

W. Klein

Koordination und Ablenkung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Salzburg

Dortmund, im November 2001

Zusammenfassung

Die gleichzeitige Ausführung von zwei Bewegungen ist von verschiedenen Gesetzmäßigkeiten geprägt. Die Bewegungen können sich störend oder fördernd aufeinander auswirken oder unabhängig von einander ablaufen. Diese strukturellen Randbedingungen der Koordination wurden in drei Experimenten untersucht. Die besondere Methode dabei war, Veränderungen der Koordination durch Ablenkung sichtbar zu machen, um auf diesem Weg etwas über ihre Funktionsweise zu erfahren.

In den ersten beiden Experimenten sollte Ablenkung höhere Steuerfunktionen beeinträchtigen, um Einflüsse des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes in der Bewegung deutlicher sichtbar zu machen. Im ersten Experiment wurden periodische Kopf- und Lenkbewegungen durchgeführt, im zweiten diskrete Lenkbewegungen bei verschiedenen Kopfhaltungen.

Das Ausschalten höherer Funktionen durch Ablenkung gelang nicht obwohl Ablenkung Auswirkung auf verschiedene Parameter der Bewegung hatte. Jene Steuerfunktionen, die den Reflex überlagern, scheinen von Ablenkung unabhängig zu sein.

Im dritten Experiment wurde die Hypothese der transienten Kopplung (Heuer, 1993) mit der Methode der Ablenkung untersucht. Ablenkung sollte den Zeitpunkt vollständiger Entkopplung verzögern.

Ablenkung hatte aber keinen Einfluss auf die Dauer der Entkopplung. Dies bekräftigte und erweiterte das Ergebnis der ersten beiden Experimente, dass sowohl an der Kopplung selbst als auch an ihrer Entkopplung Steuermechanismen beteiligt sind, die von Ablenkung nicht beeinflusst werden.

Manche Parametern der Bewegungssteuerung wurden durch Ablenkung verändert und andere nicht. Eine mögliche Erklärung für diese unterschiedlichen Steuerungsanteile könnte sein, dass sie in unterschiedlichen anatomischen Strukturen grundgelegt sind.

Inhalt

Koordination und Ablenkung	1
Zusammenfassung.....	2
Inhalt	3
Widmung für die Vergangenheit.....	6
Widmung für die Zukunft	7
Danksagung.....	8
1 Theorien zu Koordination und Aufmerksamkeit.....	9
1.1 Koordination menschlicher Bewegung	9
1.1.1 Begriffsbestimmung.....	9
1.1.2 Einleitung	9
1.1.3 Das motorische Programm.....	9
1.1.4 Merkmale periodischer Bewegungen.....	11
1.1.5 Das HKB Modell	12
1.1.6 Parametrische Kopplung	13
1.1.7 Gegenüberstellung.....	14
1.2 Ablenkung.....	15
1.2.1 Einleitung	15
1.2.2 Kapazität	15
1.2.3 Ressourcenmodelle	16
1.2.4 Energetische Modelle.....	17
1.2.5 Gating.....	19
1.3 Strukturelle Randbedingungen und Kopplung	20
1.3.1 Fehler als Fenster	21
1.4 Zusammenfassung und Fragestellung	21
2 Kopf – Arm Koordination bei periodischen Bewegungen.....	23
2.1 Einleitung.....	23
2.1.1 Kopplung bei periodischen Bewegungen	24
2.1.2 Veränderung der Kopplung.....	26
2.1.3 Der asymmetrische, tonische Halsreflex.....	36
2.1.4 Zusammenfassung und Fragestellung.....	37
2.1.5 Hypothesen.....	38
2.2 Versuchsdarstellung.....	38
2.2.1 Versuchspersonen	38
2.2.2 Versuchsaufbau	38
2.2.3 Messung	40
2.2.4 Vektormodell.....	40
2.2.5 Aufgabe	41
2.2.6 Reihenfolge	42
2.2.7 Kennwerte	43
2.2.8 Variablen und Design.....	43
2.3 Ergebnisse.....	44
2.3.1 Allgemeine Beschreibung der Daten	44
2.3.2 Phasenvariabilität	45
2.3.3 Phasenverschiebung	45
2.3.4 Bewegungsweiten	48
2.3.5 Weitenvariabilität.....	48
2.3.6 Periodenvariabilität	49
2.3.7 Seiteneffekte.....	50

2.4	Diskussion.....	51
2.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	51
2.4.2	Die Beteiligung des Reflexes	52
2.4.3	Unterschiedliche Arten höherer Steuerfunktionen.....	53
3	Kopf – Arm Koordination bei diskreten Bewegungen	55
3.1	Einleitung.....	55
3.1.1	Effekte von Voraktivierung.....	56
3.1.2	Kopplung auf Vorbereitungsebene	58
3.1.3	Fragestellung	59
3.1.4	Hypothesen.....	59
3.2	Versuchsdarstellung.....	60
3.3	Ergebnisse	62
3.3.1	Allgemeine Beschreibung der Daten	62
3.3.2	Reaktionszeit	62
3.3.3	Bewegungsweiten	64
3.3.4	Bewegungsdauern	65
3.3.5	Einfluss des Zeitpunkts	66
3.4	Diskussion.....	68
3.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	68
3.4.2	Durch Ablenkung verlängerte Reaktionszeit	68
3.4.3	Durch Ablenkung verkürzte Bewegungszeiten.....	69
3.4.4	Fehlende Interaktionen.....	70
3.5	Zusammenfassung	70
4	Zweihandkoordination	72
4.1	Einleitung.....	72
4.1.1	Die Hypothese der transienten Kopplung	73
4.1.2	Fragestellung: Die Hypothese der verzögerten Entkopplung	74
4.2	Versuchsdarstellung.....	74
4.2.1	Versuchspersonen	74
4.2.2	Versuchsaufbau und Aufgabe	75
4.2.3	Zeitablauf eines Versuchsdurchganges	75
4.2.4	Reihenfolge der Blöcke.....	76
4.2.5	Messung	76
4.2.6	Kennwerte	77
4.2.7	Design	77
4.3	Ergebnisse	77
4.3.1	Sternbergaufgabe.....	77
4.3.2	Allgemeine Beschreibung der Daten	78
4.3.3	Reaktionszeit	78
4.3.4	Bewegungsweiten	79
4.3.5	Bewegungsdauer	80
4.3.6	Seiteneffekte.....	80
4.4	Diskussion.....	82
4.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	82
4.4.2	Verzögerte Entkopplung	82
4.4.3	Weiterführende Gedanken	83
5	Allgemeine Diskussion.....	84
5.1.1	Überblick über die Ergebnisse	84
5.1.2	Ordnung der Ergebnisse.....	85

5.1.3	Neurophysiologische Befunde	86
5.1.4	Erklärung der Ergebnisse nach diesem Modell.....	87
5.1.5	Psychologische Modelle.....	88
5.1.6	Zusammenfassung.....	89
Literatur		90
Curriculum Vitae.....		98

Widmung für die Vergangenheit

Edles verehren,
Kräfte vereinen,
Leben vermehren,
Mehr sein als scheinen.



In liebevollem Gedenken an meinen
Vater, Reinhold Klein,
der die Fertigstellung dieser Arbeit nicht mehr erleben durfte.

Widmung für die Zukunft



Diese Arbeit ist meinem Patenkind Dagmar gewidmet.
Und, danke, dass du so „cool“ da liegst!

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. H. Heuer. Er hat mein Denken und Tun geleitet und so das Entstehen dieser Arbeit möglich gemacht. Die Stunden fachlicher Diskussion in seinem Büro zählen zu den Sternstunden meines Lebens.

Auch bei meinem Salzburger Betreuer Prof. Dr. G. Kleiter möchte ich mich für seine jahrelange, kameradschaftliche und aufmunternde Unterstützung bedanken.

Ohne die tatkräftige Unterstützung meiner Familie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke vor allem für Euren unerschütterlichen Glauben an mein Durchhaltevermögen. Was blieb mir da anders übrig, als ihn nicht zu enttäuschen!

Eine besondere Freude ist es mir aber auch, mich bei allen lieben Kolleginnen und Kollegen des IfADo für Unterstützung auf verschiedensten Ebenen zu bedanken.

1 Theorien zu Koordination und Aufmerksamkeit

1.1 Koordination menschlicher Bewegung

1.1.1 Begriffsbestimmung

In der Alltagssprache ist von koordinierter Bewegung nur dann die Rede, wenn erstens mindestens zwei unterscheidbare Bewegungen gleichzeitig ausgeführt werden und zweitens das Zusammenspiel dieser Bewegungen einem gewissen ästhetischen Anspruch genügt. Koordination ist in diesem Sinne eine Bezeichnung für die Qualität des Zusammenspiels der Bewegungen. Im Gegensatz dazu bezeichnet Koordination in der Kognitionspsychologie, und damit auch in dieser Arbeit, das Zusammenspiel der Bewegungen selbst. Nicht-koordinierte Bewegungen gibt es per definitionem nicht. Die Frage ist daher nicht ob, sondern wie die Bewegungen koordiniert sind.

Inhalt dieser Arbeit sind kognitionspsychologische Modelle zur Koordination menschlicher Bewegung. Damit ist gemeint, dass es eigentlich nicht darum geht, wie die Bewegungen koordiniert sind, sondern wie sie koordiniert werden, also welche kognitiven Steuervorgänge zu den beobacht- und messbaren Phänomenen führen. Qualitätsmerkmale der Bewegung werden zwar gemessen, der zu modellierende Tatbestand ist aber jener Anteil der Bewegungssteuerung, der das Zusammenspiel der Bewegungen bestimmt. In dieser Arbeit ist daher von Koordination immer dann die Rede, wenn es um zentralnervöse Vorgänge geht, deren Ziel oder Ergebnis das Zusammenspiel zweier Bewegungen ist.

