; Prinz, Aschersleben, Hommel & Vogt, 1995). In diesem Rahmen läßt sich die Wirksamkeit von Ähnlichkeit zwanglos erklären: Die Darbietung von Reizen aktiviert bestimmte Strukturen in diesem Medium – Strukturen, die zugleich entsprechende Eigenschaften von Reaktionen repräsentieren. Zur Erklärung dieser ähnlichkeitsbedingten Vermittlung ist es nicht erforderlich, daß die Reize reaktionsrelevant sind; ebensowenig bedarf es irgendwelcher besonderer Übersetzungsprozesse. Wenn Reize mit bestimmten (räumlichen) Eigenschaften dargeboten und verarbeitet werden, führt dies zu einer automatischen Aktivierung von Reaktionen mit entsprechenden Eigenschaften.

Wir vermuten, daß diese Induktionsprozesse nicht auf der Ebene elementarer sensorischer Mechanismen stattfinden, sondern auf einer kognitiven Repräsentationsebene, auf der Handlungen nicht nur als raum-zeitliche Muster von Körperbewegungen repräsentiert sind, sondern als komplexe Ereigniszusammenhänge, die die Ziele und die Effekte dieser Bewegungsmuster einschließen.

9.4 Zeitliche Steuerung von Handlungen

Die Fragen der zeitlichen Steuerung betreffen das *Wann?* von Handlungen und Handlungselementen. Dazu rechnen einerseits Fragen des internen Timings, d.h. der zeitlichen Abfolge und Anordnung von Handlungen und Handlungselementen untereinander, zum anderen aber auch Fragen des externen Timings, d.h. der Synchronisation von Handlungen mit externen, handlungsunabhängigen Ereignissen.

Um die Kontrollmechanismen zu untersuchen, die der zeitlichen Steuerung von Handlungen zugrunde liegen, bieten sich zunächst einfache, sequentielle Aufgaben wie z. B. das Tapping an. Beim Tapping sollen die Vpn zumeist mit einem Zeigefinger gleichmäßig oder in einem bestimmten vorgegebenen Rhythmus auf eine Taste drücken. Dabei wird der Takt häufig durch ein Metronom vorgegeben, und die Aufgabe der Vpn ist es, ihre Tastendrücke mit den Schlägen des Metronoms zu synchronisieren. Eine solche Synchronisationsaufgabe wurde bereits 1886 von Stevens verwendet und ist schematisch in Abbildung 9.11 dargestellt. Die Vpn hören eine Sequenz von Metronomschlägen oder kurzen Tönen (Klicks) und sollen diese mit einer Sequenz von synchronen Tastendrücken (Taps) begleiten. Nach dieser Synchronisationsphase, die bei Stevens (1886) ebenso wie in vielen späteren Untersuchungen nur dazu dient, eine Sequenz von motorischen Handlungen zu etablieren, wird die zeitliche Steuerung der Tapsequenz in Abwesenheit der Metronomschläge untersucht, d. h. das Metronom wird gestoppt und die Vp soll fortfahren, die gleichen Intervalle wie in der Synchronisationsphase zu produzieren (Continuation-Phase). Gemessen werden dabei vor allem die Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Tastendrücken (Intertap-Intervalle) und/oder – in der Synchronisations-Phase – die Abweichung des Tastendrucks vom Zeitpunkt, zu dem das Signal präsentiert wird (Asynchronie).



9.11 Sequenz in einer typischen Synchronisationsaufgabe mit anschließender Continuation-Phase.

Mit Hilfe dieser Aufgabe lassen sich unter anderem folgende zwei Fragen untersuchen: 1) Wie *regelmäßig* ist die zeitliche Steuerung von Handlungen? 2) Wie *präzise* erfolgt sie? Zur Beantwortung der zweiten Frage – der wir uns im folgenden zunächst zuwenden wollen – werden die zeitlichen Verhältnisse zwischen Signal und Tastendruck analysiert, während zur Untersuchung der ersten Frage vor allem die Variabilität der Intertap-Intervalle betrachtet wird. Im dritten und letzten Teil dieses Kapitels werden wir uns dann der Frage zuwenden, wie die zeitliche Steuerung von Handlungen erfolgt, wenn der zu produzierende Takt ein nicht-isochroner Rhythmus ist.

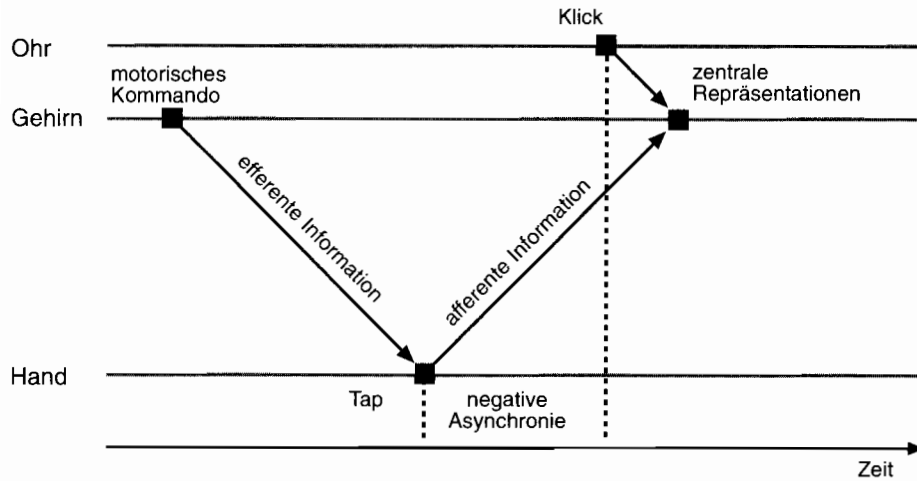
Wie präzise erfolgt die zeitliche Steuerung von Handlungen? Einer der ersten, der sich mit der Frage der zeitlichen Präzision von Handlungen in Tapping-Aufgaben auseinandergesetzt hat, war Dunlap (1910). Seine wichtigste Beobachtung dabei war, daß die Vpn in der Synchronisationsphase die Taste im Schnitt um etwa 30 ms zu früh betätigten. Dieser Effekt wurde in vielen nachfolgenden Untersuchungen immer wieder beobachtet und wird als *Synchronisationsfehler* oder *negative Asynchronie* bezeichnet.

Daß dieser Synchronisationsfehler kein Meßartefakt, sondern anscheinend notwendig ist, um bei den Vpn subjektiv den Eindruck zu erzeugen, synchron zu sein, belegen Experimente mit sogenannten Pseudo-Synchronisationsbedingungen, die von Fraise und Voillaume (1971) und Vos, Helsen und van Krysbergen (1992) durchgeführt wurden. In diesen Experimenten wurde zunächst die übliche Synchronisationsbedingung mit einem akustischen Führungssignal hergestellt. Das Führungssignal wurde jedoch nach ca. 20 Takten abgeschaltet und durch eine akustische Rückmeldung ersetzt, die vom Tastendruck der Vp ausgelöst und ohne Verzögerung präsentiert wurde. Da nun der Tastendruck und das vermeintliche Führungssignal (in Wahrheit die durch die Vp produzierte akustische Rückmeldung) exakt gleichzeitig passierten, wurde also künstlich eine Situation exakter Synchronizität zwischen Klick und Tap hergestellt. Diejenigen Vpn, die über diese Manipulation nicht informiert waren, beschleunigten ihre Taps zunehmend, d.h. sie bemühten sich, die negative Asynchronie zwischen Tap und Klick wieder herzustellen, da sie die tatsächlich vorhandene Synchronizität wohl nicht als solche empfanden. Trainiert man dagegen Vpn, exakte Synchronizität zwischen Klick und Tap herzustellen, indem man ihnen Rückmeldung über ihre Leistung gibt (*knowledge of results*, KR), dann berichten die Vpn, daß sie subjektiv *zu spät* auf die Taste drücken müssen, um die gewünschte, objektive Synchronizität herstellen zu können (Aschersleben, 1996).

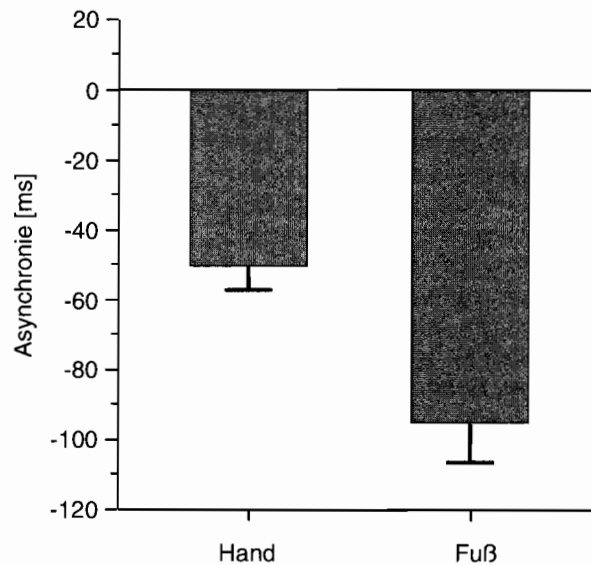
Während Dunlap (1910) noch keine Erklärung für das zu frühe Tappen seiner Vpn lieferte, formulierte Paillard (1949) die Idee, daß möglicherweise Unterschiede in den Nervenleitungszeiten die Ursache für die negative Asynchronie sein könnten. Diese Idee wurde von Fraise (1980) wieder aufgegriffen und von uns zu einer überprüfaren Hypothese ausformuliert (Prinz, 1992; Aschersleben, 1994). Diese Hypothese nimmt an, daß unser kognitives System Synchronizität nicht auf externer Ebene (in der Klick und Tap stattfinden und *beobachtbar* sind), sondern auf zentraler Ebene herstellt (also im Gehirn, wo Klick und Tap *repräsentiert* sind). Genauer gesagt wird angenommen, daß die zentralen Repräsentationen von Klick und Tap synchronisiert werden. Wenn dies so ist, dann können aufgrund der unterschiedlichen Zeiten, die benötigt werden, um die jeweiligen zentralen Repräsentationen zu errichten, die externen Ereignisse selbst nicht synchron erfolgen. Die Zeit, die verstreicht, um vom Klick am Ohr eine Repräsentation auf zentraler Ebene aufzubauen, ist aufgrund der beteiligten zentralen und peripheren Nervenleitungs- und Verarbeitungszeiten sehr viel kürzer als die Zeit, die verstreicht, um vom Tap (bzw. seiner taktilen und kinästhetischen Rückmeldung) eine zentrale Repräsentation aufzubauen. Schon alleine aus rein anatomischen Gründen ist die Zeitstrecke zwischen Hand und Gehirn größer als zwischen Ohr und Gehirn. Um trotzdem Synchronizität auf zentraler Ebene herstellen zu können, muß der Tap dem Klick vorausgehen (vgl. Abbildung 9.12). Diese Hypothese betont damit die Bedeutung *afferenter* Informationen zur zeitlichen Steuerung von Handlungen.

Wie läßt sich nun eine derartige Hypothese testen? Eine einfache Möglichkeit besteht in der Variation des Intervalls zwischen dem Tap und seiner zentralen Repräsentation. Je länger dieses Intervall ist, desto mehr muß der Tap dem Klick vorausgehen, desto größer sollte also die Asynchronie werden. Eine einfache Möglichkeit, dies zu prüfen, ist folgende: Man bittet die Vpn, nicht mit der Hand, sondern mit dem Fuß, genauer, mit dem großen Zeh zu tappen. Dabei zeigt sich tatsächlich die erwartete Vergrößerung der Asynchronie in der Fußbedingung im Vergleich zur Handbedingung (95 ms versus 50 ms; Aschersleben, 1994; vgl. Abbildung 9.13).

Evidenz dafür, daß diese beobachtete Asynchronie-Differenz von 45 ms zwischen Hand und Fuß tatsächlich auf Unterschiede in peripheren und zentralen Verarbeitungs-



9.12 Illustration einer Hypothese zur Erklärung der negativen Asynchronie in Synchronisationsaufgaben (nach Prinz, 1992).



9.13 Mittlere Asynchronie in Abhängigkeit vom Effektor, der die Synchronisationsbewegung ausführt (nach Aschersleben, 1994).

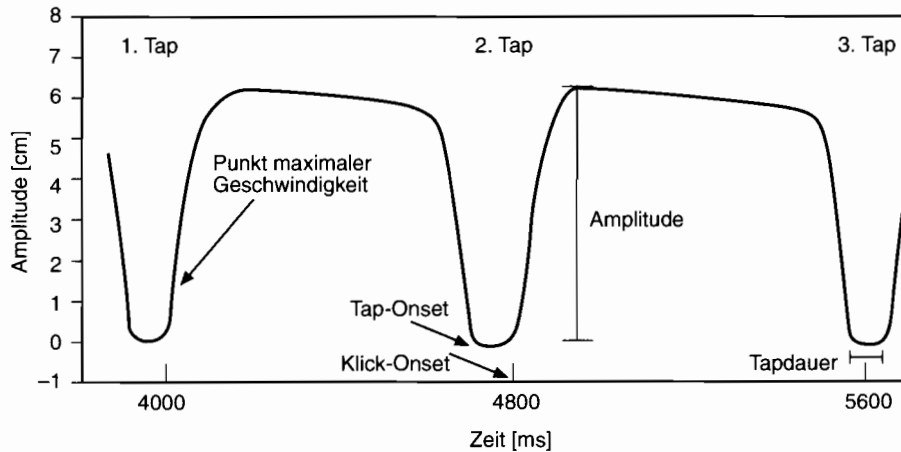
prozessen beruhen könnte, liefern Daten aus EEG-Messungen. Shibasaki, Barrett, Halliday und Halliday (1981) erhoben evozierte Potentiale, während die Vpn mit der Hand oder dem Fuß tappten. Die sogenannte *post-motion frontal negativity*, die als Indikator für kinästhetisches Feedback interpretiert wird, zeigt eine Latenz von 50 ms für die Fuß- im Vergleich zur Handbedingung. Yamaguchi und Knight (1991, 1992)

verglichen die Latenz der P3-Komponente im EEG nach taktiler Stimulation des Fußes mit derjenigen nach Stimulation der Hand. Sie beobachteten ebenfalls eine Latenzdifferenz von 50 ms, die sie sowohl auf Unterschiede in der peripheren Übertragung als auch auf corticale Prozesse zurückführen.

Daß für die zeitliche Steuerung beim Synchronisieren die afferenten und nicht die efferenten Informationen wichtig sind, zeigt sich auch in Experimenten von Bard et al. (1991, 1992), in denen Vpn Hand- und Fußtapping (hier ohne externes Führungssignal) synchronisieren sollten. Auch unter dieser Bedingung findet sich erwartungsgemäß, daß der Fuß die Bewegung vor der Hand ausführt. Die interessanten Daten in diesen Untersuchungen sind aber im vorliegenden Zusammenhang diejenigen einer deafferentierten Patientin, einer Patientin also, die aufgrund einer Krankheit keine intakten afferenten Nervenfasern mehr besitzt, während ihre efferenten Fasern aber unbeeinträchtigt sind. Diese Patientin verhält sich in einfachen Reaktionszeitexperimenten (in denen vor allem die efferenten Nervenfasern eine wichtige Rolle spielen) genauso wie gesunde Vpn; in der kritischen Bedingung – der Synchronisationsaufgabe – unterscheidet sich ihr Verhalten aber vollkommen von dem der gesunden Vpn: Sie zeigt die gleichen Daten wie in der Reaktionsbedingung und nicht die übliche Vorverlagerung der Fußbewegung vor der Handbewegung. Bard et al. (1991, 1992) interpretieren diesen Befund als Beleg für die Bedeutung afferenter Informationen beim Synchronisieren.

Eine andere Möglichkeit, das Intervall zwischen dem Tap und seiner zentralen Repräsentation zu manipulieren und damit die oben beschriebene Hypothese zu testen, besteht in der Präsentation zusätzlicher Feedback-Information: Den Vpn wird immer dann, wenn sie die Taste berühren, eine zusätzliche akustische Rückmeldung geben. Wenn das System alle Informationen, die ihm über den Tap zentral zur Verfügung stehen (die frühe akustische und die späte taktil/kinästhetische Rückmeldung) zur Steuerung der Handlung verwendet, so sollte man eine Verringerung der Asynchronie unter Bedingungen mit zusätzlicher akustischer Rückmeldung erwarten, aber kein Verschwinden der Asynchronie. Genau dies ist in entsprechenden Experimenten zu beobachten (Aschersleben & Prinz, 1995; Mates, Radil & Pöppel, 1992).

In allen bisher dargestellten Untersuchungen wurde als abhängige Variable die Tastenberührung verwendet, genauer gesagt, die zeitliche Differenz zwischen dem Tap-Onset (also dem Beginn der Tastenberührung) und dem Klick-Onset (Überblick bei Aschersleben, 1994). Sieht man sich dagegen die gesamte Tapbewegung an (vgl. Abbildung 9.14), wird deutlich, daß bei einer ausschließlichen Analyse des Tap-Onsets viele und möglicherweise sehr relevante Informationen verloren gehen. So läßt sich die Fingerbewegung unter anderem auch nach dem Punkt maximaler Geschwindigkeit, der Amplitude oder nach der Tapdauer auswerten. Gehrke (1994) hat in neueren Experimenten beispielsweise zeigen können, daß die Größe der Asynchronie auch von der Amplitude der Fingerbewegung, also der maximalen Auslenkung des Fingers vor dem Tastendruck abhängt. Dies wird von Gehrke (1994) damit erklärt, daß Tapbewegungen mit einer größeren Amplitude auch mit einer höheren Geschwindigkeit ausgeführt werden. Durch die höhere Geschwindigkeit entsteht eine größere Kraft beim Aufprall des Fingers auf die Taste (die taktile Reizung ist intensiver), wodurch eine größere Anzahl an Sinneszellen in einem stärkeren Maße gereizt werden als beim Tapping mit kleiner Amplitude. Die intensivere Stimulation führt zu einer schnelleren Verfügbarkeit des Taps auf zentraler Ebene. Eine kürzere zeitliche Distanz zwischen Tap und seiner zentralen Repräsentation sollte laut oben dargestellter Hypothese zu einer Verringerung der Asynchronie führen. Genau diesen Zusammenhang beobachtet



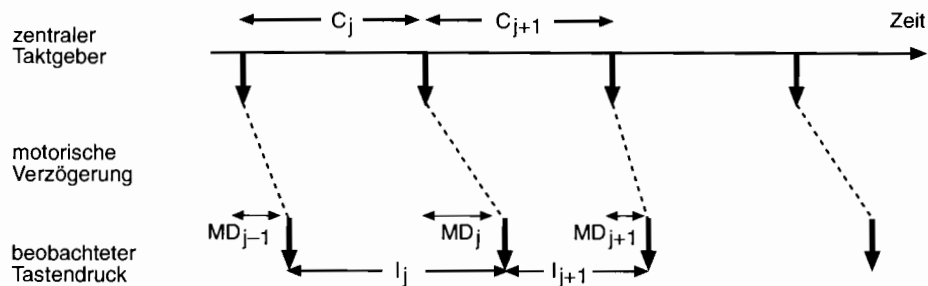
9.14 Typische Tapbewegung (gemessen an der Fingerspitze). Beispiel von drei Taps innerhalb einer längeren Sequenz.

Gehrke (1994): Große Amplituden gehen mit geringeren Asynchronien einher als kleine Amplituden.

Wie regelmäßig erfolgt die zeitliche Steuerung von Handlungen? Die zweite Frage, die wir zu Beginn dieses Kapitels gestellt haben, betrifft die *Regelmäßigkeit* der zeitlichen Steuerung von Handlungen. Die in der Synchronisations- oder Continuation-Phase produzierten Intertap-Intervalle (ITI) weisen immer eine gewisse Variabilität auf. Die Größe dieser Variabilität wird im allgemeinen als Maß für die Regularität des produzierten Verhaltens herangezogen (Überblick z.B. bei Keele, 1986 und Vorberg & Wing, 1994).

Michon (1967) präsentierte z.B. längere Sequenzen von Klicks mit verschiedenen Interstimulus-Intervallen (ISI), zu denen die Vpn synchron tappen sollten. Nach dieser Synchronisationsphase wurde die Klicksequenz gestoppt und die Vpn sollten im gleichen Takt weitertappen (Continuation-Phase). Dabei zeigte sich, daß sich die Variabilität der Intertap-Intervalle (ITI) in der Continuation-Phase nicht von der in der Synchronisationsphase unterschied, dagegen war sie abhängig vom ISI: je größer das ISI, desto größer die Variabilität der ITI. Wing (1977, 1980) und Wing und Kristofferson (1973A, B) haben auf der Grundlage ähnlicher Befunde ein Modell entwickelt, das für viele nachfolgende Modelle im Bereich des Timings als Grundlage diente und daher im folgenden etwas ausführlicher dargestellt werden soll. Es führt die beobachtete Variabilität der ITI auf zwei unterschiedliche Quellen zurück: 1) auf die Variabilität einer internen Uhr (der sogenannten *internal clock*), die als zentraler Taktgeber fungiert und 2) auf die Variabilität der Verzögerung, die zwischen der Auslösung des motorischen Kommandos auf zentraler Ebene und der beobachtbaren Bewegung des Fingers liegt, also eine Verzögerung, die durch die zentrale und periphere Übertragung bedingt ist. Dieses Zwei-Komponenten-Modell ist in Abbildung 9.15 illustriert.

Die obere Linie gibt die Initiierungen des motorischen Kommandos durch den zentralen Taktgeber an; das Intervall zwischen zwei Initiierungen ist mit C_i bezeichnet. Nach jeder Initiierung wird eine Verzögerung bis zur Ausführung des Tastendrucks angenommen. Diese Verzögerung entsteht durch die Übertragung des motorischen



9.15 Zwei-Komponenten-Modell von Wing und Kristofferson (1973a). C = Intervall des zentralen Taktgebers, MD = motorische Verzögerung, I = beobachtetes Intertap-Intervall.

Kommandos (*motor delay*, MD_j). Der (beobachtbare) Tastendruck markiert den Beginn des Intervalls zwischen zwei Taps (I_j). Das aktuelle Intervall (I_j) ergibt sich also aus dem Taktgeber-Intervall (C_j), modifiziert durch die beiden beteiligten motorischen Verzögerungen (MD_j und MD_{j-1}):

$$I_j = C_j + MD_j - MD_{j-1}$$

Unter der Annahme, daß die beteiligten Teilprozesse voneinander unabhängige Zufallsvariablen sind, gilt für die Variabilität der ITI (σ_I^2):

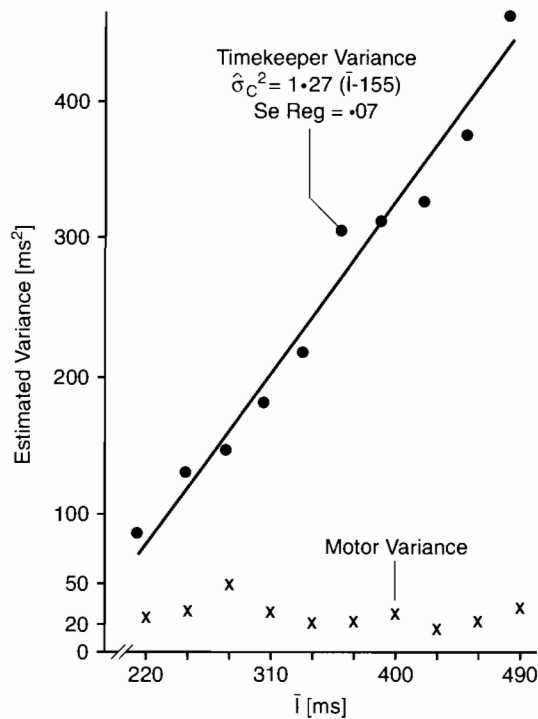
$$\sigma_I^2 = \sigma_C^2 + 2 \sigma_{MD}^2.$$

In den Daten tatsächlich beobachtbar ist nur die Variabilität der ITI (σ_I^2). Darüber hinaus kann der Wert von σ_{MD}^2 aus den Daten berechnet werden: σ_{MD}^2 entspricht nämlich der Kovarianz aufeinanderfolgender ITI ($\text{cov}I_j, I_{j+1}$; eine detaillierte Herleitung dieser Beziehung findet sich bei Vorberg & Wing, 1994).

Wenn die Annahmen des Modells zutreffen, dann sollte die von Michon (1967) und Wing (1977, 1980) beobachtete Zunahme der Variabilität der ITI mit zunehmendem ISI allein aufgrund der Zunahme der Variabilität des zentralen Taktgebers zustande kommen. Die motorische Variabilität sollte dagegen konstant bleiben, da sie unabhängig von dem zu produzierenden Intervall ist. Abbildung 9.16 zeigt, daß dies tatsächlich der Fall ist.

Eine umfassende Weiterentwicklung des Modells wurde kürzlich von Vorberg und Wing (1994) vorgelegt. Es ergänzt unter anderem das Grundmodell um eine einfache Rückkopplungskomponente, so daß es nicht mehr nur auf Daten aus der Continuation-Phase sondern auch auf Situationen mit externem Taktgeber anwendbar wird.

Um auf neurophysiologischer Ebene eine Entsprechung für den zentralen Taktgeber lokalisieren zu können, haben Ivry und Keele (1989) vier Gruppen von Patienten mit unterschiedlichen neurologischen Defiziten untersucht (Parkinson-Patienten, Patienten mit corticalen, cerebellären und peripheren Schäden). Die Leistungen dieser Patienten wurden in zwei Aufgaben analysiert: Zum einen sollten sie einen einfachen Rhythmus tappen, zum anderen wurde die Fähigkeit der Patienten untersucht, Unterschiede in der Dauer von Intervallen wahrzunehmen. Nur die Patienten mit cerebellären Schäden zeigten Defizite sowohl in der Produktion als auch in der Wahrnehmung zeitlicher Intervalle. Die Autoren interpretieren dieses Ergebnis dahingehend, daß zeitliche Kon-



9.16 Geschätzte Varianz des zentralen Taktgebers σ_c^2 und Varianz der motorischen Verzögerung σ_{MD}^2 als Funktion des mittleren Intertap-Intervalls (aus Wing, 1980, reproduziert mit Genehmigung des Verlags).

trolle eine Aufgabe des Cerebellums ist. Darüber hinaus wurde das Wing-Kristofferson-Modell auf die Tapping-Daten angewendet: Die Patienten mit peripheren Schäden zeigen einen deutlich erhöhten Wert in der Varianz der motorischen Verzögerung, während die Schätzung der Varianz des zentralen Taktgebers sich nicht von der der gesunden Kontrollpersonen unterscheidet. Die Patienten mit cerebellären Schäden zeigen dagegen das umgekehrte Bild: Im Vergleich zu den gesunden Kontrollpersonen findet man hier Beeinträchtigungen in der Varianz des zentralen Taktgebers, aber keine signifikanten Unterschiede in der Varianz der motorischen Verzögerung. Diese Ergebnisse sind gut mit dem Zwei-Komponenten-Modell von Wing und Kristofferson (1973A, B) zu vereinbaren.