Der sprachlichen Vielfalt wegen wird im Laufe dieser Arbeit des öfteren der Begriff Bewegungssteuerung verwendet. Es sei an dieser Stelle darauf hin gewesen, dass dann immer nur jener Anteil der Bewegungssteuerung gemeint ist, der die Koordination betrifft.

1.1.2 Einleitung

Es scheint ein Wesensmerkmal menschlicher Bewegung zu sein, dass es zwar grundsätzlich möglich ist, zwei oder mehr verschiedene Bewegungen gleichzeitig auszuführen, diese zwei Bewegungen aber nie vollkommen unabhängig sind, sondern wechselseitigen Einfluss aufeinander ausüben. Dass es sich hierbei nicht um spezifische Aspekte menschlicher Bewegungssteuerung, sondern viel mehr um allgemeine Prinzipien der Koordination bei höheren Tieren handelt, konnte von Holst (1939) anhand zahlreicher Untersuchungen zu Flossenbewegungen von Fischen zeigen. Er gab diesen beiden Aspekten der Koordination die Namen „Beharrungstendenz“ und „Magneteffekt“. Die Beharrungstendenz ist das Bestreben der einzelnen Bewegung, ihre Eigenheit und Unabhängigkeit zu bewahren. Der Magneteffekt hingegen führt zu Überlagerungseffekten, Anpassungserscheinungen und gegenseitiger Beeinflussung der beiden Bewegungen. Alle Theorien menschlicher Bewegungskoordination sind letztlich Versuche, diesen beiden Anteilen Rechnung zu tragen und sie aus unterschiedlicher Perspektive, mit unterschiedlichen Zielen und Konzepten, in wissenschaftlichem Rahmen zu modellieren. Einige dieser Konzepte und Modelle sollen im nun folgenden Abschnitt dargestellt werden.

1.1.3 Das motorische Programm

Bei Beschäftigung mit psychologischen Theorien zur Steuerung menschlicher Bewegung stößt man unweigerlich und sehr schnell auf das Konzept des Bewegungsprogramms. Da es sich hierbei um eines der meist diskutierten Konzepte der Bewegungsforschung handelt und sein inhaltlicher Wert bis heute nicht an Bedeutung verloren hat, soll eine kurze geschichtliche und inhaltliche Betrachtung dieses Konzeptes den Anfang dieses Abschnittes bilden.

In der Zeit der frühen Kognitionspsychologie entstand dieses Konzept im Spannungsfeld zwischen Feedforward- und Feedback-Mechanismen der Steuerung von Bewegung. Das Reiz-Reaktions-Prinzip des Behaviorismus war ein deutliches Beispiel für einen Feedforward-Prozess gewesen. Der Reiz bestimmt den Beginn und die Qualitätsmerkmale der Reaktion. Die Ausführung der Reaktion hat aber keinerlei Auswirkungen auf den Reiz.

Die Einführung der TOTE-Einheit (Miller, Galanter und Pribram, 1960) als Regelmodell mit Einbeziehung von Feedback beendete das strenge Regime von Feedforward-Prozessen. Neben einer einmaligen, im vorhinein bestimmten, Abfolge einer bestimmten Reaktion auf einen Reiz hin, traten nun Prüfkreise als weitere Möglichkeit der Verhaltenssteuerung in Erscheinung. TOTE heißt Test-Operate-Test-Exit. Von einem bestimmten Anfangszustand aus, wird eine bestimmte Operation so lange durchgeführt, bis der angestrebte Endzustand erreicht wird. Dazu bedarf es eines ständigen Vergleichs zwischen Istzustand und Sollzustand. Merkmale der Reaktion bestimmen den weiteren Verlauf der begonnenen Handlung. In der Motorik machte sich besonders Adams mit seiner „Closed Loop Theory“ (Adams, 1976) um das systematische Einbeziehen von Feedback in die Theorie der Bewegungssteuerung verdient.

Feedback, und vor allem seine Verwendung zur Feineinstellung, hat zweifellos eine zentrale Bedeutung in der Steuerung menschlicher Bewegung. Daneben muss es aber auch Steuerprozesse geben, die ohne Verwendung von Feedback auskommen. Die Fingerbewegungen beim Klavierspielen sind zum Beispiel so schnell, dass Verarbeitung von Feedback in der kurzen, zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich ist (Lashley, 1951). Die Möglichkeit, Bewegung in einem Feedforward-Modus auszuführen, wird mit dem motorischen Programm modelliert. In seiner ursprünglichen Definition ist ein motorisches Programm „a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins, and that allows the sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback“ (Keele, 1968).

Mit dem motorischen Programm sind also seit seiner ersten Definition zwei wesentliche, inhaltliche Aspekte verknüpft. Erstens, dass es sich hierbei um etwas handelt, was sich vor dem Beginn der Bewegung abspielt. Und zweitens, dass Gruppen von Merkmalen der Bewegung zu Beginn der Ausführung festgelegt sind.

Besonders der zweite Aspekt, also Gruppen von im vornehin festgelegten Merkmalen von Bewegung, lässt sich gut im Alltag beobachten. Es gibt Bewegungsmuster, die in ähnlicher Form häufiger vorkommen. So muss zum Beispiel das häufig verwendete Muster „gehen“ je nach Untergrundbeschaffenheit an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst werden. Ähnlich, wie es in der Musik Themen mit Variationen gibt, scheint menschliche Bewegung ein feines Spiel von motorischen Varianzen und Invarianzen zu sein (Überblick bei Heuer 1995, Schmidt et al, 1998). Aufbauend auf das, in der Tradition der Denkpsychologie noch sehr geläufige, im Behaviorismus aber in Vergessenheit geratene, Konzept des Schemas (Bartlett, 1932, zit. nach Rosenbaum, 1991), formulierte R.A. Schmidt diesen Umstand im Konzept des „generalisierten motorischen Programms“ (Schmidt, 1985). Dieses Konzept enthält im Wesentlichen den Vorschlag, zwischen allgemeinen, häufig vorkommenden, Bewegungsstrukturen (Programmen) und Parametern zu unterscheiden, die diese allgemeineren Muster für den Einzelfall anpassen.

Zur Bestimmung der Parameter werden nach Schmidt (1975, 1982) motorische Schemas herangezogen. Im Gegensatz zu der vor allem in der Theorie der Handlungsplanung üblichen Verwendung des Schemabegriffs als geschlossene, als ganzes abrufbare Untersysteme, ist jedoch unter dem motorischen Schema eine Gruppe von Zuordnungsregeln zu verstehen. Schmidt postulierte voneinander unterscheidbare Schemata sowohl für Forward-Prozesse der

Bewegungssteuerung (Recall-Schema) als auch für die Verwertung von sensorischen Einflüssen (Recognition-Schema).

Heuer erweiterte das Konzept dahingehend, dass es sich bei einem motorischen Programm ja nicht unbedingt um eine bestimmte Menge an gespeicherter Information, sondern um eine generative Struktur handeln könnte (Heuer, 1994). Darunter ist jene Information zu verstehen, die nötig ist, um diese bestimmte Menge an Information zu erzeugen. Oder, wie Rosenbaum es ausdrückt: „A motor program can now be viewed as a functional state that allows particular movements, or classes of movements, to occur.“ (Rosenbaum, 1991, s. 109).

Aus formalen und aus inhaltlichen Gründen wurde die Theorie der generalisierten Bewegungsprogramme kritisiert und schließlich aufgegeben. Die formalen Gründe betrafen im wesentlichen Kritik an der „Computermetapher“, das menschliche Gehirn sei nun mal kein Computer. Vorgänge wie sie im Computer ablaufen können daher für die Modellierung menschlicher Bewegungssteuerung nicht dienlich sein (z.B. Kelso, 1981). Inhaltlich stellte es sich als undurchführbares Unterfangen heraus, sowohl zwischen Programm und Parametern als auch zwischen den verschiedenen Programmen selbst, eindeutig zu unterscheiden (Heuer, 1994).

So blieb vom Konzept des generalisierten, motorischen Programms letztlich nur die Anforderung an weitere Theoriebildung, auch den Umstand zu berücksichtigen, dass bestimmte Gruppen von Bewegungsmerkmalen schon vor Beginn der Bewegungsausführung festgelegt werden und dass dieser Vorgang Zeit benötigt und von strukturellen Randbedingungen des motorischen Systems abhängig ist.

Die derzeit wohl bekannteste und verbreitetste Theorie der Koordination menschlicher Bewegung, der Ansatz der dynamischen Modelle (Haken, Kelso & Bunz, 1985, Kelso, 1988 a,b), entspricht dieser Anforderung nicht. Dass diese Theorie dennoch im folgenden kurz dargestellt wird, hat zwei Gründe. Erstens soll damit einem gewissen Vollständigkeitsanspruch Genüge getan werden. Das sogenannte HKB Modell (Haken – Kelso – Bunz – Modell) ist immerhin zur Zeit das am häufigsten zitierte Modell menschlicher Koordination. Und zweitens war dieses Modell der theoretische Rahmen von einigen Studien, in denen, so wie in der hier vorgestellten Arbeit, Koordinationsaufgaben unter Ablenkung durchgeführt wurden. Das Modell der parametrischen Kopplung (Heuer, 1993) erfüllt im Gegensatz dazu den vorhin genannten Anspruch. Es wird im Anschluss an das HKB Modell dargestellt. Den Abschluss des folgenden Abschnittes bildet eine Gegenüberstellung der beiden Modelle.

Zuvor sollen aber einige Merkmale periodischer Bewegungen, und damit die mit den beiden Theorien modellierten Aspekte periodischer Bewegungen, dargestellt werden. Gleichzeitig werden einige, im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendete, Begriffe und Bezeichnungen anhand einer einfachen, periodischen, bimanuellen Bewegung vorgestellt und erklärt.

1.1.4 Merkmale periodischer Bewegungen

Als Beispiel diene folgende Untersuchungssituation: die Probanden halten in jeder Hand einen Joystick, der in angenehm erreichbarer Weite auf dem Tisch befestigt ist. Die Aufgabe besteht darin, die Joysticks periodisch durch Drehung der Hände seitlich hin- und her zu bewegen (Temprado, Zanone & Laurent 1999). Eine einzelne Periode beginnt immer außen, die Bewegung hat innen einen Phasenwinkel von 180° erreicht und eine ganze Periode von 360° vollendet, wenn sie wieder außen ist. Wenn beide Hände außen beginnen, handelt es sich um ein gleichphasiges, wenn eine Hand innen und die andere außen beginnt, um ein um 180° phasenverschobenes, gegenphasiges Bewegungsmuster.

Theoretisch ist es möglich, die beiden Bewegungen, neben gleich- und gegenphasigem Bewegungsmuster, in unendlich vielen verschiedenen Phasenlagen durchzuführen. Durch Ausprobieren kann man sich aber sehr leicht selbst davon überzeugen, dass praktisch nur zwei Phasenlagen möglich sind. Im Falle des Pendelns von Joysticks sind das ca. 0° und mit ein wenig Mühe auch noch ca. 180° . Phasenlagen von 90° oder gar 10° oder 15° sind so gut wie nicht durchführbar. Ohne es zu wollen, wechselt man automatisch in eines der bevorzugten Bewegungsmuster.

In der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele für das beschriebene Muster: es gibt ein besonders bevorzugtes Bewegungsmuster nahe von 0° , ein um 180° phasenverschobenes halb bevorzugtes, und alle andern Möglichkeiten sind so gut wie nicht durchführbar (z.B. Schöner & Kelso, 1988 a, b, Überblick bei Heuer, 1994 a, b).

Ab einer gewissen Geschwindigkeit, die im weiteren auch als kritische Frequenz (KF) bezeichnet wird, ist auch die Ausführung des schwierigeren Bewegungsmusters in der Phasenlage von 180° nicht mehr möglich. Die Bewegung springt in das stabilere Muster bei 0° Phasenverschiebung über. Dieser Vorgang wird als Phasensprung bezeichnet.

Neben diesem Phasensprung zeigen sich über verschiedenste Untersuchungssituationen hinweg (Überblick bei Heuer, 1994, Kelso, 1995) bestimmte Regelmäßigkeiten periodischer Bewegungen. So verändert sich zum Beispiel die Stabilität des Bewegungsmusters in Abhängigkeit von Frequenz und Phasenlage der Bewegung. Sie ist bei gleichphasigem Bewegungsmuster am größten, erreicht im gegenphasigen Muster einen annähernd so hohen Wert und ist aber in allen Zwischenlagen deutlich geringer. Vor allem in der Nähe des Phasensprungs bei höheren Geschwindigkeiten zeigen sich drastisch erhöhte Instabilitäten (z.B. Monno et al, 2000). Die Stabilität des Bewegungsmusters wird an der Phasenvariabilität gemessen, die in der Literatur auch als variabler Synchronisationsfehler („variable synchronization error“) bezeichnet wird. Darunter ist die Standardabweichung der über mehrere Perioden gemittelten Phasenverschiebung zu verstehen.

Auf einen wichtigen Aspekt in Bezug auf die Benennung der Phasenlagen sei an dieser Stelle hingewiesen. Es hat sich eingebürgert, die Benennung der Phasenlagen als gleich- bzw. gegenphasig nicht in Abhängigkeit von der Richtung der Bewegung im Raum zu bezeichnen, sondern nach den biologischen Gegebenheiten. Das Muster, das am einfachsten auszuführen ist, heißt gleichphasig, das schwierigere, aber noch mögliche, heißt gegenphasig. Bewegungen, die räumlich in die gleiche Richtung ausgeführt werden heißen hingegen gleichsinnig, Bewegungen in die Gegenrichtung gegensinnig. An dem vorhin erwähnten Beispiel lässt sich erkennen, dass gleichphasige Bewegungen nicht unbedingt gleichsinnig sein müssen. Die Joysticks bewegten sich im gleichphasigen Muster beide von außen nach innen und von innen nach außen, was nach räumlichen Gesichtspunkten einem gegensinnigen Muster entspricht. Bei anderen Bewegungen ist jedoch das gleichphasige Muster auch das gleichsinnige, wie zum Beispiel beim vor- und zurück Pendeln von am Boden befestigten Holzstäben neben dem Körper (Pellechia & Turvey, 2001).

Die Phänomene der beiden bevorzugten Phasenlagen, des Phasensprungs sowie der qualitativen Veränderung periodischer Bewegungen in Zusammenhang mit Phasenlage und Frequenz wurden mit zwei unterschiedlichen Modellen modelliert, die im folgenden vorgestellt werden.

1.1.5 Das HKB Modell

Der Ansatz der dynamischen Modelle (Haken, Kelso & Bunz, 1985, Übersicht bei Kelso, 1995) verwendet Regeln und Gesetzmäßigkeiten der Synergetik, um experimentelle Daten aus Bewegungsuntersuchungen zu beschreiben. Es geht nicht darum, Funktionsweisen von möglichen Mechanismen zu modellieren, die für das Zustandekommen von Koordination

verantwortlich sind. Die beobachtete Bewegung selbst wird als Gesamtsystem betrachtet, dessen Verhalten sich mit einigen wenigen Ordnungsparametern beschreiben und in Form einer Fourier-Reihe darstellen lässt. Haken, Kelso & Bunz, (1985) konnten mit einer relativ einfachen, nichtlinearen Funktion die vorhin beschriebenen Aspekte der Dynamik periodischer Bewegungen modellieren.

Dieses Modell kann aufgrund der dynamischen Eigenschaften nur für periodische Bewegungen, nicht aber für diskrete angewandt werden kann. Im Gegensatz dazu ist das Modell parametrischer Kopplung (Heuer, 1993) in der Lage, sowohl alle bisher beschriebenen Phänomene periodischer Bewegungen zu modellieren, als auch jene von diskreten Bewegungen. Der entscheidende Kennwert diskreter Bewegungen ist die Reaktionszeit bei Einfach- und Mehrfachwahlreaktionsaufgaben. Das Miteinschließen von Ergebnissen aus Reaktionszeitmessungen lässt die um ein vielfaches größere Erklärungskraft dieses Modells erkennen. Das Modell parametrischer Kopplung wird im folgenden vorgestellt.

1.1.6 Parametrische Kopplung

Koordination von zwei Bewegungen wurde von Heuer (1993) mit dem Modell der parametrischen Kopplung in Form eines Filtermodells simuliert. x_p und x_q sind dabei die Eingangswerte, y_p und y_q die Ausgangswerte der beiden Bewegungskanäle. Jeder Kanal entspricht einer Bewegung. x_p und x_q können als Bewegungsintention angesehen werden, y_p und y_q entsprechen den jeweils initiierten Bewegungen.

Die beiden Hochpassfilter (HP) entsprechen der parametrischen Kopplung zwischen den beiden Bewegungen und beeinflussen die Programmierung des jeweils anderen Bewegungskanals noch vor der Bewegungsausführung. Die beiden Schwellenwertelemente mit Hystere (SW) setzen die Ausgangswerte jedes Kanals auf +1 oder -1 wenn eine gewisse Schwelle erreicht ist. Der Wert +/-1 bedeutet dann ein Auslösen der einen oder der anderen Bewegung. Es dauert eine gewisse Zeit bis das Eingangssignal weitergeleitet und eine entsprechende Bewegung ausgelöst wird.

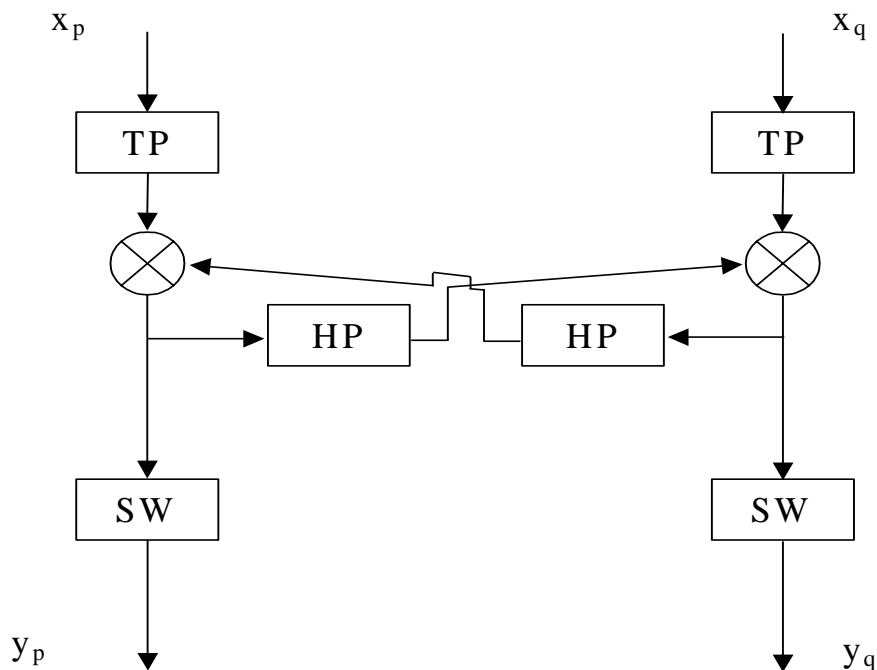


Abb. 1.1 Modell parametrischer Kopplung (Heuer, 1993)

Das entscheidende Element in diesem Modell sind die beiden Hochpassfilter, die zu einer wechselseitigen Beeinflussung der beiden Bewegungen führen bevor das Schwellenelement am Ende des jeweiligen Kanals den Grenzwert erreicht und die Bewegung somit auslöst. Mit diesem einfachen, linearen Modell ließen sich Ergebnisse aus Reaktionszeitexperimenten und aus Experimenten mit koordinierten, periodischen Bewegungen simulieren (Heuer, 1993). Werden zum Beispiel auf beiden Seiten gleiche Bewegungen programmiert, ist die Gesamtzeit bis die Schwellenwertelemente den Grenzwert übersteigen kürzer als wenn unterschiedliche Bewegungen programmiert werden.