Wie erfolgt die zeitliche Steuerung von nicht-isochronen, rhythmischen Handlungen? In den bisher dargestellten Untersuchungen ging es um die Produktion einfacher isochroner Rhythmen. Wie sieht es mit der zeitlichen Steuerung von Handlungen aus, wenn Rhythmen zu erzeugen sind, die nicht isochron sind? Dieser Frage wird meist im Zusammenhang mit der Frage nach der Koordination von Bewegungen nachgegangen (Überblick bei Heuer 1994; vgl. auch Abschnitt 5 zur raum-zeitlichen Steuerung von Handlungen). Vpn sollen in diesen Aufgaben entweder einfache (harmonische) Rhythmen oder sogenannte Polyrhythmen (nicht-harmonische Rhythmen) erzeugen. Letztere sind solche Rhythmen, bei denen z.B. die linke Hand nicht nur einen anderen Takt schlägt als die rechte, sondern bei denen zusätzlich das Verhältnis zwischen den Takten der beiden Hände nicht ganzzahlig ist (z.B. 3:2, 4:3, 5:4). Klapp (1979) beobachtete, daß die Leistung der Vpn stark abnimmt, sobald die Perioden der

Rhythmen, die mit beiden Händen geschlagen werden müssen, keine harmonische Beziehung zueinander haben.

Bei der Untersuchung dieser Polyrhythmen lassen sich, vereinfacht gesagt, zwei theoretisch disjunkte Ansätze unterscheiden: der *repräsentationale* Ansatz und der *dynamische* Ansatz. Vertreter des repräsentationalen Ansatzes versuchen, die Befunde auf die Beteiligung symbolischer Repräsentationen zurückzuführen (z.B. motorische Programme mit expliziten Taktgebern), während Vertreter des dynamischen Ansatzes versuchen, die zeitliche Steuerung von motorischen Sequenzen im Sinne von physikalischer Selbstorganisation zu erklären (indem z.B. die Zeit als systemimmanente Eigenschaft angesehen wird).

Der repräsentationale Ansatz. Während für untrainierte Vpn die Erzeugung von Polyrhythmen grundsätzlich schwieriger ist als die einfacher Rhythmen, konnte Shaffer (1981, 1982) zeigen, daß professionelle Pianisten nach extensivem Training auch bei komplexen Polyrhythmen sehr gute Leistungen zeigen. Shaffer (1982) nahm an, daß ein zentraler Taktgeber (*internal clock*) für die Steuerung der Hände verantwortlich ist, und daß es nach langem Training möglich ist, mit Hilfe eines *flexiblen* Taktgebers zeitliche Strukturen für die beiden Hände unabhängig voneinander zu erzeugen. Shaffers Befund der Unabhängigkeit der Hände voneinander nach extensivem Training konnte in nachfolgenden Untersuchungen jedoch nicht repliziert werden (vgl. z.B. Deutsch, 1983; Jagacinski, Marshburn, Klapp & Jones, 1988), weshalb die Idee eines *flexiblen* Taktgebers wieder fallengelassen wurde.

Der Frage, ob die Annahme *eines* zentralen Taktgebers zur Beschreibung der Resultate bei bimanualem Tapping ausreicht, gingen Wing, Church und Gentner (1989) nach. Sie verglichen Bedingungen miteinander, in denen identische Rhythmen entweder mit einer Hand oder mit beiden Händen alternierend erzeugt werden mußten. In der Bedingung, in der mit beiden Händen abwechselnd getappt wurde, war die Varianz der Intervalle zwischen den einzelnen Taps größer als in der einhändigen Bedingung. Bimanuelles Tapping kann also nicht einfach als unimanuelles Tapping mit beiden Händen angesehen werden. Dieses Ergebnis führte Wing et al. (1989) dazu anzunehmen, daß es möglicherweise *zwei gekoppelte* Taktgeber auf zentraler Ebene gibt. Die Ursache für den Unterschied zwischen uni- und bimanuellem Tapping wird von den Autoren damit auf einer zentralen Ebene der Bewegungssteuerung lokalisiert; Heuer (1994) wendet jedoch zu Recht ein, daß der Unterschied zwischen bimanuellen und unimanuellen Aufgaben ebensogut auch auf einer relativ peripheren Ebene der Bewegungssteuerung entstehen kann und die Ergebnisse damit nicht unbedingt im Widerspruch zum ursprünglichen Wing-Kristofferson-Modell stehen (das ja nur einen zentralen Taktgeber postuliert).

Jagacinski et al. (1988), die ebenfalls der Frage nachgingen, ob für bimanuelles Tapping die Annahme *eines* zentralen Taktgebers ausreicht, wendeten verschiedene Modelle auf ihre Daten an und testeten sie gegeneinander. Dabei kamen sie – unter Bezugnahme auf die von Vorberg und Hambuch (1978) erweiterte Version des Wing-Kristofferson-Modells – zu dem Schluß, daß rhythmische Muster in einer *integrierten hierarchischen* Struktur repräsentiert sind. Befunde zum bimanuellen Tapping werden damit von diesen Autoren weiterhin durch die Annahme *eines* zentralen Taktgebers erklärt.

Der dynamische Ansatz. Dieser Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, daß nicht die Existenz eines unabhängigen Generators (z.B. des zentralen Taktgebers) gefordert wird, der für eine beobachtete Handlungssequenz verantwortlich ist, sondern es wird

angenommen, daß die Steuerung von Bewegungen sich aus allgemeinen Prinzipien ergibt, die selbst keine symbolische Repräsentation innerhalb des Systems haben. Zeitliche Muster entstehen damit spontan und selbstorganisiert, wenn einer oder mehrere der sogenannten Kontrollparameter verändert werden (vgl. synergetische Ansätze, Haken, 1983, 1990; Schöner & Kelso, 1988a, b; für einen Überblick im Zusammenhang mit polyrhythmischen Tapping, s. Peper, Beek & Van Wieringen, 1991).

Das bekannteste Beispiel einer Anwendung der Synergetik auf menschliche Bewegungen ist die dynamische Modellierung rhythmischer Handbewegungen von Haken, Kelso und Bunz (1985). In den zugrundeliegenden Experimenten sollten die Vpn beide Hände rhythmisch entweder symmetrisch (in Phase) oder asymmetrisch (antiphasisch) bewegen (Kelso, 1981). Wenn die Vpn während der Sequenzen die Frequenz ihrer Bewegungen erhöhten, dann zeigte sich in Bedingungen mit asymmetrischen Bewegungen, daß diese ab einer bestimmten Frequenz in symmetrische Bewegungen übergingen. Haken und Mitarbeiter (1985) modellierten diese Handbewegungen – speziell die Phasenübergänge – mit Hilfe eines Systems von nicht-linearen gekoppelten Oszillatoren. Das dynamische Modell, das diese Autoren präsentieren, versucht damit unabhängig von der Biomechanik oder Neurophysiologie der sich bewegenden Gliedmaßen eine einfache abstrakte Beschreibung der globalen Eigenschaften der Bewegung zu liefern.

Kelso und deGuzman (1988) haben die Experimente von Kelso (1981) erweitert, indem sie nicht nur symmetrische und asymmetrische Bewegungen untersuchten, sondern auch Polyrythmen verwendeten. Dabei sollten die Vpn relative Phasen zwischen rechter und linker Hand von z.B. 4:3, 5:2 oder 2:1 ausführen. Hier zeigte sich, daß die Polyrythmen (also nicht ganzzahlige Phasenverhältnisse) bei geringeren Frequenzen (langsamen Bewegungen) leicht auszuführen sind, während dies bei höheren Frequenzen praktisch unmöglich wird. Dazwischen beobachteten sie wieder eine Übergangphase, in der aus den Polyrythmen relativ plötzlich einfache Rhythmen (mit ganzzahligen Phasenverhältnissen) wurden.

Nachdem in diesem Abschnitt der Schwerpunkt auf die *zeitliche* Steuerung von Handlungen gelegt und dies am Beispiel von Hand- und Fingerbewegungen (sogenannte Tapping-Aufgaben) dargestellt wurde, werden wir im nächsten Abschnitt anhand komplexerer Bewegungen (z.B. Greifen) darstellen, wie die *raum-zeitliche* Steuerung von Handlungen erfolgt.

9.5 Raum-zeitliche Steuerung von Handlungen

Im letzten Abschnitt beschäftigen wir uns damit, wie das *Wie?* komplexerer zielgerichteter Handlungen geregelt wird, d.h. wie räumliche *und* zeitliche Aspekte der Reizinformation genutzt werden, um Form und Verlauf von Bewegungen zu bestimmen. Die Handlungen, die wir hier betrachten, sind durchweg zielgerichtet. Das bedeutet: Sie erschöpfen sich nicht in der Ausführung einer bestimmten Bewegung, sondern die Ausführung dient einem bestimmten intendierten Bewegungseffekt, der erreicht oder mehr oder weniger weit verfehlt werden kann. Diese intendierten Handlungseffekte, die uns bereits in Abschnitt 9.3 begegnet sind, bezeichnen wir im folgenden als Handlungsziele.

Die meisten im Alltagsleben anzutreffenden Bewegungen sind zielgerichtet. Einige davon – wie z.B. das Greifen nach einem Telefonhörer – finden unter gleichbleiben-

den visuellen Umgebungsbedingungen statt, andere – wie z.B. das Schlagen nach einem Squashball – müssen fortlaufend und sehr kurzfristig den sich ändernden Umgebungsbedingungen angepaßt werden. Sie verlangen visuomotorische Koordination, also den Einbezug visueller Information in die aktuelle Bewegungssteuerung. Im folgenden werden zunächst die beiden Alternativen der Bewegungssteuerung, nämlich die Programmsteuerung und die Regelung, gegeneinander abgegrenzt. Danach wenden wir uns einer Gesetzmäßigkeit zu, die bei zielgerichteten Bewegungen mit Genauigkeitsanforderungen zu beobachten ist (dem Fittsschen Gesetz) und werden schließlich auf die Koordination verschiedener Körperbewegungen beim Greifen eingehen. Den Abschluß bildet ein Unterabschnitt, der zeigt, daß die Fähigkeit zur visuomotorischen Koordination ausgesprochen adaptionsfähig ist.

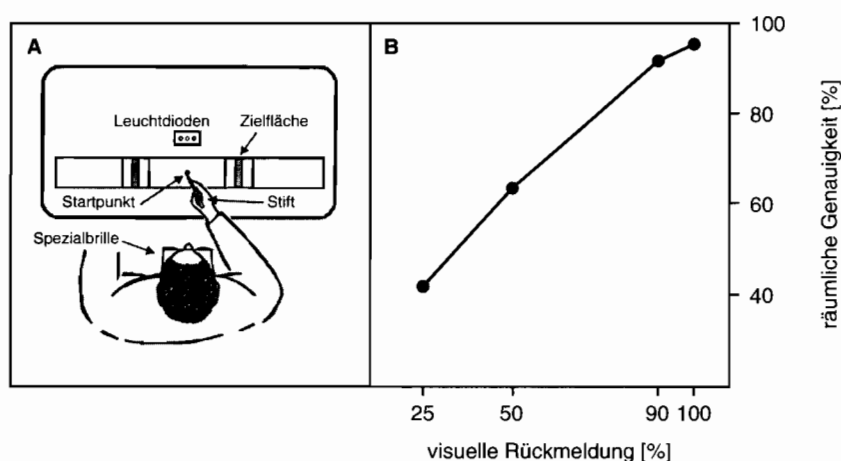
Programmsteuerung und Regelung. Es ist offensichtlich, daß zumindest die eine oder andere zielgerichtete Bewegung – wie das Schlagen nach einem Squashball – nicht mit einem Mechanismus zu bewerkstelligen ist, der allein auf der in Abschnitt 9.3 erörterten Programmsteuerung basiert. Wie bereits erläutert, ist für eine Programmsteuerung kennzeichnend, daß die Bewegung allein durch eine motorische Kommandoabfolge realisiert wird, die *vor* der Bewegung generiert und initiiert worden ist. Bei einem derartigen Mechanismus wäre eine Bewegung nach einem Verspringen des Balles aufgrund von Bodenunebenheiten nicht mehr erfolgreich korrigierbar, weil die entsprechenden Korrekturschleifen gar nicht vorgesehen sind. Dementsprechend wird die Programmsteuerung – wegen des Fehlens rückgekoppelter Schleifen – auch als *open loop*-Steuerung bezeichnet (z.B. Keele, 1968; Jones, 1978).