Um den Phasensprung bei periodischen Bewegungen zu simulieren, muss zu jedem Kanal noch ein Zufallsfaktor eingefügt werden. Das ist insofern naheliegend, als es biologisch wenig plausibel ist, dass das Vorbereiten einer Bewegung immer exakt gleich lange dauert. Zeitliche Schwankungen sind ja auf verschiedenen Ebenen neuronaler Tätigkeit zu beobachten. Bei kürzer werdenden Periodendauern (also höheren Frequenzen) steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund der zufälligen Schwankung der Programmierungszeit dazu kommt, dass die eine Bewegung schon weiter programmiert ist als die andere und über die Kopplung (HP im obigen Modell) die andere Bewegung auslöst noch ehe die „eigene“ Programmierung dazu gekommen ist. Dadurch kommt es zum Phasensprung.

1.1.7 Gegenüberstellung

Das Wesen eines jeden wissenschaftlichen Modells ist die Reduktion der aus vielfältigen Beobachtungen gewonnenen Information um daraus gemeinsame Gesetzmäßigkeiten abzuleiten. Letztlich ist es Ziel jeder naturwissenschaftlichen Forschung, ein Gesetz in Form einer Gleichung oder eine einzelne Zahl als Naturkonstante für die Erklärung einer großen Anzahl von Einzelercheinungen zu finden. Im Vergleich zu anderen Wissenschaften scheint die Psychologie diesem Ziel noch ungleich weiter entfernt zu sein. Jeder Versuch der Annäherung ist deshalb grundsätzlich als lobenswert zu betrachten.

Eines der wichtigsten Qualitätskriterien theoretischer Modelle ist die Einfachheit. In diesem Kriterium unterscheiden sich die beiden Modelle nicht wesentlich. Schwieriger ist der Vergleich der beiden Modelle bezüglich der Klarheit über den zu modellierenden Tatbestand. Da gibt es zum einen beträchtliche inhaltliche Unterschiede. Das HKB Modell macht nur Aussagen bezüglich einiger Aspekte periodischer Bewegungen. Dieses Modell muss daher als Modell der Koordination periodischer Bewegungen angesehen werden. Oder, um es noch genauer zu formulieren, als Modell der Phasenbeziehung zwischen zwei gleichzeitig ausgeführten periodischen Bewegungen. Das Modell der parametrischen Kopplung erlaubt hingegen zusätzlich auch noch Vorhersagen zu räumlichen Bewegungsparametern, wie zum Beispiel Bewegungsweiten. Vor allem aber kann es auch für diskrete Bewegung angewandt werden und erlaubt daher Aussagen zu dem nicht unbeträchtlichen Fundus an Reaktionszeitexperimenten.

Zum anderen unterscheiden sich die beiden Modelle bezüglich der Ebene ihres Erklärungsanspruches. Die dynamischen Modelle modellieren bestimmte Aspekte der Bewegung als Ergebnis der Arbeit des Gesamtsystems „Mensch“, ohne zu versuchen, Aussagen über ein Zustandekommen dieser Ergebnisse zu machen. Menschliche Bewegung als Gesamtes zu modellieren heißt aber, physikalische Eigenschaften der Muskeln und Knochen nicht von physiologischen Eigenheiten des Nervensystems oder von psycho-emotionalen Gefühls- und Aktivierungszuständen zu unterscheiden und in einer gemeinsamen Formel zu modellieren. Diese Vermischung der verschiedenen Ebenen ist wesentlicher Inhalt der Kritik am HKB-Modell (z.B. Heuer, 1993). Von den Kritikern dieses Modells wird nicht nur hervorgehoben, dass es sehr schwierig ist, den Parametern der Formel eine psychologische Bedeutung zuzuordnen, sondern vor allem, dass die makroanalytische Betrachtungsebene nicht einmal dazu anregt, dies anzustreben.

1.2 Ablenkung

1.2.1 Einleitung

Weder das dynamische Modell noch das Modell der parametrischen Kopplung machen allerdings Vorhersagen über mögliche Auswirkungen von Ablenkung auf die Koordination von Bewegung. Ein zentrales Konzept zur Erklärung von Einflüssen kognitiver Zusatztätigkeit ist hingegen der aus der Informationswissenschaft entlehnte Begriff der Kapazität. In der Aufmerksamkeitsforschung wurde dieses Konzept im Modell der generellen Kapazität formuliert, das im folgenden dargestellt wird. Anhand eines konkreten Beispiels werden mit dem Begriff der generellen Kapazität verbundenen Schwierigkeiten dargestellt. Als Antwort auf diese formalen Schwierigkeiten haben sich die Ressourcenmodelle entwickelt, von denen zwei Beispiele vorgestellt werden. Besonders der Aspekt der Anstrengung sowie eine Nähe zu Daten aus physiologischen Untersuchungen werden in dem energetischen Modell von Sanders berücksichtigt, das damit die Überleitung zu neueren Ansätzen der Aufmerksamkeitsforschung bildet.

1.2.2 Kapazität

In der Informationswissenschaft ist unter Kapazität jene Menge an Information zu verstehen, die ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt verarbeiten kann. Mit diesem Begriff lassen sich in der Psychologie Multiple-Task Interferenzen gut als Folge von Mangel an Kapazität erklären. Die Aufgabe A benötigt die Kapazität $K(a)$, die zweite Aufgabe B benötigt die Kapazität $K(b)$, wenn beide Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden wird die gemeinsame Kapazität $K(a) + K(b)$ benötigt. Wenn aber insgesamt weniger Kapazität vorhanden ist als die beiden Aufgaben in Summe benötigen

$$K(\text{ges}) < K(a) + K(b),$$

kommt es zur gegenseitigen Störung der beiden Aufgaben. Dieses sehr anschauliche Modell, mit seiner Haupteigenschaft der sich unbeeinflusst aufsummierenden Einzelkapazitäten, scheiterte an Experimenten, in denen mehrere Aufgaben kombiniert wurden. So konnten Navon & Gopher (1979) zeigen, dass verschiedene Zusatztätigkeit zwei Erstaufgaben unterschiedlich stark beeinflussten. Aufgabe A und Aufgabe B wurden jeweils durch die gleiche Zusatzaufgabe unterschiedlich stark abgelenkt. Das lässt sich mit dem Modell der generellen Kapazität noch vereinbaren. Jede der drei Aufgaben hat eben ihren eigenen Kapazitätsbedarf. Dieser Unterschied war aber bei unterschiedlichen Zweitaufgaben nicht gleich. Nach dem Modell der generellen Kapazität hieße das dann, dass eine Zusatzaufgabe je nachdem mit welcher Erstaufgabe sie kombiniert wird, unterschiedlich viel Kapazität bedarf. Der konstante Kapazitätsbedarf einer Aufgabe ist aber die Basis des Modells. Ohne die Aufrechterhaltung des konstanten Kapazitätsbedarfs einer Aufgabe, verliert das gesamte Modell seine Erklärungskraft.

Eine ähnliche Logik liegt einem Gedanken zugrunde, den Heuer (1997) in einer Rückschau formulierte. Es seien a, b, 1 und 2 vier verschiedene Aufgaben mit ihrem jeweils typischen benötigten Kapazitätsbedarf $K(a)$, $K(b)$, $K(1)$ und $K(2)$. Von diesen vier Aufgaben werden immer zwei kreuzweise kombiniert, sodass die kombinierten Kapazitäten $K(a,1) = K(a) + K(1)$, $K(a,2) = K(a) + K(2)$, $K(b,1) = K(b) + K(1)$ und $K(b,2) = K(b) + K(2)$ benötigt werden. Das Modell der generellen Kapazität postuliert, unabhängig von der Aufgabenkombination, für jede Aufgabe eine konstante Kapazität. Die Kapazitäten müssten sich also unbeeinflusst aufsummieren. $K(a,1) - K(a,2)$ und $K(b,1) - K(b,2)$ müssten demnach beide positiv oder beide negativ sein. Positiv sind die Subtraktionen, wenn $K(1) > K(2)$. Das heißt, Aufgabe 1 benötigt mehr Kapazität als Aufgabe 2. Negativ sind die Subtraktionen wenn im umgekehrten Falle Aufgabe 2 mehr Kapazität benötigt als Aufgabe 1, also $K(1) < K(2)$. Wenn nur eine der

beiden Subtraktionen positiv und die andere negativ ist, ist das ein Beleg für unterschiedlichen Kapazitätsbedarf bei unterschiedlicher Aufgabenkombination. In Kombination mit Aufgabe a wäre $K(1) < K(2)$, in Kombination mit Aufgabe b wäre $K(1) > K(2)$. Ein solches Ergebnis wäre allein durch das Konzept der generellen Kapazität nicht erklärbar.

Es gibt einige, diesem Gedanken entsprechende, experimentelle Belege. McFarland & Ashton (1978) ließen zum Beispiel ihre Probanden entweder mit dem linken (Aufgabe a) oder mit dem rechten (Aufgabe b) Zeigefinger abwechselnd zwei sechs cm voneinander entfernte Tasten drücken (Tapping-Aufgabe). Als Maß für die Gleichmäßigkeit der Bewegung galt die Standardabweichung der Zeitunterschiede aufeinanderfolgender Tastendrucke. Als Zusatzaufgabe mussten die Probanden dabei gleichzeitig entweder Wörter (Aufgabe 1) oder Gesichter (Aufgabe 2) wiedererkennen. Je höher die Ablenkung aufgrund der Zusatzaufgabe war, desto ungleichmäßiger sollte die Bewegung sein.

Die Zusatzaufgabe führte generell zu einer Verringerung der Gleichmäßigkeit des Tappings. Diese Verringerung war aber beim rechten Zeigefinger beim Wiedererkennen von Wörtern deutlicher und beim linken Zeigefinger beim Wiedererkennen von Gesichtern. Bezogen auf Kapazitätsbedarf heißt das, dass die beiden Zusatzaufgaben, je nach verwendetem Finger der Erstaufgabe, unterschiedlich viel Kapazitätsbedarf haben. Nach den Ergebnissen des rechten Fingers hat das Wiedererkennen von Wörtern mehr Kapazität bedarf als das Wiedererkennen von Gesichtern. Die Ergebnisse des linken Fingers besagen aber genau das Gegenteil.

Zur Erklärung dieses und ähnlicher experimenteller Befunde (Überblick bei Heuer, 1996) reicht das Modell der generellen Kapazität alleine nicht aus. Die generelle Kapazität muss zumindest in zwei Komponenten aufgeteilt werden, die als getrennte Kapazitäten oder auch Ressourcen bezeichnet werden.

In diesem Beispiel wurden die beiden Hemisphären als getrennte Ressourcen angenommen. Da das Erkennen von Gesichtern mehr rechtshemisphärisch abläuft ist der Einfluss auf die Bewegungen der linken Hand größer. Das Wiedererkennen von Wörtern hingegen wird mit Gehirnaktivität der linken Hemisphäre in Verbindung gebracht wodurch sich ein engerer Zusammenhang mit den Bewegungen der rechten Hand ergibt.

Dieses Beispiel steht nicht für sich allein. Ähnliche Abhängigkeiten zwischen mehreren Aufgaben zeigen sich in unterschiedlichsten Situationen und scheinen eher der Normalfall als eine Ausnahme der menschlichen Bewegungssteuerung zu sein (Heuer, 1996). Der Versuch, diese vielfältigen Abhängigkeiten in ein Ordnungsschema zu bringen, war der Inhalt verschiedener Ressourcentheorien, von denen im folgenden exemplarisch die Ideen von Navon & Gopher (1979), Wickens (1980) und Sanders (1983) dargestellt werden.

1.2.3 Ressourcenmodelle

Einen formalen Weg, Ressourcen zu finden, beschrieben Navon & Gopher (1979). Die Leistung in einer Aufgabe setze sich aus der Summe unabhängiger Beiträge verschiedener Ressourcen zusammen. Wobei jede dieser Ressourcen wiederum begrenzte Verarbeitungskapazität hat. Die Beziehung zwischen jeder einzelnen Ressource und der Aufgabe sei durch eine Aufgaben-Ressource-Leistungsfunktion beschrieben. Das heißt, jede Ressource kann zu der Leistung in der Aufgabe einen Beitrag zwischen „gar nichts“ und „alles“ leisten. Oder, anders herum ausgedrückt, jede Aufgabe benötigt einen bestimmten Anteil der Kapazität der beteiligten Ressourcen. Interferenz zwischen zwei Aufgaben entsteht dann, wenn die beiden Aufgaben insgesamt mehr Kapazität einer Ressource benötigen als vorhanden ist.

Der Weg, Ressourcen zu finden, besteht darin, wie bei der Faktorenanalyse, an jeden Datensatz ein Modell anzupassen. Mit der Zeit sollten sich dann bestimmte Muster und damit bestimmte Ressourcen finden lassen. Dieser an sich sinnvolle Weg ist leider nie systematisch beschrritten worden (Heuer, 1996).

Eine konkrete Klassifikation von möglichen Ressourcen auf den Dimensionen Verarbeitungsstufe, Hemisphären und Modalität schlug Wickens (1980) vor. Auf der Dimension Verarbeitungsstufe unterschied er im wesentlichen zwischen Reizverarbeitung und Reaktionsvorbereitung. Die beiden Hemisphären wurden mit verbaler bzw. räumlicher Verarbeitung in Verbindung gebracht. Mit Modalität war die Unterscheidung zwischen den Sinnesmodalitäten auf Reizseite und zwischen unterschiedlichen Effektoren, wie zum Beispiel sprachliche vs. manuelle Reaktionen, auf Reaktionsseite gemeint. Dieses Ressourcenmodell hat zu zahlreichen Untersuchungen angeregt und kann als eine der wichtigsten Theorien zu Ablenkung und Aufmerksamkeit angesehen werden.

Ein Modell, das zwar nicht im eigentlichen Sinne eine Ressourcenmodell war, aber im Nachhinein mit der Idee der Ressourcen in Verbindung gebracht werden kann, war das „functional distance model“ (Kinsbourne & Hicks, 1978). Je näher zwei Aufgaben beisammen liegen, desto mehr beeinflussen sie sich gegenseitig. Wobei mit diesem „beisammen“ sowohl tatsächlich örtlich im Gehirn gemeint war und sich im wesentlichen auf die beiden Hemisphären bezog, als auch nicht örtlich sondern funktionell. Damit war ein Effekt gemeint, der heute als homologe Kopplung bezeichnet wird. Die Daten für dieses Modell waren Vergleiche von gegenseitiger Beeinflussung von homologen und homolateralen Körperteilen. Es fand sich eine engere Verbindung zwischen homologen Körperteilen (beide Hände) als zwischen homolateralen (linke Hand und linker Fuß) und wiederum eine engere zwischen homolateralen als zwischen nicht-homologen, nicht-homolateralen, also diagonalen (linke Hand und rechter Fuß), Effektoren. Die funktionelle Entfernung zwischen homolateralen Körperteilen ist demnach größer als jene zwischen homologen und kleiner als jene zwischen diagonalen. Die funktionelle Entfernung entsprach also nur zum Teil der physiologischen. Das Gegenteil der „funktionellen Entfernung“, nämlich die „funktionale Nähe“ findet sich heute im Konzept der Kopplung wieder, das weiter unten beschrieben wird.

Ein Aspekt von Aufmerksamkeit, der bisher in dieser Arbeit noch keine Beachtung gefunden hat, ist jener der Veränderung der Aufmerksamkeit im Laufe der Zeit oder durch aktives Zutun der Probanden. Diesem Aspekt wird in energetischen Modellen Rechnung getragen, von denen im folgenden die bekanntesten vorgestellt wird.

1.2.4 Energetische Modelle

Offensichtlich können Probanden im Experiment je nach Motivation, Ermüdungs- oder Stresszustand unterschiedlich viel Kapazität mobilisieren. Während Ressourcenmodelle die Teilbarkeit der Kapazität modellieren, sind veränderliche, quantitative Aspekte der Kapazität der Inhalt energetischer Modelle. Einige Beispiele derartiger Modelle werden im folgenden dargestellt.

Das erste genauere Modell zu diesem dynamischen Aspekt der Aufmerksamkeit entwarf Kahneman (1973) in seinem Buch „Attention and Effort“. Neben der durch die Reizsituation gegebenen Absicht (Task-Set), überdauernden Dispositionen (z.B. die grundsätzliche Wirkung von Farben oder von Bewegung auf die Wahrnehmung) und der Bewertung der Aufgabenanforderung sollte nach diesem Modell vor allem auch die Menge an vorhandener Kapazität für den Erfolg in einer Aufgabe verantwortlich sein. Im Gegensatz zu früheren Theorien, war der Einsatz der Kapazität bei Kahneman aber ein flexibler und aktiver Prozess. Die Menge an zur Verfügung stehender Kapazität setzte Kahneman mit physiologischer Erregung und diese wiederum mit Motivation gleich. Da die physiologische Erregung hoch

mit der Weite der Pupille korreliert ist, galt die Weite der Pupille als gültiges Maß für die getätigte Anstrengung, also für die Menge an zur Verfügung stehender Kapazität.

Diese eindimensionale Sichtweise des energetischen Aspektes von Aufmerksamkeit war der wesentlichste Kritikpunkt an diesem Modell (z.B. Sanders, 1983). Pribram & McGuiness (Pribram & McGuiness, 1975; McGuiness & Pribram, 1980) unterschieden zwischen einem wahrnehmungssteuernden Arousalssystem, einem handlungsbezogenen Aktivierungssystem und einem, der Willkür zugänglichen, Anstrengungssystem. Eine zentrale Rolle für das Arousalssystem spielt die Amygdala, wie aus Studien zu Amygdalektomie ersichtlich wurde. Der in diesem Gehirnsystem hauptsächlich verwendete Neurotransmitter ist Serotonin. Das Aktivierungssystem hingegen liegt im Striatum und in einem lateralen Streifen des frontoparietalen Kortex und ist von einem ausgewogenen Verhältnis zwischen der Aktivität von dopaminergen und cholinergen Systemen abhängig. Diese beiden Aufmerksamkeitssysteme werden von dem um den Hypocampus gelegenen Anstrengungssystem überwacht.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen dem noradrenergen Arousal und der dopaminergen Aktivierung war Inhalt ausführlicher Studien von Tucker und Williamsons (1984). Sie schrieben dem Arousal als Hauptaufgabe das schnelle Reagieren auf neue Reize sowie eine Tendenz zu Habituation auf wiederholt auftretende Reize zu. Dadurch wird die Informationsredundanz minimiert. Anatomisch ist das besondere an den noradrenergen Fasern, dass sie in einem relativ eng umgrenzten Bereich (Locus coeruleus) entspringen und in sehr viele verschiedene Zentren projizieren. Die Dopamin-Projektionen des Aktivierungssystems haben hingegen sehr spezifische Ziele. Sie entspringen im Tegmentum und innervieren hauptsächlich das Neostriatum in den Basalganglien sowie abgegrenzte Bereiche des Frontal- und enthorinalen Kortex. Hohes Dopamin-Aktivierungsniveau führt zu stereotypem Verhalten. Das Aktivierungssystem steht also mit der Vorbereitung und Durchführung von gezielten Handlungen in Verbindung.