Daß derartige Korrekturen aber bei zielgerichteten Bewegungen oft zu beobachten sind, läßt auf das Einbeziehen visueller Informationen noch während der Ausführung schließen. Mit der Berücksichtigung derartiger Korrekturmöglichkeiten wird ein geschlossener (weil rückgekoppelter) *Regelungsmechanismus* der Bewegungssteuerung angenommen (*closed loop*-Steuerung). In einer extremen Variante dieser Vorstellung (z.B. Adams, 1971) gelangt so eine Bewegung zur Ausführung, ohne daß eine Kommandoabfolge aufwendig motorisch vorbereitet wird. Die Bewegung entwickelt sich in direkter Interaktion mit den Umgebungsbedingungen und den visuellen und propriozeptiven Rückmeldungen (Online-Programmierung). Bei andauernden und damit unvorhersehbaren Bewegungsanforderungen ist dies eine zunächst durchaus naheliegende Alternative zur Programmsteuerung.

Programmsteuerung und Regelung wurden lange Zeit als Alternativen und nicht als ergänzende Prozesse angesehen (kritischer Überblick bei Heuer, 1990, Kapitel 3 und Rosenbaum, 1991, Kapitel 3). Es gibt aber auch Vorstellungen, die eine Kombination von Regelungs- und Programmsteuerungsprozessen vorsehen. Bereits auf Woodworth (1899) geht die Annahme zurück, daß die erste Phase einer zielgerichteten Bewegung (*initial impulse*) programmgesteuert erfolgt, während sich das Ende durch eine fortlaufende Kontrollphase (*current control*) auszeichnet. Kennzeichnend für diese Art der Bewegungssteuerung ist, daß während verschiedener Bewegungsphasen ein jeweils vorgegebener Sollwert (z.B. eine Zielposition) mit einem programmgenerierten Istwert (z.B. die momentane Handposition) verglichen wird, was gegebenenfalls zu einer Korrektur der Bewegung Anlaß gibt.

Daß visuelle Information noch während der Ausführung genutzt wird, kann experimentell durch (partielles) Ausblenden dieser Information demonstriert werden. Bei Carlton (1981) verdeckte beispielsweise eine Sichtblende die ersten 0, 25, 50, 75 oder 93% einer 32 oder 64 cm weiten Zielbewegung. Erst ab 50% der Wegstreckenabdek-

kung zeigte sich ein Anstieg sowohl in der Bewegungsdauer als auch in den Fehlern. Die erste Hälfte der Bewegung scheint damit von der verfügbaren visuellen Information unbeeinflusst abzulaufen. Demgegenüber verwendeten Spijkers, Albracht und Lochner (1988, vgl. auch Spijkers, 1993, Experiment 1) eine Versuchsanordnung, in denen mit einer Spezialbrille unter anderem der Blick auf die letzten Teile der Bewegungsstrecke verhindert wurde (Abbildung 9.17). Die Vpn mußten hier einen Stift 2,75 bis 16,75 cm horizontal von einer Startposition zu einer zuvor definierten Zielfläche nach rechts oder links bewegen, was ihnen kurz zuvor durch eine Leuchtdiode angezeigt wurde. Sie konnten im Gegensatz zu Carlton (1981) nachweisen, daß auch in der ersten Hälfte einer Bewegung visuelle Information zur Zielgenauigkeit beiträgt.



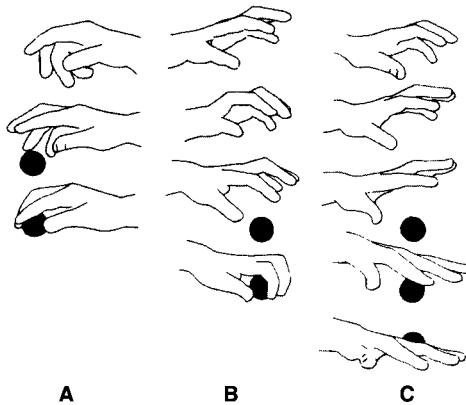
9.17 A: Die Vp bewegt auf eine entsprechende Leuchtdiodenanzeige einen Stift von einer Startposition nach links oder rechts. Durch eine Spezialbrille wird der Blick auf die eigene Handbewegung nach 25, 50, 90 und 100% der Bewegungsstrecke verwehrt. B: Es zeigt sich, daß die Zielgenauigkeit auch in der ersten Hälfte der Bewegung von der visuomotorischen Rückmeldung abhängt (gemittelt über drei Bewegungsstrecken, nach Spijkers et al., 1988).

Eine weitere Frage ergibt sich daraus, wie schnell während einer Bewegung visuelle Informationen der aktuellen Ziel- und Handposition berücksichtigt werden können. In der oben bereits genannten Versuchsanordnung von Carlton (1981) konnte gezeigt werden, daß sich nach einem abrupten Einblenden visueller Information erste Korrekturen nach ca. 135 ms in den Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Funktionen abzeichnen. Ein ähnlicher Wert wird von Spijkers und Lochner (1994, ca. 150 ms) berichtet. Kürzere visuomotorische Rückkopplungsschleifen ergeben sich in Versuchsanordnungen, in denen das Ziel während der Bewegung verlagert wird (*double step*-Experimente, Überblick bei Jeannerod, 1994). So wurde bei Paulignan, MacKenzie, Marteniuk und Jeannerod (1990) das Ziel bei Beginn der Bewegung um 10° nach links oder rechts verschoben. Das visuomotorische System reagiert hier mit der Einleitung von entsprechenden Korrekturen bereits 100 ms nach der Zieländerung.

Bei der Steuerung zielgerichteter Bewegungen und den dabei anfallenden visuomotorischen Koordinationen spielt unter anderem der prämotorische und der parietale Cortex eine bedeutende Rolle (Überblick bei Jeannerod, 1994; vgl. Roth, Kapitel 4, in diesem Band). Im ventralen prämotorischen Cortex bei Makaken-Affen konnten bei-

spielsweise Neurone isoliert werden, die nur begleitend zur visuellen Stimulation auf Hand- und Armbewegungen reagieren (Graziano, Yap & Gross, 1994). Des Weiteren fanden sich dort richtungssensitive Neurone, die bei zielgerichteten Armbewegungen feuern und auch schon durch visuelle Objekte in der entsprechenden Reichweite aktiviert werden (Gentilucci et al., 1988). Im primären motorischen Cortex gibt es Neuronenpopulationen, die auch die Bewegungsrichtung charakterisieren (Georgopoulos et al., 1986). Mit Hilfe von Einzelzelleitungen im motorischen Cortex von Rhesus-Affen fand Georgopoulos (1990) Evidenz dafür, daß zum einen eine einzelne Zelle an Bewegungen in verschiedene Richtungen beteiligt ist und daß zum anderen eine Bewegung in einer bestimmten Richtung der Aktivierung einer ganzen Population von Zellen bedarf. Zur Beschreibung dieser Aktivierung hat Georgopoulos (1990) den sogenannten Populationsvektor eingeführt, der die Vektorsumme der einzelnen Zellaktivitäten repräsentiert. Es bedarf also lediglich dieses Populationsvektors, um eine Bewegung zu charakterisieren.

Die Bedeutung des parietalen Cortex für die visuomotorische Koordination konnte Jeannerod (1988) in Patientenstudien nachweisen. Patienten mit posterior-parietalen Läsionen zeigen Defizite bei der Koordination von Hand- und Fingerbewegungen (Abbildung 9.18). Im Gegensatz zur Hand, die ipsilateral zur Läsion liegt und normale Greifbewegungen aufweist, zeigt die Hand kontralateral zur Läsion ein inadäquates Verhalten: Mit visuellem Feedback sind alle Finger gestreckt, wenig Anzeichen für eine Greifbewegung sind bis kurz vor dem Zugreifen zu beobachten. Das Schließen der Finger bleibt unvollständig. In der Bedingung ohne visuelle Rückmeldung ist überhaupt keine Greifbewegung zu beobachten.



9.18 Greifbewegungen eines Patienten mit Läsionen im posterior-parietalen Cortex. Mit der zur Läsion ipsilateralen Hand sind normale Greifbewegungen auch ohne visuellem Feedback zu beobachten (A). Die von der Läsion betroffene kontralaterale Hand zeigt Störungen in der Greifbewegung sowohl in der Bedingung mit visuellem Feedback (B), stärker aber noch in der ohne visuelles Feedback (C). (Aus Jeannerod, 1988, reproduziert mit Genehmigung des Verlags.)

Jeannerod (1994) faßt die neurophysiologischen Befunde dahingehend zusammen, daß die Neurone im prämotorischen (A6) und motorischen Cortex (A4) eher für die Initiierung der Bewegung verantwortlich sind, während die parietalen Neuronenverbände (PP) die Bewegungsausführung überwachen. Wenden wir uns im folgenden einer offen beobachtbaren Gesetzmäßigkeit zu, an der diese Gehirnmareale beteiligt sein dürften.

Das Fittssche Gesetz. Eine sehr robuste Gesetzmäßigkeit, die für zielgerichtete Bewegungen gilt, ist unter der Bezeichnung *Fittssches Gesetz* in die Literatur eingegangen (Fitts, 1954; Fitts & Peterson, 1964). Es beschreibt, wie die Ausführungszeit mit den Genauigkeitsanforderungen einer Bewegung zusammenhängt. Ursprünglich wurde es anhand einer Versuchsanordnung entwickelt, in der die Vpn einen Stift zwischen zwei Zielpunkten hin und her bewegen sollten (Abbildung 9.19). In dieser Aufgabe wurde die Bewegungsdistanz d und die Größe des Zielpunktes g systematisch manipuliert. Fitts fand, daß in dieser Aufgabe die Bewegungszeit t (gemessen als Zeit, die benötigt wird, um zwischen den Zielpunkten zu wechseln) von der Bewegungsdistanz und Zielgröße abhängt, und zwar in Form der Gesetzmäßigkeit

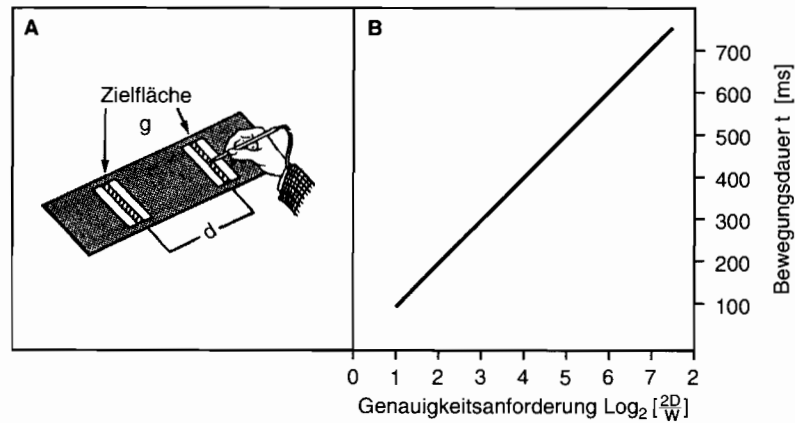
$$t = a + b \times \log_2(2d/g).$$

Dabei sind a und b empirische Konstanten, der Ausdruck $\log_2(2d/g)$ bestimmt die Genauigkeitsanforderungen und wird auch Schwierigkeitsindex genannt³. Ist man beispielsweise bestrebt, die Bewegungszeit t bei gleichbleibender Bewegungsdistanz zu verringern, muß das Ziel vergrößert bzw. damit die geforderte Genauigkeit verringert werden. Umgekehrt kann man bei gleichbleibender Bewegungszeit, aber verringerter Distanz, davon ausgehen, daß die Genauigkeit zunimmt. – Das Fittssche Gesetz scheint für einen weiten Bereich von Bewegungen gültig zu sein, nicht nur für Finger-, Hand- und Armbewegungen, sogar für Zielbewegungen unter einem Mikroskop oder für Bewegungen unter Wasser (Überblick bei Keele, 1986; kritische Aspekte zur Gültigkeit des Fittsschen Gesetzes bei Hancock & Newell, 1985).

Welche Prozeßmechanismen liegen dem Fittsschen Gesetz zugrunde? Eine Erklärung, die allein auf Prozessen der Regelung oder Programmsteuerung basiert, wird heute weitgehend ausgeschlossen. Vielmehr geht man davon aus, daß das Gesetz durch ein Zusammenwirken von Regelungs- und Programmsteuerungsprozessen verursacht ist. Wir wollen hier nicht die verschiedenen Modelle darstellen, die dieses Zusammenwirken beschreiben (neuere Überblicke bei Spijkers, 1993, Kapitel 5; Rosenbaum & Krist, 1994), sondern lediglich als Beispiel das besonders ausgereifte *Modell der optimierten Teilbewegungen* skizzieren (Meyer et al., 1988; Meyer et al., 1990).

Wie die meisten Modelle geht auch dieses Modell davon aus, daß sich Zielbewegungen in mehrere – zumindest aber zwei – Teilphasen zergliedern lassen. Tatsächlich ist diese Vorstellung auch schon in der oben erwähnten Unterscheidung Woodworths vorgesehen, der eine ballistische Anfangs- und eine nachfolgende und feinregulierende Kontrollphase annimmt. Anhaltspunkte für eine Zergliederung der gesamten Bewe-

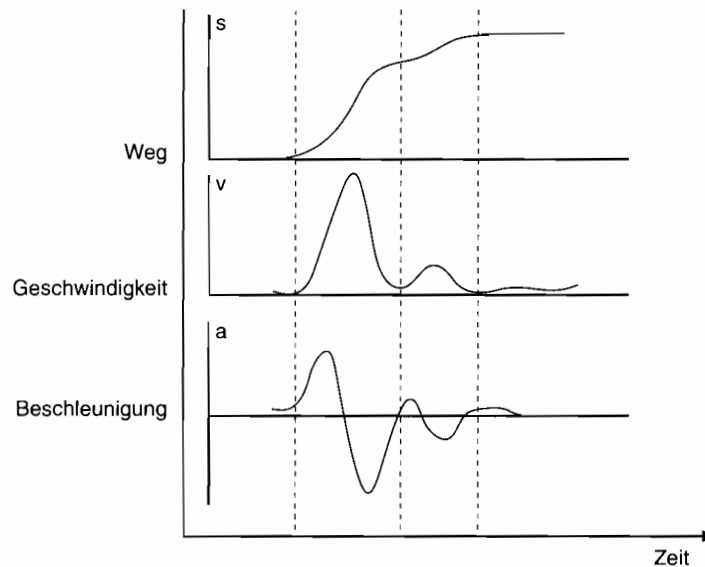
³ Zwei weitere Anmerkungen zum Fittsschen Gesetz: 1) In dieser Form ist es nur gültig, wenn das Verfehlen der Zielfläche g und damit die Fehleranzahl konstant bleibt. Dies kann zwar durch eine geeignete Instruktion nahegelegt werden, bedarf aber jeweils der Überprüfung. Bei unterschiedlicher Fehleranzahl liegt ansonsten die Gefahr einer Verschiebung des subjektiven Genauigkeitskriteriums vor, was die Gültigkeit des Fittsschen Gesetzes einschränkt. Um diese Einschränkung zu umgehen, kann anstelle der Größe des Zielpunktes g als empirischer Wert auch die Streuung der in der obigen Aufgabe ermittelten Zielpunkte um deren Mittelwert in die Gleichung eingehen. 2) Die Verwendung des Logarithmus zur Basis 2 ergab sich aus einer bit-orientierten Informationstheorie und erfolgte damit theoriegeleitet. Heute ist diese Verwendung eher historisch zu betrachten, wenngleich es diese Konvention auch heute erlaubt, die Konstanten a und b von verschiedenen Untersuchungen zu vergleichen.



9.19 (A) Die Versuchsanordnung von Fitts (1954): Die Vpn bewegen einen Stift zwischen den Zielflächen hin und her, wobei die Größe der Zielfläche g und die Distanz d variiert wird (nach Fitts, 1954). (B) Die Abhängigkeit der Bewegungszeit von den Genauigkeitsanforderungen entsprechend dem Fittsschen Gesetz.

gung in verschiedene Bewegungsabschnitte kann man unter bestimmten Bedingungen aus kinematischen Analysen gewinnen. In Abbildung 9.20 ist ein typischer Verlauf einer zielgerichteten Bewegung wiedergegeben. Aus der oberen Weg-Zeit-Funktion läßt sich mit der ersten und zweiten Ableitung über die Zeit die Geschwindigkeits-Zeit- und die Beschleunigungs-Zeit-Funktion ermitteln. Die beiden unteren Funktionen decken das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten auf und machen – wie im dargestellten Fall – zwei Bewegungsabschnitte deutlich. Ein ähnlicher Verlauf findet sich z. B. bei zielgerichteten Handgelenksrotationen (Meyer et al., 1990). Vince (1948) und Carlton (1979) berichten, daß mit der ersten Teilbewegung oft 90% der gesamten Bewegungstrecke überbrückt wird.

Der Zusammenhang, der im Fittsschen Gesetz beschrieben wird, kommt nun nach Meyer et al. (1988) dadurch zustande, daß das System bestrebt ist, die Dauer der (Teil-) Bewegungen zu optimieren. Die primäre Teilbewegung ist zwar darauf programmiert, die Zielfläche zu treffen, aufgrund von neuromotorischem Rauschen nimmt die Streuung der primären Teilbewegungsendpunkte aber proportional mit der Bewegungsgeschwindigkeit zu. Dieser Zusammenhang ist empirisch nachgewiesen worden (Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank & Quinn, 1979) und gilt auch für die eventuell nachfolgenden Teilbewegungen. Dadurch wird erklärbar, daß gelegentlich selbst bei einfließenden Korrekturen das Ziel verfehlt wird. Um die Bewegungszeit zu optimieren, kommt es dem Modell zufolge darauf an, einen idealen Kompromiß zwischen den mittleren Dauern der Teilbewegungen zu finden. Würde man die Geschwindigkeit der ersten Teilbewegung zu sehr steigern, erhöhte sich die relative Häufigkeit für nachfolgende Korrekturbewegungen. Andererseits wäre es ineffektiv, für die ersten und nachfolgenden Teilbewegungen mehr Zeit als nötig einzuräumen. Also muß nach diesen Vorstellungen ein Kompromiß in der Wahl der (Teil-)Bewegungszeiten gefunden werden. Erste vielversprechende Ansätze zur weiteren Spezifizierung des Modells der optimierten Teilbewegungen liegen bereits vor (Meyer et al., 1990; Abrams et al., 1990; vgl. auch die kritischen Betrachtungen bei Spijkers, 1993; Spijkers & Lochner, 1994).



9.20 Beispiel für eine Weg-Zeit-Kurve (oben), eine Geschwindigkeits-Zeit-Kurve (Mitte) und eine Beschleunigungs-Zeit-Kurve (unten) für eine zielgerichtete Bewegung. Die gestrichelten Linien geben den Bewegungsbeginn, das Ende der ersten Teilbewegung und das Ende der Gesamtbewegung an.

Die Koordination verschiedener Körperbewegungen beim Greifen. Bisher ist in diesem Abschnitt die Zielkomponente bei relativ einfachen Bewegungen fokussiert worden. Wenden wir uns nun der Frage zu, wie bei Zielbewegungen die Einzelbewegungen der verschiedenen Körperteile koordiniert werden (Überblick zu Koordinationsproblematik bei Heuer, 1994). Beim Greifen nach einem Objekt wird die Armbewegung, die die Hand in die Zielposition transportiert, zeitlich parallel zu den Fingerbewegungen ausgeführt; letztere sind auf das Objekt gerichtet und öffnen die Hand in Abhängigkeit von der zu umfassenden Objektgröße (Jeannerod, 1981). Dies bedarf der räumlichen und zeitlichen Koordination: Das Öffnen der Finger muß mit dem Punkt zusammenfallen, an dem der Transport der Hand durch die Armbewegung endet. Da anzunehmen ist, daß diese Koordination zentral gesteuert erfolgt, liegt es nahe, nach invarianten Beziehungen zwischen den beiden Teilkomponenten zu suchen. Ein Hinweis dafür liegt vor, wenn die transportierende Armbewegung mit der Greifbewegung der Finger in einem Parameter kovariiert. Bei einer genaueren Analyse der Bewegungsverläufe konnte in der Tat gezeigt werden, daß eine maximale Greiföffnung nach ca. 80% der gesamten Bewegungszeit zu verzeichnen ist, und zwar trotz unterschiedlicher Bewegungsgeschwindigkeiten des Armes und Ausgangsstellungen der Finger (Jeannerod, 1984; Wallace, Weeks & Kelso, 1990). Diese zeitliche Invarianz läßt auf eine funktionale Kopplung der beiden Bewegungskomponenten schließen.

Eine funktionale Kopplung läßt sich auch durch systematische Manipulation der einen Komponente und die dadurch ausgelöste Variation der anderen Komponente nachweisen. In einer Versuchsanordnung von Wing, Turton und Fraser (1986) sollten Vpn nach einem Stock mit normaler und möglichst hoher Geschwindigkeit greifen. Schnellere Geschwindigkeiten sollten in erster Linie Auswirkungen auf die Armbewegungen haben, wirken sich allerdings nicht nur in schnelleren, sondern auch in größe-

ren maximalen Greiföffnungen aus. Nach dem Fittsschen Gesetz geht eine Erhöhung der Armgeschwindigkeit zu Lasten der Zielgenauigkeit, was offensichtlich in der Versuchsanordnung von Wing et al. aber dadurch kompensiert wird, daß die Finger weiter geöffnet werden. Dieses Verhalten dient damit der zu erwartenden Fehlerkorrektur. Wallace und Weeks (1988) konnten diesen Befund dahingehend präzisieren, daß der für die Greifgröße kritische Faktor die Dauer der Bewegung und nicht die Geschwindigkeit ist.

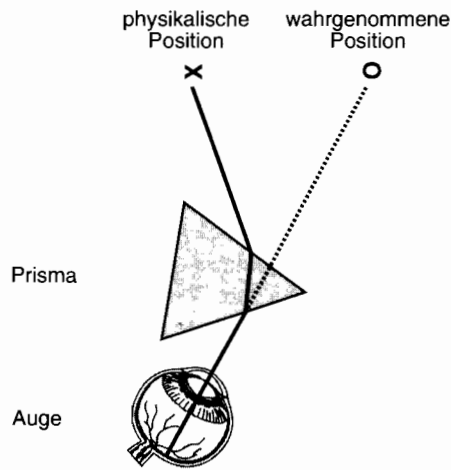
Wenn man auf der anderen Seite die Greifkomponente der Finger systematisch variiert, sollten sich bei funktionaler Kopplung der beiden Komponenten auch Auswirkungen auf die Armbewegung zeigen. Eine einfache Manipulation dieser Art besteht darin, daß man unterschiedlich große Zielobjekte verwendet. Ein kleines Objekt führt nach Marteniuk et al. (1990) dazu, daß die Gesamtbewegungszeit aufgrund einer verlängerten Bremsphase der Transportbewegung zunimmt.

Zusammenfassend ergeben die Befunde, daß beide Komponenten des Greifens, die transportierende Armbewegung und die Griffbewegung der Finger, kinematisch aneinander gekoppelt sind. Andererseits ist diese Kopplung sicherlich nicht starr, was sich schon aus dem Umstand ergibt, daß Zielpunkte sich durch ganz unterschiedliche Bewegungsmuster erreichen lassen, die zum Teil der willkürlichen Kontrolle unterliegen. Dies muß bei der Bewertung der oben genannten Befunde berücksichtigt werden. Bei der Auswahl der an der Bewegungsausführung beteiligten Gliedsegmente ist wahrscheinlich die ein oder andere Kombination günstiger (Rosenbaum & Krist, 1994) – möglicherweise in Abhängigkeit davon, ob sie sich besser koordinieren lassen.

Anpassung der visuomotorischen Koordination nach optischen Verzerrungen. Wir haben bisher die Fähigkeit zur visuomotorischen Koordination als eine Leistung des Systems eingeführt, die es gestattet, visuelle – insbesondere räumliche – Spezifikationen bei zielgerichteten Bewegungen zu berücksichtigen. Diese räumlichen Spezifikationen werden aber nicht „einfach so“ durch das visuelle System bereitgestellt, sondern sie sind das Resultat eines lang andauernden und adaptierfähigen Erfahrungsprozesses. Durch ihn wird erst die gesehene räumliche Position mit der kinästhetisch gefühlten Position des Armes oder eines Objekts in Beziehung zueinander gesetzt.

Dies wird recht eindrucksvoll durch die sogenannten Prismen-Adaptationsversuche demonstriert, deren ältesten Experimente in das vorherige Jahrhundert zurückreichen (z.B. Helmholtz, 1866; neuerer Überblick bei Redding & Wallace, 1992): Durch ein Keilprisma, das in einem Brillengestell vor dem Auge montiert wird, kann erreicht werden, daß die wahrgenommene Position eines Objekts von der tatsächlichen Position abweicht. Verwendet man ein Prisma wie in Abbildung 9.21, so erscheinen beispielsweise alle Gegenstände des Gesichtsfeldes nach links von ihrer wirklichen Position verschoben. Was geschieht nun, wenn ein Beobachter versucht, nach dem Objekt zu greifen und wie verändert sich sein Verhalten, wenn er über längere Zeit eine solche Brille trägt?

Zunächst wird er das Zielobjekt verfehlen, insbesondere, wenn man ihm zunächst den Blick auf die eigene Hand verwehrt. Nach einiger Zeit adaptiert das System aber an die veränderten Bedingungen und es wird keine Probleme mehr bereiten, das Objekt zu erfassen (*Adaptationseffekt*). Ja, der Beobachter wird die durch das Prisma erzeugte Verzerrung gar nicht mehr als solche erleben. Dies wird auch deutlich, wenn er nach erfolgter Adaptation die Brille wieder abnimmt: Dann nämlich kommt es für



9.21 Prismatische Verschiebung: Durch ein Keilprisma weicht die wahrgenommene von der physikalischen Position eines Objekts ab. Während der prismatischen Adaptation wird die visuell und die kinästhetisch wahrgenommene Objektposition neu in Beziehung zueinander gesetzt.

einige Zeit zu einem paradoxen Greiffehler in umgekehrter Richtung (*negativer Nacheffekt*), d.h. ohne Brille zielt sein Griff zunächst auf die Position, die das Objekt mit Brille eingenommen hätte. Auch hier dauert es einige Zeit, bis sich die paradoxe Umkehrung wieder verliert.

Adaptation bzw. der Verlust des negativen Nacheffekts stellen sich je nach dem Grad der optischen Verzerrung nach Stunden, manchmal aber auch erst nach Tagen oder Wochen ein. Eine besonders extreme Variante der optischen Transformation wird durch Umkehrbrillen erzeugt: Hier wird durch eine geeignete Spiegelbrille das Gesichtsfeld vertikal vertauscht, d.h. die Welt steht zunächst buchstäblich auf den Kopf. Auch unter diesen extremen Bedingungen stellt sich nach einigen Tagen eine visuo-motorische Adaptation ein; die Vpn sind dann sogar in der Lage, mit der Brille kleinere Fahrrad- und Skitouren durchzuführen (Kohler, 1951).