Robbins (1986) vertrat die Ansicht, dass das noradrenerge System einem höheren Überwachungsmodus entspricht weil der Locus coeruleus als einzige, an der Aufmerksamkeit beteiligte, Region von präfrontalen Strukturen beeinflusst werden kann. Versuche mit Ratten zeigten, dass Dopamin-Entzug die Geschwindigkeit und Wahrscheinlichkeit einer Reaktion verringerte, ohne die Diskriminationsleistung zu beeinträchtigen. Dies bekräftigte die Sichtweise, dass das dopaminerge Aktivierungssystem eher handlungs- und das noradrenerge Arousalssystem eher wahrnehmungsorientiert ist. Einen direkten Zusammenhang zwischen den beiden Systemen sah er in dem Befund, dass Beeinträchtigung durch weisses Rauschen bei Läsion des noradrenergen Systems stärker war als ohne. Die Beeinträchtigung durch weisses Rauschen wirkte ähnlich einer Gabe von d-Amphetamin, einem indirekten Antagonisten von Dopamin, in einem Anstieg der Aktivität des dopaminergen Systems. Daraus lässt sich schließen, dass das noradrenerge Arousalssystem dem dopaminergen Aktivierungssystem übergeordnet ist und seine Empfindlichkeit reguliert. Willkürlicher Einfluss scheint nur auf das Arousal möglich zu sein und dadurch nur indirekt auf die zielgerichtete Aktivierung.

Sanders (1983) integrierte diese Aktivierungssysteme in ein kognitives Gesamtmodell dynamischer Informationsverarbeitung. In Anlehnung an Sternberg (1969), gliederte er den Verarbeitungsprozess in die vier linear aufeinander abfolgende Stufen Reiz-Vorverarbeitung, Merkmalsextraktion, Reaktionsauswahl und motorische Anpassung der Reaktion. In einer Erweiterung des Modells (Sanders, 1990) wurden zwischen die Merkmalsextraktion und die Reaktionsauswahl noch eine Reiz-Erkennungsstufe und vor die motorische Anpassung eine Programmierungs- und eine Programm-Lade-Stufe eingefügt.

In dem Modell von Sanders wirkt sich Arousal auf die Verarbeitungszeit der Merkmalsextraktion und Aktivierung auf jene der motorischen Anpassungsstufe aus. Das

Anstrengungssystem vermittelt einerseits zwischen den beiden Energiesystemen, andererseits kann es direkten Einfluss auf die Stufe der Reaktionsauswahl nehmen. Das Anstrengungssystem wird ausschließlich von einer in Anlehnung an Broadbent (1971) oder Kahnemann (1973) zusätzlich eingeführten Bewertungsinstanz gesteuert. Diese bewertet Feedback über die beiden basalen Energiesysteme Arousal und Aktivierung und sowie über die Übereinstimmung von der laufenden Reaktion mit dem Ziel.

Wesentliche Kritikpunkte betrafen den streng linearen Aufbau der hintereinander folgenden Bearbeitungsstufen. Nach heutigem Wissen scheinen die verschiedenen Stufen mehrfach verzahnt ineinander zu greifen, was deren Unterscheidung prinzipiell in Frage stellt.

1.2.5 Gating

Ein neuropsychologisches Modell der Aktivierung ist Gating (Skinner & Yingling, 1977). In einfachen Worten lässt sich die Grundidee wie folgt formulieren: Der Kortex wäre hoffnungslos von Aktivität überschwemmt, wenn aufsteigende, sensorische Bahnen nicht irgendwie gezügelt werden würden. Dies geschieht im Thalamus. Die *Formatio Reticularis* hemmt die ungebremsen Aktivierungen der sensorischen Bahnen durch Einspeisen von hemmenden Einflüssen in die reticulären Kerne des Thalamus. Die Tore (Gates) sind dann gewissermaßen geschlossen. Ein Nachlassen der Aktivität der *Formatio Reticularis* durch Ermüdung oder unter Medikamenteinfluss führt deshalb zu genereller Erhöhung des Arousal. Die Tore sind dann alle offen. Im Normalfall senkt die *Formatio Reticularis* aber die kortikale Grundaktivität durch Hemmung der reticulären Thalamuskern. Positiv aktivierende Einflüsse des frontalen Kortex hemmen diesen hemmenden Einfluss der *Formatio Reticularis*. Dies geschieht aber nicht generell, sondern sehr gezielt. Frontale Einflüsse öffnen nur bestimmte Tore, sodass gezielt Aktivierung aus den sensorischen Bahnen zum Kortex vordringen kann.

Brunia (1993) erweiterte dieses Modell um die an der Motorik beteiligten Gehirnregionen M1, und prämotorischer Kortex als Zielpunkte der thalamischen Projektionen sowie um die Basalganglien, das Kleinhirn und die motorischen Kerne des Thalamus. Die in die motorischen Kerne des Thalamus einströmende Grundaktivität stammt nicht aus den sensorischen Bahnen sondern vom Kleinhirn und über die Basalganglien vom frontalen Kortex. Das Gating der *Formatio Reticularis* unter frontalem Einfluss läuft im gleichen Muster ab wie bei der Wahrnehmung im ursprünglichen Modell von Skinner und Yingling (1977).

Gating bewirkt nach diesem Modell die selektiven Aspekte von Wahrnehmung und von Handlung auf die gleiche Art und Weise. Es kann aber auch intermodal als Einfluss von Bewegung auf Wahrnehmung wirken. Kristeva-Feige et al (1996) verstehen unter Gating „the suppression of afferent information during an action“. Wenn die sensorischen Signale dabei durch die motorischen Signale gehemmt werden sprechen sie von „zentrifugalem Gating“, wenn dies durch bewegungsbegleitende, sensorische Signale bewerkstelligt wird von „zentripedalem“ Gating.

Kristeva-Feige et al (1996) verglichen mittels MEG die Unterschiede der Gehirnaktivität im primär somatosensorischen Feld (S1) zwischen Situationen in denen der rechte Zeigefinger nur bewegt, nur elektrisch stimuliert oder gleichzeitig bewegt und stimuliert wurde. Zentrifugales Gating, als Unterschied zwischen der Bedingung mit Bewegung und Stimulation und jener nur mit Bewegung aber ohne Stimulation wurde ab 30 ms nach Bewegungsbeginn bis zum Ende der Bewegung gefunden. Zentripedales Gating, als Unterschied zwischen der Bedingung mit Bewegung und Stimulation und jener nur mit Stimulation aber ohne Bewegung zeigte sich während der bekannten MEFI (movement evoked field I). Diese Komponente beginnt 50ms nach Bewegungsbeginn, hat ihren Peak

nach 100 ms und endet 130 ms nach Bewegungsbeginn. Sie wird mit sensorischem Input des bewegten Fingers in Verbindung gebracht.

1.3 Strukturelle Randbedingungen und Kopplung

Die Gesamtsituation zur Theorie motorischer Koordination bewertete Heuer (1994) folgendermaßen: „Es gibt nichts von der Art einer einheitlichen Theorie der Koordination, aus der formale Modelle für verschiedenartige Phänomene abgeleitet werden könnten. Das ist so, trotz mancher gegenteiliger Ansprüche.“ (s. 206) Bei dem Versuch, Phänomene der Bewegungssteuerung mit theoretischen Modellen zu erklären scheint eine grundsätzliche Bescheidenheit angebracht zu sein.

Zu Beginn dieser Arbeit waren die beiden grundsätzlichen Prinzipien der Bewegungssteuerung, wie sie von Holst (1939) beschrieben hat, erwähnt worden: die Beharrungstendenz und Magneteffekt. Alle bisherigen Theorien und Modelle haben versucht, die Funktionsweise, den Physiologischen Hintergrund oder die jeweils besondere Aufgabe dieser beiden Prinzipien zu erkennen. Da dies im Grunde nicht gelungen ist, scheinen grundsätzlich neue Ansätze von Nöten zu sein.

Ein solcher Ansatz könnte darin bestehen, in den beiden Prinzipien nicht etwas prinzipiell unterscheidbares zu sehen, sondern sie als die beiden Seiten einer Münze zu betrachten. Die Strukturellen Randbedingungen (Heuer & Keele, 1994) sind ein Konzept, das versucht, genau das zu verwirklichen. Der Grundbaustein zu diesem Ansatz liegt in dem schon weiter oben erwähnten Konzept der funktionalen Entfernung von Kinsbourne & Hicks (1978). Zwei Aufgaben beeinflussen sich je weniger, je weiter sie auseinander liegen. Wobei mit dem „weiter“ die funktionelle Entfernung gemeint war, die mit einer räumlichen übereinstimmen kann aber nicht muss.

Das Gegenteil der funktionellen Entfernung ist die funktionelle Nähe. Das entspricht inhaltlich dem Konzept der Kopplung, das in der Erforschung der Koordination als das derzeit meist untersuchte Konzept angesehen werden kann. Zwei Bewegungen, oder zwei Aufgaben grundsätzlich, können mehr oder weniger gekoppelt sein. Je mehr sie gekoppelt sind, desto mehr gegenseitige Beeinflussung tritt bei gleichzeitiger Durchführung auf. Wobei es ganz wichtig ist, zu beachten, dass sich diese Beeinflussung in beide Richtungen, positiv und negativ, auf die eine oder die andere oder auf beide Aufgaben, auswirken kann. Diese Kopplungen zu beschreiben, zu erklären und zu modellieren ist die Aufgabe derzeitiger Forschung.