Worin besteht der Adaptationsprozeß, der den Beobachter nach einiger Übung in die Lage versetzt, fehlerfrei nach den scheinbar verschobenen Objekten zu greifen? Dazu muß man sich klarmachen, daß die projizierte Lage des Zielobjekts auf der Netzhaut keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Lage des Objekts relativ zum Körper zuläßt. Der Bezug dieser beiden Informationsquellen wird aber benötigt, um die Bewegung erfolgreich zu steuern. Er wird hergestellt, in dem neben der retinalen Information die nichtvisuellen Informationen über die relativen Körperstellungen einbezogen und gegeneinander verrechnet werden.

Auch die nichtvisuellen, kinästhetischen Meldungen von den Sehnen, Muskeln und Gelenken dienen uns nicht als alleinige Informationsquelle über die Position des Armes. Da wir unseren Arm und die meisten seiner Bewegungen sehen können, verfügen wir häufig auch über visuelle Informationen über seine jeweiligen Positionen. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, die gesehene Position und die kinästhetisch empfundene Position des Armes – oder eines Objekts, das mit ihm in Berührung kommt – aufeinander zu beziehen. Seit alters her wird die Möglichkeit dieser Koordination zwischen Sehen und Empfinden als entscheidende Voraussetzung unserer Fähigkeit zum räumlichen Sehen interpretiert.

Prinzipiell kann die prismatische Adaptation auf drei Arten vom System umgesetzt werden: 1) Die aufgrund visueller Information erstellte kognitive Landkarte wird korrigiert bzw. neu geeicht, bis sie mit der auf kinästhetischer Information errichteten

Landkarte übereinstimmt. 2) Die kinästhetische Landkarte wird so korrigiert, daß sie mit der visuellen Landkarte übereinstimmt. Und 3) ist denkbar, daß nichts dergleichen geschieht und lediglich eine neue Korrelation zwischen gesehener Position und darauf *gerichteten* Bewegungen hergestellt wird, die dafür sorgt, daß der Betrachter, der das Objekt an seiner scheinbaren Position sieht, dennoch auf die tatsächliche Objektposition zeigt.

In dieser letzten Erklärung steht die Umwertung der motorischen Kommandos im Vordergrund, die einem gegebenen visuellen Positionseindruck zugeordnet werden. Für sie spricht erstens, daß sich in lang andauernden Adaptationsexperimenten zunächst das Bewegungsverhalten normalisiert und erst später der Wahrnehmungseindruck. Offenbar ist die Steuerung von Bewegungen nicht auf die bewußt repräsentierten Wahrnehmungsinhalte angewiesen (vgl. Abschnitt 9.2). Zweitens hat sich gezeigt, daß die Eigenbewegung des Betrachters eine wichtige, wenn nicht gar notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen von Adaptation ist (Kohler, 1951). Dies zusammen mit der Beobachtung, daß passive Bewegungen (z.B. das Führen der Hand) weit weniger zur Adaptation führen als aktive Bewegungen (z.B. freies Explorieren), läßt den Schluß ziehen, daß die sensorischen und motorischen Konsequenzen *des handelnden Umgangs mit den Reizgegenständen* erst unsere Raumwahrnehmung etablieren. Wolff (1985, 1986) geht noch einen Schritt weiter: Das, was wir im prismatischen Versuch (um)lernen, sind die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich die nach erfolgter Bewegung eintretenden sensorischen Effekte (hier z.B. als Folge der Armbewegungen) *intentional* variieren lassen. Es sind die (invarianten) Beziehungen zwischen Handlungsintentionen und den dann schließlich erreichten Effekten, die sich bei einem erfolgreichen Greifen nach einem Zielobjekt einstellen. Dieser Punkt wird im nachfolgenden Abschnitt aus einer anderen Perspektive konkretisiert.

9.6 Intention und Handlung

Zum Schluß wollen wir eine Frage ansprechen, die wir bisher nicht behandelt haben, obwohl man eigentlich meinen könnte, daß sie in einem psychologischen Kapitel über Mechanismen der Handlungssteuerung ganz an den Anfang gehört. Wir haben nämlich bisher so getan, als hinge die Initiierung und Steuerung von Handlungen ausschließlich von der Information ab, die durch die Reaktionssignale vorgegeben wird. Weitgehend ausgeblendet haben wir die banale Tatsache, daß unsere Handlungen von unseren Intentionen bestimmt werden oder – um es mit einer altmodischen poetischen Floskel zu sagen –, daß es der Wille ist, der die Tat hervorbringt. Daß dies so ist, ist eine unverrückbare Selbstverständlichkeit unserer Alltagspsychologie, mit der wir unser tägliches Leben bestreiten. Warum kommt sie in der wissenschaftlichen Untersuchung nicht vor, und wie könnte man hier mit ihr umgehen?

Wir stoßen hier auf ein Dilemma, das so alt ist wie die Psychologie selbst. Einerseits zeichnet sich die Psychologie gegenüber anderen Wissenschaften dadurch aus, daß sie subjektives Erleben zum Gegenstand hat. Zum subjektiven Erleben zählen natürlich auch die subjektiven Willenserscheinungen, wie sie z.B. in Plänen, Absichten oder Handlungszielen zum Ausdruck kommen. Andererseits ist die Psychologie aber eben deswegen auch stets kritisiert worden, teils mit methodischen, teils mit inhaltlichen Einwänden. Die *methodischen* Einwände, die vor allem seitens der Naturwissenschaften erhoben werden, betreffen die Objektivität und die Meßbarkeit von Erlebnistatbe-

ständen. Da Erlebnisse definitionsgemäß subjektiv sind, sind sie immer nur dem jeweiligen Subjekt zugänglich; sie erfüllen damit nicht das Kriterium der Objektivität, das von wissenschaftlichen Beobachtungen verlangt, daß sie durch andere Personen nachvollzogen und überprüft werden können. Hinzu kommt das Meßproblem: Wie sollte man schon Pläne oder Absichten beschreiben – und wie erst recht sollte man ihre Eigenschaften durch Maß und Zahl ausdrücken?

Gewichtiger sind jedoch die *inhaltlichen* Einwände, die nicht nur von naturwissenschaftlicher Seite erhoben werden, sondern vor allem von Seiten der Philosophie. Sie betreffen die kategoriale Verschiedenheit von Erleben und Verhalten und stellen die prinzipielle Frage, ob es überhaupt denkbar ist, daß in einer naturwissenschaftlichen Erklärung von Verhalten ein Platz geschaffen werden kann, der subjektiven Sachverhalten wie Plänen, Absichten oder Zielen eine *kausale Rolle* zuweist. Wollte man nämlich in eine geschlossene neurobiologische Kausalerklärung einer Verhaltensleistung (in der z.B. von der Aktivität gewisser Hirnareale, Zellverbände und Neurone sowie schließlich gewisser Synapsen, Ionenkanäle oder gar Moleküle die Rede ist) auch ein subjektives Glied einbauen, käme man in eine doppelte Verlegenheit. Erstens wüßte man überhaupt nicht, wo man dieses Glied installieren sollte, und zweitens wüßte man noch viel weniger, wie man sich die kausale Wirkung dieses subjektiven Gliedes auf die nachfolgenden objektiven Glieder der Kette vorstellen sollte. Daß gewisse Merkmale von Ionenkanälen für gewisse Eigenschaften von Synapsen (und damit von Zellen, Zellverbänden usw.) ursächlich sind, können wir uns im Prinzip noch vorstellen – nicht dagegen, was in diesem chemisch-physiologischen Mechanismus etwa ein Willensimpuls kausal ausrichten könnte.

Die Idee der psychischen Kausalität, der unsere Alltagspsychologie so unbekümmert frönt, stellt uns also vor große Probleme, wenn wir sie wörtlich nehmen. Zwischen subjektiv beschreibbaren Erlebnistatbeständen und neurobiologisch beschreibbaren Verhaltensgrundlagen liegt eine kategoriale Kluft, die wir nicht überbrücken können – jedenfalls nicht mit unseren überkommenen Vorstellungen von kausalen Zusammenhängen (vgl. auch Teil V, in diesem Band).

Die experimentelle Forschung, über die wir hier berichtet haben, hat sich diese Einwände zu eigen gemacht – mit der Folge, daß ihr Forschungsprogramm einer methodischen und theoretischen Konzeption folgt, die mit den Überzeugungen der Alltagspsychologie nicht mehr viel gemein hat (vgl. hierzu Eimer, Kapitel 12, in diesem Band). Zum einen hat sie *in methodischer Hinsicht* ihre Vorgehensweise so angelegt, daß die Kriterien der Objektivität und der Meßbarkeit nicht verletzt werden. Für diese Probleme bietet die Praxis der modernen experimentellen Handlungsforschung zwar keine prinzipielle Lösung an, wohl aber einen Weg, sie zu umgehen. Dazu bedient sie sich eines ebenso einfachen wie wirksamen Verfahrens, das sich in vielen Bereichen der Psychologie bewährt hat: Variablen, die man nicht oder nur schwer messen kann, verwendet man nicht als abhängige Variablen (wo Messung unvermeidlich wäre), sondern als unabhängige Variablen, die man experimentell manipuliert. Mit anderen Worten: Wenn man auch nicht ohne weiteres messen kann, welche Pläne oder Absichten eine Person verfolgt, kann man sie immerhin gezielt *instruieren* – d.h. ihr *Aufgaben* stellen, in denen sie verschiedene Absichten verfolgen soll. Man umgeht also die Formulierung von Meßvorschriften für Erlebnisse dadurch, daß man Meßvorschriften durch Herstellungsvorschriften ersetzt, d.h. durch Vorschriften zur Erzeugung umschriebener Erlebnistatbestände.

Gleichzeitig bemüht sich die experimentelle Forschung, das Verhältnis von Intention und Handlung *in theoretischer Hinsicht* so zu bestimmen, daß den subjektiven

Willenserscheinungen eine Rolle zugewiesen wird, die die metaphysische Falle der psychischen Kausalität umgeht. Hier steht die Forschung vor einem unangenehmen Dilemma: Einerseits muß sie diese Falle vermeiden, wenn sie eine Theorie der Handlungssteuerung entwickeln will, die neurobiologisch anschlussfähig ist. Denn psychische Kausalität sollte man, wie wir sahen, geschlossenen biologischen Erklärungen nicht zumuten. Andererseits muß sie aber auch erklären können, wie Instruktionen und Intentionen wirksam sind, ohne daß psychische Kausalität im Spiel ist. Wie läßt sich z.B. erklären, daß Handlungsabsichten die Ausführung von Handlungen selbst hervorrufen oder beeinflussen können, ohne das Prinzip der psychischen Kausalität in Anspruch zu nehmen? Gibt es einen Ausweg aus diesem Dilemma?

Wir glauben, daß man nur dann beides widerspruchsfrei miteinander verbinden kann, wenn man eine neue Interpretation der Rolle der subjektiven Willenserscheinungen vornimmt. Diese Interpretation, die wir in Abschnitt 9.2 bereits anhand der von Libet berichteten Experimente über den Zusammenhang zwischen objektiver und subjektiver Handlungsinitiierung vorbereitet haben, entfernt sich weit von unserem alltagspsychologischen Vorverständnis und erscheint deshalb auf den ersten Blick unplausibel. Sie schreibt den Willenserscheinungen nicht die Rolle subjektiver *Ursachen* objektiver Handlungen zu, sondern nur noch die Rolle subjektiver *Begleiterscheinungen* irgendwelcher objektiven handlungsverursachenden Prozesse – Prozesse, die sich im Prinzip neurobiologisch beschreiben lassen. Natürlich erklärt diese Annahme noch nicht, wie und warum diese subjektiven Begleiterscheinungen zustandekommen und woher der personale Charakter rührt, der sie von den zugrundeliegenden subpersonalen Prozessen unterscheidet. Das einzige, was sie klärt, ist ihre funktionale Rolle: Sie sind *Begleiter* der eigentlichen verursachenden Prozesse – und nicht die verursachenden Prozesse selbst (vgl. hierzu Prinz, Kapitel 14, in diesem Band; ferner Prinz, im Druck).

Wenn wir die Idee der psychischen Kausalität durch die Idee der psychischen Begleitung ersetzen, ist viel gewonnen. Auf der einen Seite gibt sie Raum für psychologische Funktionstheorien mit geschlossener innerer Kausalität, und sie enthebt uns der Notwendigkeit, uns den Kopf darüber zu zerbrechen, wie subjektive Impulse in objektive Prozesse eingreifen können. Dadurch gewährleistet sie die Anschlussfähigkeit der psychologischen an die neurobiologische Theorie.

Zugleich bietet sie auf der anderen Seite eine Reinterpretation des methodischen Vorgehens der Forschung an: Die Übergänge von Aufgaben zu Absichten oder von Absichten zu Handlungen werden jetzt als funktionale Prozesse mit geschlossener innerer Kausalität verstanden, ohne daß psychische Kausalität im Spiel ist. Das schließt natürlich nicht aus, daß regelmäßig der *Wahrnehmungseindruck* psychischer Kausalität entsteht, wenn einzelne Komponenten dieser Prozesse zur Wahrnehmung gelangen.