Die neurophysiologischen Mess- und Visualisierungstechniken haben sich in den letzten Jahren drastisch verbessert, sodass es jetzt immer besser gelingt, Aktivierungsvorgänge im Gehirn zu messen und daraus neurophysiologisch begründete Funktionsmodelle zu entwerfen. Dadurch gewinnt der tatsächlich räumliche Aspekt wieder mehr an Bedeutung. Die Plausibilität des Gedankens, dass sich zwei Aufgaben dann beeinflussen, wenn bei beiden Aufgaben die gleichen Nervenzellen aktiv sind, und dass sie sich dann nicht beeinflussen, wenn andere Nervenzellen aktiv sind, ist einfach nicht von der Hand zu weisen.

Wenn dieser Gedanke richtig ist, sollte sich mit Hilfe von Ablenkung einiges über die an der Generierung bestimmter Bewegungsparameter beteiligten Strukturen herausfinden lassen. Und zwar sollten sich jene Parameter der Bewegungssteuerung durch Ablenkung verändern, für deren Generierung Strukturen verantwortlich sind, die auch beim Lösen der kognitiven Zusatzaufgabe beteiligt sind. Wenn bestimmte Parametern allerdings durch Ablenkung nicht verändert werden, deutet dies auf die Beteiligung von Strukturen hin, die für die kognitive Zusatztätigkeit nicht benötigt werden. Man könnte diese als „rein motorische Strukturen“ bezeichnen.

1.3.1 Fehler als Fenster

„Dem Fehler ist jeder ausgesetzt und die Fehlergrenze muss studiert werden. Gewiss ist, dass Aufmerksamkeit die Fehlergrenze hinausschieben kann, aber beseitigen kann sie den Fehler nicht.“ Schrieb Meringer 1885 (zit. nach Wehner, 1984) in seinen Überlegungen anlässlich des Untergangs der Frameè. Neben der Notwendigkeit, Fehler genauer zu untersuchen betonte der gleiche Autor aber auch den großen Gewinn dabei. Was Fehler so lehrreich macht, „... ist der Umstand, dass das Uhrwerk in solchen Augenblicken des Mantels entkleidet erscheint und ein Blick in die Räder möglich ist.“ (Meringer 1885 zit. nach Wehner, 1984) Der Fehler fungiert als „Fenster“ in die inneren Mechanismen.

Im Abschnitt über strukturelle Randbedingungen war die Untersuchung von Kopplungen zwischen zwei Bewegungen oder zwischen zwei Aufgaben allgemein, als derzeitiges Ziel der Forschung dargestellt worden. Dieses Konzept enthält den Gedanken, dass wechselseitige Beeinflussungen bei der gleichzeitigen Durchführung zweier Bewegungen nicht als Scheitern der Steuermechanismen angesehen wird, sondern als zwingend notwendiges Ergebnis ihrer Funktionsweise.

Die Idee, etwas über die Wirkweise eines Systems zu erfahren, indem man die Grenzen der Funktionalität erforscht, wurde bisher in der Psychologie üblicherweise mit dem Dual-Task Paradigma realisiert (Überblick bei Heuer, 1996). Die Veränderung einer Aufgabe durch Hinzufügen einer Zweitaufgabe kann Abhängigkeiten zwischen diesen beiden Aufgaben aufzeigen.

Das primäre Untersuchungsziel dieser Arbeit waren Mechanismen der Koordination menschlicher Bewegung. Unter Koordination ist dabei die gleichzeitige Ausführung von zwei Bewegungen zu verstehen. Mit den beiden Bewegungsaufgaben war damit schon eine Dual-Task Situation gegeben. Die Primäraufgabe war also selbst schon eine Doppelaufgaben. Die Grundidee dieser Arbeit war nun, eine dritte, nicht motorische Zusatzfähigkeit einzuführen, um etwas über das Zusammenwirken der beiden Erstaufgaben zu erfahren. Um die Metapher des vorigen Absatzes zu verwenden, ging es also darum, Kopplungen durch das Fenster Ablenkung zu betrachten.

1.4 Zusammenfassung und Fragestellung

Über all die Jahre hin und quer durch alle Ansätze, Theorien und Modelle der Koordination menschlicher Bewegung haben sich die beiden Anteile erhalten, die von Holst (1939) mit Beharrungstendenz und Magneteffekt bezeichnet hat. Je nach Zeit und Vorlieben der Autoren haben sie verschiedene Gestalten angenommen und wurden in verschiedenen Modellen formuliert, aber die wesentlichen Inhalte sind bis heute bestehen geblieben. Der Magneteffekt steht für eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Bewegungen, die Beharrungstendenz für Eigenschaften der Einzelbewegungen, die sich trotz gleichzeitiger Ausführung einer zweiten Bewegung nicht verändern.

Zur Modellierung der gegenseitigen Beeinflussung stehen sich das HKB-Modell (Haken, Kelso & Bunz, 1985) und das Modell parametrischer Kopplung (Heuer, 1993) gegenüber. Während das HKB-Modell nur die Koordination periodischer Bewegungen betrifft, können aufgrund des Modells der parametrischen Kopplung Vorhersagen zu periodischen und diskreten Bewegungen gemacht werden. Ein weiterer, wesentlicher Unterschied besteht darin, dass das Modell der parametrischen Kopplung zwischen Vorbereitung und Durchführung der Bewegung unterscheidet. Dadurch können auch Aussagen zu Reaktionszeiten gemacht werden.

Die Beharrungstendenz ist in beiden Modellen nur implizit enthalten. Zwei Anteile können ja nur dann gekoppelt werden, wenn sie erst einmal grundsätzlich unterscheidbar sind. Die Eigenständigkeit jedes einzelnen Anteils entspricht der Beharrungstendenz. Da aber nicht klar

ist, ob für die Entstehung der beiden Tendenzen unterschiedliche Mechanismen verantwortlich gemacht werden können, bestand der Bedarf, ein Konzept zu finden, das beide Anteile enthält. Das Konzept der strukturellen Randbedingung (Heuer & Keele, 1994) bietet genau dies und dient daher als theoretische Grundlage dieser Arbeit. Die Auswirkungen von strukturellen Randbedingungen werden in Form von Kopplungen an bestimmten Parametern der Bewegung gemessen. Deren Ursachen werden in zugrundeliegenden anatomische Strukturen gesucht.

Zur Untersuchung der Kopplungen in Koordinationsaufgaben wurde ein Ablenkungsansatz gewählt. Ablenkung sollte im Sinne eines „Fensters“ (Wehner, 1984) Einblick über zugrundeliegende Mechanismen der Bewegungssteuerung gewähren. Konkret sollte Ablenkung aufzeigen, welche Parameter der Bewegung von Ablenkung verändert werden und welche nicht. Wenn es so ist, dass manche Parameter durch Ablenkung verändert werden und andere nicht, lässt sich daraus erkennen dass es einerseits Strukturen gibt, die nur von der Koordinationsaufgabe, nicht aber von der Zusatzaufgabe benötigt werden und andererseits Strukturen, die an beiden Aufgaben beteiligt sind.

2 Kopf – Arm Koordination bei periodischen Bewegungen

2.1 Einleitung

Mit dem Aufkommen der Handys gewann die Frage nach Ablenkung und mentaler Belastung durch Zusatzaktivitäten beim Autofahren neu an Bedeutung. Während Auswirkung kognitiver Belastung auf Wahrnehmungsvorgänge bereits einiges wissenschaftliches Interesse fand, liegen die Zusammenhänge zwischen Zusatzbelastung und motorischen Anteilen der Handlungssteuerung weitestgehend im Dunkeln. Mit dieser Arbeit sollte ein erster Schritt unternommen werden, etwas Licht in diese komplexe Thematik zu bringen.

Ein wesentliches Merkmal motorischer Steuerung ist ihr schichtartiger Aufbau. Aufgabe des Zentralnervensystems ist es letztlich, den biologisch-physikalischen Körper zum Zwecke der Verfolgung übergeordneter Handlungsziele zu bewegen. Zwischen dem physikalischen Körper und den psychologischen Handlungszielen ist die Steuerung der Bewegung stufenartig organisiert. Mit einfachen und komplizierteren Reflexen, angeborenen und erlernten Bewegungsmustern, gezielten Bewegungen, Ausgleichsbewegungen zur Annäherung an das Ziel oder zur Sicherung der aufrechten Haltung seien nur einige dieser Zwischenstufen genannt. Die entsprechenden anatomischen Einheiten der Bewegungssteuerung sind die Muskeln, das Rückenmark, der Hirnstamm mit den Pyramiden und dem Mittelhirn sowie das Kleinhirn, die Basalganglien und die motorische Großhirnrinde.

Die Untersuchung der Zusammenarbeit des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes (Magnus, 1924, Hellebrandt et al., 1956, Shea et al. 1995) und höheren Schichten der Bewegungssteuerung war Ziel der beiden ersten Experimente dieser Arbeit. Durch neuronale Verschaltungen im Mittelhirn (Wilson, Ezure & Timerick, 1984, Suzuki, Timerick & Wilson, 1985). lassen sich bei Drehungen des Kopfes in horizontaler Ebene Strecktendenzen der gesichtszugewandten Extremitäten und Beugtendenzen der Gegenseite beobachten. Dieser Reflex ist aber offensichtlich bei erwachsenen Menschen durch kortikale Steuervorgänge überlagert. Die Idee dieser Untersuchung war, höhere, kortikale Denkprozesse durch Ablenkung zu blockieren, um es dem tieferliegenden Reflex zu ermöglichen, mehr Einfluss auf die Bewegungssteuerung zu gewinnen. Dies sollte sich in einer Veränderung von Parametern der Koordination bemerkbar machen.