Literatur

- Abrams, R. A.; Meyer, D. E.; Kornblum, S. *Eye-hand Coordination: Oculomotor Control in Rapid Aimed Limb Movements*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16 (1990) S. 248–267.
- Adams, J. A. *A Closed-Loop Theory of Motor Learning*. In: *Journal of Motor Behavior* 3 (1971) S. 111–150.

- Anson, J. G. *Memory Drum Theory: Alternative Tests and Explanations for the Complexity Effects in Simple Reaction Time*. In: *Journal of Motor Behavior* 14 (1982) S. 228–246.
- Aschersleben, G. *Afferente Informationen und die Synchronisation von Ereignissen*. Frankfurt (Lang) 1994.
- Aschersleben, G. *Knowledge of Results and the Timing of Actions*. Eingereicht 1996.
- Aschersleben, G.; Prinz, W. *Synchronizing Actions with Events: The Role of Sensory Information*. In: *Perception and Psychophysics* 57 (1995) S. 305–317.
- Bard, C.; Paillard, J.; Lajoie, Y.; Fleury, M.; Teasdale, N.; Forget, R.; Lamarre, Y. *Role of the Afferent Information in the Timing of Motor Commands: A Comparative Study with a Deafferent Patient*. In: *Neuropsychologia* 30 (1992) S. 201–206.
- Bard, C.; Paillard, J.; Teasdale, N.; Fleury, M.; Lajoie, Y. *Self-Induced vs. Reactive Triggering of Synchronous Hand and Heel Movement in Young and Old Subjects*. In: Requin, J.; Stelmach, G. E. (Hrsg.) *Tutorials in Motor Neuroscience*. Amsterdam (Kluwer). 1991 S. 189–196.
- Canic, M. J.; Franks, I. M. *Response Preparation and Latency in Patterns of Tapping Movements*. In: *Human Movement Science* 8 (1989) S. 123–139.
- Carlton, L. G. *Control Processes in the Production of Discrete Aiming Responses*. In: *Journal of Human Movement Studies* 5 (1979) S. 115–124.
- Carlton, L. G. *Processing Visual Feedback Information for Movement Control*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 7 (1981) S. 1019–1030.
- Chamberlin, C. J.; Magill, R. A. *Preparation and Control of Rapid, Multisegmented Responses in Simple and Choice Environments*. In: *Research Quarterly for Exercise and Sport* 60 (1989) S. 256–267.
- Coles, M. G. H. *Modern Mind-Brain Reading: Psychophysiology, Physiology, and Cognition*. In: *Psychophysiology* 26 (1989) S. 251–269.
- De Jong, R.; Coles, M. G.; Logan, G. D.; Gratton, G. *In Search of the Point of No Return: The Control of Response Processes*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16 (1990) S. 164–182.
- Deutsch, D. *The Generation of Two Isochronous Sequences in Parallel*. In: *Perception and Psychophysics* 34 (1983) S. 331–337.
- Donders, F. C. *On the Speed of Mental Processes*. In: *Acta Psychologica* 30 (1868/1969) S. 412–431.
- Dunlap, K. *Reactions on Rhythmic Stimuli, with Attempt to Synchronize*. In: *Psychological Review* 17 (1910) S. 399–416.
- Eimer, M. *Stimulus-Response Compatibility and Automatic Response Activation: Evidence from Psychophysiological Studies*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21 (1995) S. 837–854.
- Fitts, P. M. *The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling Amplitude of Movement*. In: *Journal of Experimental Psychology* 47 (1954) S. 381–391.
- Fitts, P. M.; Deininger, R. L. *S-R Compatibility: Correspondence Among Paired Elements Within Stimulus and Response Codes*. In: *Journal of Experimental Psychology* 48 (1954) S. 483–492.
- Fitts, P. M.; Peterson, J. R. *Information Capacity of Discrete Motor Responses*. In: *Journal of Experimental Psychology* 67 (1964) S. 103–112.
- Fraisse, P. *Les synchronisations sensori-motrices aux rythmes*. In: Requin, J. (Hrsg.) *Anticipation et Comportement*. Paris (CNRS) 1980. S. 233–257.
- Fraisse, P.; Voillaume, C. *Les repères du sujet dans la synchronisation et dans la pseudo-synchronisation*. In: *L'Année Psychologique* 71 (1971) S. 359–369.
- García-Colera, A.; Semjen, A. *Distributed Planning of Movement Sequences*. In: *Journal of Motor Behavior* 20 (1988) S. 341–367.
- Gehrke, J. *Auswirkungen der Manipulation der Bewegungsamplitude bei einer sensumotorischen Synchronisationsaufgabe*. In: Pawlik, K. (Hrsg.) *39. Kongreß der DGfPs*. Hamburg (Telesatz) 1994. S. 197.
- Gentilucci, M.; Fogassi, L.; Luppino, G.; Matelli, M.; Camarda, R.; Rizzolatti, G. *Functional Organization of Inferior Area 6 in the Macaque Monkey. I. Somatotopy and the Control of Proximal Movements*. In: *Experimental Brain Research* 71 (1988) S. 475–490.

- Georgopoulos, A. P.; Schwartz, A. B.; Kettner, R. E. *Neuronal Population Coding of Movement Direction*. In: *Science* 233 (1986) S. 1416–1419.
- Georgopoulos, A. P. *Neurophysiology of Reaching*. In: Jeannerod, M. (Hrsg.) *Attention and Performance XIII*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1990. S. 227–263.
- Glencross, D. J. *Response Complexity and the Latency of Different Movement Patterns*. In: *Journal of Motor Behavior* 5 (1973) S. 95–104.
- Graziano, M. S. A.; Yap, G. S.; Gross, C. G. *Coding of Visual Space by Premotor Neurons*. In: *Science* 266 (1994) S. 1054–1057.
- Haken, H. *Advanced Synergetics*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1983.
- Haken, H. *Synergetik. Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg New York (Springer) 1990.
- Haken, H.; Kelso, J. A. S.; Bunz, H. *A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movements*. In: *Biological Cybernetics* 51 (1985) S. 347–356.
- Hancock, P. A.; Newell, K. M. *The Movement Speed-Accuracy Relationship in Space-Time*. In: Heuer, H.; Kleinbeck, U.; Schmidt, K. H. (Hrsg.) *Motor Behavior. Programming, Control, and Acquisition*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1985. S. 153–188.
- Helmholtz, H. von. *Handbuch der physiologischen Optik*. 3. Aufl. ergänzt u. hrsg. von Nagel, W.; Gullstrand, A.; von Kries, J. Hamburg (Voss) 1909–1911 (1866: 1. Auflage).
- Henry, F. M. *Use of Simple Reaction Time in Motor Programming Studies: A Reply to Klapp, Wyatt, and Lingo*. In: *Journal of Motor Behavior* 12 (1980) S. 163–168.
- Henry, F. M.; Rogers, D. E. *Increased Response Latency for Complicated Movements and a Memory Drum Theory of Neuromotor Reaction*. In: *Research Quarterly for Exercise and Sport* 31 (1960) S. 448–458.
- Heuer, H. *Binary Choice Reaction Time as a Function of the Relationship Between Durations and Forms of Responses*. In: *Journal of Motor Behavior* 16 (1984) S. 392–404.
- Heuer, H. *Psychomotorik*. In: H. Spada (Hrsg.) *Lehrbuch Allgemeine Psychologie*. Bern (Huber) 1990. S. 495–559.
- Heuer, H. *Koordination*. In: Heuer, H.; Keele, S. W. (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition, Bd. 3: Psychomotorik*. Göttingen (Hogrefe) 1994. S. 147–222.
- Hommel, B. *Quellen der Interferenz beim Simon-Effekt: Eine Untersuchung zur Verwendung räumlicher Information bei der Auswahl und Planung einer einfachen Handlung*. Dissertation (Universität Bielefeld) 1990.
- Hommel, B. *Inverting the Simon Effect by Intention: Determinants of Direction and Extent of Effects of Irrelevant Spatial Information*. In: *Psychological Research/Psychologische Forschung* 55 (1993) S. 270–279.
- Hommel, B. *Stimulus-Response Compatibility and the Simon Effect: Toward an Empirical Clarification*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21 (1995) S. 764–775.
- Hulstijn, W.; Van Galen, G. P. *Programming in Handwriting: Reaction Time and Movement Time as a Function of Sequence Length*. In: *Acta Psychologica* 54 (1983) S. 23–49.
- Inhoff, A. W.; Rosenbaum, D. A.; Gordon, A. M.; Campbell, J. A. *Stimulus-Response Compatibility and Motor Programming of Manual Response Sequences*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10 (1984) S. 724–733.
- Ivry, R. B.; Keele, S. W. *Timing Functions of the Cerebellum*. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 1 (1989) S. 136–152.
- Jagacinski, R. J.; Marshburn, E.; Klapp, S. T.; Jones, M. R. *Tests of Parallel Versus Integrated Structure in Polyhythmic Tapping*. In: *Journal of Motor Behavior* 20 (1988) S. 416–442.
- Jeannerod, M. *Intersegmental Coordination During Reaching at Natural Visual Objects*. In: Long, J.; Baddeley, A. (Hrsg.) *Attention and Performance*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1981. Bd. 9, S. 153–169.
- Jeannerod, M. *The Timing of Natural Prehension Movements*. In: *Journal of Motor Behavior* 16 (1984) S. 235–254.
- Jeannerod, M. *The Neural and Behavioural Organization of Goal-Directed Movements*. Oxford (Clarendon Press) 1988.
- Jeannerod, M. *Reichen und Greifen. Die parallele Spezifikation visuomotorischer Kanäle*. In: Heuer, H.; Keele, S. W. (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition, Bd. 3: Psychomotorik*. Göttingen (Hogrefe) 1994. S. 509–574.

- Jones, B. *The Role of Efference in Motor Control: A Centralist Emphasis for Theories of Skilled Performance*. In: Landers, D. M.; Christina, R. W. (Hrsg.) *Psychology of Motor Behavior and Sport – 1977*. Champaign, IL (Human Kinetics) 1978. S. 36–58.
- Keele, S. W. *Movement Control in Skilled Motor Performance*. In: *Psychological Bulletin* 70 (1968) S. 387–403.
- Keele, S. W. *Motor Control*. In: Boff, K. R.; Kaufman, L.; Thomas, J. P. (Hrsg.) *Handbook of Human Perception and Performance*. New York (Wiley) 1986. Bd. 2, S. 30.1–30.60.
- Kelso, J. A. S. *On the Oscillatory Basis of Movement*. In: *Bulletin of the Psychonomic Society* 18 (1981) S. 63f.
- Kelso, J. A. S.; deGuzman, G. C. *Order in Time: How the Cooperation Between the Hands Informs the Design of the Brain*. In: Haken, H. (Hrsg.) *Neural and Synergetic Computers*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1988. S. 180–196.
- Klapp, S. T. *Implicit Speech Inferred from Response Latencies in Same-Different Decisions*. In: *Journal of Experimental Psychology* 91 (1971) S. 262–267.
- Klapp, S. T. *Syllable-Dependent Pronunciation Latencies in Number Naming: A Replication*. In: *Journal of Experimental Psychology* 102 (1974) S. 1138–1140.
- Klapp, S. T. *Doing Two Things at Once: The Role of Temporal Compatibility*. In: *Memory and Cognition* 7 (1979) S. 375–381.
- Klapp, S. T.; Erwin, C. I. *Relation Between Programming Time and Duration of the Response Being Programmed*. In: *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* 2 (1976) S. 591–598.
- Klemmer, E. T. *Time Uncertainty in Simple Reaction Time*. In: *Journal of Experimental Psychology* 51 (1956) S. 179–184.
- Klemmer, E. T. *Simple Reaction Time as a Function of Time Uncertainty*. In: *Journal of Experimental Psychology* 54 (1957) S. 195–200.
- Kohler, I. *Über Aufbau und Wandlungen der Wahrnehmungswelt*. Wien (Rohrer) 1951.
- Kornblum, S. *Dimensional Overlap and Stimulus Relevance in S-R Response and S-S Compatibility*. In: Stelmach, G. E.; Requin, J. (Hrsg.) *Tutorials in Motor Behavior II*. Amsterdam (North-Holland) 1992. S. 743–777.
- Leonard, J. A. *Tactical Choice Reactions: I*. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 11 (1959) S. 76–83.
- Libet, B. *Unconscious Cerebral Initiative and the Role of Conscious Will in Voluntary Action*. In: *Behavioral and Brain Sciences* 8 (1985) S. 529–566.
- Libet, B. *Are the Mental Experiences of Will and Self-Control Significant for the Performance of a Voluntary Act?* In: *Behavioral and Brain Sciences* 10 (1987) S. 783–786.
- Libet, B. *The Timing of a Subjective Experience*. In: *Behavioral and Brain Sciences* 12 (1989) S. 183–185.
- Logan, G. D. *On the Ability to Inhibit Complex Movements: A Stop-Signal Study of Typewriting*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 8 (1982) S. 778–792.
- Loveless, N. E. *Direction-of-Motion Stereotypes: A Review*. In: *Ergonomics* 5 (1961) S. 357–383.
- Marteniuk, R. G.; MacKenzie, C. L. *Information Processing in Movement Organization and Execution*. In: Nickerson, R. S. (Hrsg.) *Attention and Performance*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1980. Bd. 8, S. 29–57.
- Marteniuk, R. G.; Leavitt, J. L.; MacKenzie, C. L.; Athenes, S. *Functional Relationships Between Grasp and Transport Components in a Prehension Task*. In: *Human Movement Science* 9 (1990) S. 149–176.
- Mates, J.; Radil, T.; Pöppel, E. *Cooperative Tapping: Time Control Under Different Feedback Conditions*. In: *Perception and Psychophysics* 52 (1992) S. 691–704.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E. et al. *Optimality in Human Motor Performance: Ideal Control of Rapid Aimed Movements*. In: *Psychological Review* 95 (1988) S. 340–370.
- Meyer, D. E.; Smith, J. E.; Kornblum, S.; Abrams, R. A.; Wright, C. E. *Speed-Accuracy Tradeoffs in Aimed Movements: Toward a Theory of Rapid Voluntary Action*. In: Jeannerod, M. (Hrsg.) *Attention and Performance*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1990. Bd. 13, S. 173–226.

- Michon, J. A. *Timing in Temporal Tracking*. Unveröffentlichte Dissertation, Soesterberg, NL (Institute for Perception) 1967.
- Müsseler, J. *Wahrnehmung und Handlungsplanung. Effekte kompatibler und inkompatibler Reize bei der Initiierung und Ausführung von Reaktionssequenzen*. Aachen (Shaker) 1995.
- Müsseler, J.; Prinz, W. *Action Planning During the Presentation of Stimulus Sequences: Effects of Compatible and Incompatible Stimuli*. In: *Psychological Research* 59 (1996) S. 48–63.
- Neumann, O. *Zur Funktion der selektiven Aufmerksamkeit für die Handlungssteuerung*. In: *Sprache und Kognition* 6 (1987) S. 107–125.
- Paillard, J. *Quelques données psychophysiologiques relatives au déclenchement de la commande motrice*. In: *L'Année Psychologique* 48 (1949) S. 28–47.
- Paulignan, Y.; McKenzie, C.; Marteniuk, R.; Jeannerod, M. *The Coupling of Arm and Finger Movements During Prehension*. In: *Experimental Brain Research* 79 (1990) S. 431–436.
- Peper, C. E.; Beek, P. J.; Van Wieringen, P. C. W. *Bifurcations in Polyhythmic Tapping: In Search of Feyer Principles*. In: Requin, J.; Stelmach, G. E. (Hrsg.) *Tutorials in Motor Neuroscience* Dordrecht (Kluwer) 1991. S. 413–431.
- Posner, M. I. *Chronometric Explorations of Mind*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1978.
- Prinz, W. *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1983.
- Prinz, W. *A Common Coding Approach to Perception and Action*. In: Neumann, O.; Prinz, W. (Hrsg.) *Relationships Between Perception and Action: Current Approaches*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1990b. S. 167–201.
- Prinz, W. *Why Don't We Perceive our Brain States?* In: *European Journal for Cognitive Psychology* 4 (1992) S. 1–20.
- Prinz, W. *Explaining Voluntary Action: The Role of Mental Content*. In: Machamer, P.; Carrier, M. (Hrsg.) *Philosophy and the Sciences of the Mind*. (im Druck).
- Prinz, W.; Aschersleben, G.; Hommel, B.; Vogt, S. *Handlungen als Ereignisse*. In: Dörner, D.; van der Meer, E. (Hrsg.) *Das Gedächtnis: Probleme, Trends, Perspektiven*. Göttingen (Hogrefe) 1995. S. 129–168.
- Redding, G. M.; Wallace, B. *Adaptive Eye-Hand Coordination: Implications of Prism Adaptation for Perceptual-Motor Organization*. In: Proteau, L.; Elliott, D. (Hrsg.) *Vision and Motor Control*. Amsterdam (North-Holland) 1992. S. 105–127.
- Rosenbaum, D. A. *Human Motor Control*. New York (Academic Press) 1991.
- Rosenbaum, D. A.; Krist, H. *Vorbereitung von Bewegungen*. In: Heuer, H.; Keele, S. W. (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition, Bd. 3: Psychomotorik*. Göttingen (Hogrefe) 1994. S. 3–85.
- Rosenbaum, D. A.; Gordon, A. M.; Stillings, N. A.; Feinstein, M. H. *Stimulus-Response Compatibility in the Programming of Speech*. In: *Memory and Cognition* 15 (1987) S. 217–224.
- Sanders, A. G. *Psychologie der Informationsverarbeitung*. Bern (Huber) 1971.
- Schmidt, R. A. *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. Champaign, IL (Human Kinetics) 1988.
- Schmidt, R. A.; Zelaznik, H. N.; Hawkins, B.; Frank, J. S.; Quinn, J. T. *Motor-Output Variability: A Theory for the Accuracy of Rapid Motor Acts*. In: *Psychological Review* 86 (1979) 415–451.
- Schöner, G.; Kelso, J. A. S. *A Synergetic Theory of Environmentally Specified and Learned Patterns of Movement Coordination. 1. Relative Phase Dynamics*. In: *Biological Cybernetics* 58 (1988a) S. 71–80.
- Schöner, G.; Kelso, J. A. S. *A Synergetic Theory of Environmentally Specified and Learned Patterns of Movement Coordination. 2. Component Oscillator Dynamics*. In: *Biological Cybernetics* 58 (1988b) S. 81–89.
- Shaffer, L. H. *Performances of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in Motor Programming*. In: *Cognitive Psychology* 13 (1981) S. 326–369.
- Shaffer, L. H. *Rhythm and Timing in Skill*. In: *Psychological Review* 89 (1982) S. 109–122.
- Shibasaki, H.; Barrett, G.; Halliday, E.; Halliday, A. M. *Cortical Potentials Associated with Voluntary Foot Movement in Man*. In: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 52 (1981). S. 507–516.

- Simon, J. R.; Rudell, A. P. *Auditory S-R Compatibility: The Effect of an Irrelevant Cue on Information Processing*. In: *Journal of Applied Psychology* 51 (1967) S. 300–304.
- Simon, J. R.; Hinrichs, J. V.; Craft, J. L. *Auditory S-R Compatibility: Reaction Time as a Function of Ear-Hand Correspondence and Ear-Response Location Correspondence*. In: *Journal of Experimental Psychology* 86 (1970) S. 97–102.
- Smith, G. A. *Studies in Compatibility and a New Model of Choice Reaction Time*. In: Dornic, S. (Hrsg.) *Attention and Performance VI*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1977. S. 27–48.
- Smith, G. A. *Studies of Compatibility and Investigations of a Model of Reaction Time*. Dissertation (University of Adelaide) 1978.
- Spijkers, W. *Sehen und Handeln. Die Rolle visueller Information bei zielgerichteten Bewegungen*. Aachen (Shaker) 1993.
- Spijkers, W.; Albracht, K.; Lochner, P. M. *Zur Bedeutung des partiellen visuellen Feedback bei diskreten Zielbewegungen*. In: *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie* 35 (1988) S. 463–475.
- Spijkers, W.; Lochner, P. *Partial Visual Feedback and Spatial End-Point Accuracy of Discrete Aiming Movements*. In: *Journal of Motor Behavior* 26 (1994) S. 283–295.
- Sternberg, S.; Knoll, R. L.; Monsell, S.; Wright, C. E. *Motor Programs and Hierarchical Organization in the Control of Rapid Speech*. In: *Phonetica* 45 (1988) S. 175–197.
- Sternberg, S.; Monsell, S.; Knoll, R. L.; Wright, C. E. *The Latency and Duration of Rapid Movement Sequences: Comparisons of Speech and Typewriting*. In: Stelmach, G. E. (Hrsg.) *Information Processing in Motor Control and Learning*. New York (Academic Press) 1978. S. 117–152.
- Stevens, L. T. *On the Time Sense*. In: *Mind* 11 (1886) S. 393–404.
- Thomassen, A. J. W.; Van Galen, G. P. *Handwriting as a Motor Task: Experimentation, Modelling, and Simulation*. In: Summers, J. J. (Hrsg.) *Approaches to the Study of Motor Control and Learning*. Amsterdam (Elsevier) 1992. S. 113–144.
- Verwey, W. B. *Buffer Loading and Chunking in Sequential Keypressing*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 22 (1996) S. 544–562.
- Van Galen, G. P. *Handwriting: Issues for a Psychomotor Theory*. In: *Human Movement Science* 10 (1991) S. 165–191.
- Vince, M. A. *Corrective Movements in a Pursuit Task*. In: *Journal of Experimental Psychology* 1 (1948) S. 85–103.
- Vorberg, D.; Hambuch, R. *On the Temporal Control of Rhythmic Performance*. In: Requin, J. (Hrsg.) *Attention and Performance VII*. Hillsdale, NJ (Erlbaum) 1978. S. 535–555.
- Vorberg, D.; Wing, A. M. *Modelle für Variabilität und Abhängigkeit bei der zeitlichen Steuerung*. In: Heuer, H.; Keele, S. W. (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition, Bd. 3: Psychomotorik*. Göttingen (Hogrefe) 1994. S. 223–320.
- Vos, P. G.; Helsen, E. L.; van Kruysbergen, N. *Tracking Simple Rhythms Under Pseudo-Synchronization Conditions*. In: *Proceedings of the Fourth Rhythm Workshop: Rhythm Perception and Production*. Bourges, France (1992) S. 37–42.
- Wallace, S. A.; Weeks, D. L. *Temporal Constraints in the Control of Prehensive Movement*. In: *Journal of Motor Behavior* 20 (1988) S. 81–105.
- Wallace, S. A.; Weeks, D. L.; Kelso, J. A. S. *Temporal Constraints in Reaching and Grasping Behavior*. In: *Human Movement Science* 9 (1990) S. 69–93.
- Welford, A. T. *Choice Reaction Time: Basic Concepts*. In: Welford, A. T. (Hrsg.) *Reaction Times*. London (Academic Press) 1980. S. 73–128.
- Wing, A. M. *Perturbations of Auditory Feedback Delay and the Timing of Movement*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 3 (1977) S. 175–186.
- Wing, A. M. *The Long and Short of Timing in Response Sequences*. In: Requin, J.; Stelmach, G. E. (Hrsg.) *Tutorials in Motor Neuroscience*. Amsterdam (Kluwer) 1980. S. 469–485.
- Wing, A. M.; Church, R. M.; Gentner, D. R. *Variability in the Timing of Responses During Repetitive Tapping with Alternate Hands*. In: *Psychological Research* 51 (1989) S. 28–37.
- Wing, A. M.; Kristofferson, A. B. *Response Delay and the Timing of Discrete Motor Responses*. In: *Perception and Psychophysics* 14 (1973a) S. 5–12.

- Wing, A. M.; Kristofferson, A. B. *The Timing of Interresponse Intervals*. In: *Perception and Psychophysics* 13 (1973b) S. 455–460.
- Wing, A. M.; Turton, A.; Fraser, C. *Grasp Size and Accuracy of Approach in Reaching*. In: *Journal of Motor Behavior* 18 (1986) S. 245–260.
- Wolff, P. *Saccadic Exploration and Perceptual-Motor Learning*. In: *Acta Psychologica* 63 (1986) S. 263–280.
- Wolff, P. *Wahrnehmungslernen durch Blickbewegungen*. In: Neumann, O. (Hrsg.) *Perspektiven der Kognitionspsychologie*. Berlin, Heidelberg, New York (Springer) 1985. S. 57–105.
- Woodworth, R. S. *The Accuracy of Voluntary Movement*. In: *Psychological Review Monographs Suppl.* 13 (1899).
- Woodworth, R. S.; Schlosberg, H. *Experimental Psychology*. New York (Holt, Rinehart & Winston) 1954.
- Yamaguchi, S.; Knight, R. T. *P300 Generation by Novel Somatosensory Stimuli*. In: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 78 (1991) S. 50–55.
- Yamaguchi, S.; Knight, R. T. *Effects of Temporal-Parietal Lesions on the Somatosensory P3 to Lower Limb Stimulation*. In: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology: Evoked Potentials* 84 (1992) S. 139–148.

Weiterführende Literatur

- Aschersleben, G. *Afferente Informationen und die Synchronisation von Ereignissen*. Frankfurt (Lang) 1994.
- Heuer, H.; Keele, S. W. (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition, Band III: Psychomotorik*. Göttingen (Hogrefe) 1994; hier insbesondere die Beiträge von Heuer, H. (*Koordination*, S. 147–222), Rosenbaum, D. A.; Kirst, H. (*Vorbereitung von Bewegungen*, S. 3–85), Vorberg, D.; Wing, A. M. (*Modelle für Variabilität und Abhängigkeit bei der zeitlichen Steuerung*, S. 223–320) und Jeannerod, M. (*Reichen und Greifen*, S. 509–574).
- Hommel, B.; Prinz, W. *Theory of S-R Compatibility*. Amsterdam (Elsevier) 1996.
- Keele, S. W. *Motor Control*. In: Boff, K. R.; Kaufman, L.; Thomas, J. P. (Hrsg.) *Handbook of Perception and Human Performance*. New York (Wiley) 1986. Bd. 2, S. 30.1–30.60.
- Prinz, W.; Aschersleben, G.; Hommel, B.; Vogt, S. *Handlungen als Ereignisse*. In: Dörner, D.; van der Meer, E. (Hrsg.) *Das Gedächtnis: Probleme – Trends – Perspektiven*. Göttingen (Hogrefe) 1995. S. 129–168.