Im ersten Experiment waren dazu periodische Drehbewegungen mit dem Kopf und mit einer Fahrradlenkstange gleichzeitig durchzuführen. Diese horizontalen Bewegungen wurden entweder gleichsinnig oder gegensinnig durchgeführt. Von gleichsinnig war dann die Rede, wenn Kopf und Lenker immer zur gleichen Seite bewegt wurden. Beim gegensinnigen Bewegungsmuster war der Lenker immer dann links, wenn der Kopf rechts war und umgekehrt. Diese Richtungsbeziehung zwischen Kopf und Lenker wird im weiteren auch als gleich- bzw. gegensinnige Phasenlage bezeichnet.

Während die Phasenbeziehung bei beidhändigen Bewegungen vielfach untersucht wurde und dabei immer symmetrische Bewegungen gegenüber asymmetrischen bevorzugt sind, lagen bisher zur Richtungsbeziehung zwischen Kopf und Lenkbewegungen keine Daten vor. Naheliegend ist eine Bevorzugung des gleichsinnigen Bewegungsmusters. Diese zunächst theoretisch nicht näher beleuchtete Annahme bestätigte sich in einigen Experimenten mit derartigen Bewegungen (Heuer & Klein, 1999a). Das gleichsinnige Bewegungsmuster war immer stabiler als das gegensinnige was sich in kleinerer Phasenvariabilität zeigte.

Nach dem Bewegungsmuster des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes sollte aber bei der hier vorliegenden Untersuchungssituation das gegensinnige Bewegungsmuster bevorzugt sein. Bei Drehungen des Kopfes nach rechts gibt es Strecktendenzen der rechten Extremitäten und Beugtendenzen der linken. Eine Streckung des rechten Armes führt aber zu einer

Lenkbewegung nach links und umgekehrt. „Wenn der Kopf nach rechts gedreht ist, streckt sich der rechte Arm, der linke wird abgebogen, die Lenkbewegung geht nach links“, so spricht der tonische Halsreflex. Die Frage ist nur, ob er überhaupt etwas zu sprechen hat bei der Steuerung willkürlicher Lenkbewegungen. Einigen Voruntersuchungen zu dieser Arbeit zufolge scheint das nicht der Fall zu sein (Heuer & Klein, 1999a). Und wenn nicht, wer oder was spricht dann? Und lässt sich dieses „andere“ durch Ablenkung „mundtot“ machen, so dass der Reflex doch noch zu Wort kommt?

Etwas weniger bildhaft ausgedrückt lässt sich die Fragestellung des ersten Experimentes wie folgt formulieren: Ist es bei der Koordination periodischer Kopf- und Lenkbewegungen möglich, höhere, kortikale Steuervorgänge durch Ablenkung soweit zu blockieren, dass der tiefer liegende, tonische Halsreflex zu Tage tritt und zu einer Bevorzugung des gegensinnigen Bewegungsmusters führt?

Experimentelle Befunde bezüglich höherer Steuervorgänge der Koordination sowie der Beteiligung des Reflexes an diesen Prozessen beim gesunden, erwachsenen Menschen werden in dem nun folgenden Abschnitt beschrieben.

2.1.1 Kopplung bei periodischen Bewegungen

Strukturelle Randbedingungen in Form von Kopplungen lassen sich bei periodischen Bewegungen auf verschiedenen Ebenen beobachten. Neben Abhängigkeiten von zeitlichen und räumlichen Bewegungsparametern gibt es auch Tendenzen, bestimmte Körperteile in bestimmter Weise gleichzeitig zu bewegen. Eine ausführliche Darstellung derartiger Kopplungen würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen (Überblick z.B. bei Heuer, 1994). Für jede der drei genannten Gruppen seien daher nur wenige Beispiele und die aus verschiedenen Untersuchungen zusammengefassten Ergebnisse dargestellt. Da Kopplungen zwischen Arm- und Kopfbewegungen bisher nur im Zusammenhang mit Zeigebewegungen untersucht wurden, werden in einem kurzen Exkurs einige wichtige Ergebnisse dieser Aufgabengruppe dargestellt.

2.1.1.1 Zeitliche Kopplung

Zeitliche Kopplung von zwei Bewegungen ist durch eine gewisse Bipolarität gekennzeichnet. So gibt es auf der einen Seite eindeutig Belege für die Bestrebung, die beiden Bewegungen in einem einheitlichen zeitlichen Schema zu vereinen.

Die deutlichste Ausprägung zeitlicher Kopplung zeigt sich bei dem Versuch, zwei unterschiedlich weite Bewegungen gleichzeitig auszuführen. Während die beiden unterschiedlich weiten Bewegungen unterschiedlich lange dauern, wenn sie einzeln durchgeführt werden, passen sich die Dauern bei gleichzeitiger Durchführung aneinander an (z.B. Marteniuck, MacKenzie & Baba, 1984).

Auch dass es nahezu unmöglich ist, mit einer Hand ein Quadrat und gleichzeitig mit der anderen einen Kreis zu zeichnen, dürfte an den unterschiedlichen zeitlichen Strukturen der beiden Bewegungen liegen. Es besteht die Tendenz, dass eine Kurve umso schneller ausgeführt wird, je mehr sie gebogen ist (Lac quanti, Terzulo & Viviani, 1983, Wann et al, 1988). Beim Kreis entsteht dadurch ein relativ konstantes Geschwindigkeitsprofil, wohingegen sich beim Viereck besonders langsame mit besonders schnellen Teilstrecken abwechseln.

Zahlreiche Befunde zu zeitlichen Kopplungserscheinungen stammen aus Versuche mit sogenannten Tappingaufgaben (Überblick z.B. bei Vorberg & Wing, 1994). In dieser Art von Experimenten werden, meist mit einem Finger jeder Hand, unterschiedliche Rhythmen geklopft („tapped“). Dabei zeigen sich höhere Unregelmäßigkeiten der Bewegungsausführung bei komplizierteren Rhythmen wie 3:2 oder 5:4 als bei einfachen wie 1:2 oder 1:3.

Andererseits lassen sich aber auch zeitliche Unabhängigkeiten beobachten, oft in Zusammenhang mit hoch automatisierten Bewegungen wie gehen oder atmen. Muzzi et al. (1984) ließen ihre Vpn zum Beispiel gleichzeitig laufen und in die Hände klatschen. Die meisten Vpn. synchronisierten das Klatschen der Hände mit dem Aufsetzen der Ferse, aber einige zeigten keine zeitliche Regelmäßigkeit der Phasenlage der beiden Bewegungen.

So klar, dass zwei gleichzeitig ausgeführte Bewegungen zeitlich gekoppelt sind, so unklar ist, wie das geschieht. Die Gesetzmäßigkeiten, wie zwei Bewegungen zeitlich koordiniert werden, sind noch nicht erschöpfend erforscht. Noch mehr gilt das für die dahinterstehenden Timing-Mechanismen.

2.1.1.2 Räumliche Kopplung

Ein Beispiel für eine Richtungskopplung von Armen und Beinen fanden Baldissera et al (1991). Gleichzeitige auf und ab Bewegungen von einem Fuß und einer Hand ließen sich in die gleiche Richtung leichter durchführen als in die Gegenrichtung. Bei einer bestimmten Grenzggeschwindigkeit wechselte das gegensinnige Bewegungsmuster automatisch auf das gleichsinnige. In vertikaler Raumebene fand sich also eine direkte Richtungsabhängigkeit zwischen Füßen und Händen.

2.1.1.3 Homologe Kopplung

Bei den Händen lassen sich je nach Raumebene unterschiedliche Abhängigkeiten beobachten. In der Vertikalen werden symmetrische Bewegungen bevorzugt, in der Horizontalen asymmetrische. Ein Beispiel für vertikale Bewegungen ist abwechselndes Schlagen der beiden Zeigefinger auf einen Tisch. Dieses Koordinationsmuster springt, wenn man es immer schneller ausführt bei einer bestimmten Grenzfrequenz auf gleichzeitiges Schlagen um. Ein gut untersuchtes Koordinationsmuster von Bewegungen in der horizontalen Ebene ist das gleichzeitige malen von Kreisen mit beiden Händen (z.B. Stucchi & Viviani, 1993). Dabei werden symmetrische Bewegungen bevorzugt, das sind aber Kreise in die Gegenrichtung. Die Koordination der Hände dürfte durch homologe Kopplung bestimmt sein. Nicht die Richtung im Raum ist ausschlaggebend, sondern die Aktivierung der gleichen Muskelgruppen. Das führt je nach Raumebene zu Bewegungen in die gleiche oder in die Gegenrichtung.

Ein bestimmter Aspekt homologer Kopplung, transiente Kopplungserscheinungen, war Inhalt des dritten Experimentes dieser Arbeit. Dieses Thema wird daher im Einleitungsteil des dritten Experimentes näher erörtert.

2.1.1.4 Exkurs: Richtungskopplung bei Zeigebewegungen

Richtungskopplung zwischen Arm und Kopfbewegungen bzw. Kopfhaltungen wurden bislang nur bei konkreten Zeigebewegungen untersucht (z.B. Kohl, 1956). Die Vpn sollten immer in die gleiche Richtung zeigen. Wenn sie dabei die Blickrichtung mit einer Kopfdrehung nach rechts veränderten, zeigten sie auch mehr nach rechts und umgekehrt, was auf die Beteiligung eines kopf-zentrierten Bezugssystem hindeutet. Versuche, bei denen mit Hilfe von Nackenmuskelvibration Kopfbewegung nur simuliert wurde, bestätigten diese Annahme (Biguer, Donaldson, Hein und Jeannerod, 1988). Vanden Abeele, Delreux, Crommelinck und Roucoux (1993) konnten belegen, dass Zeigebewegungen ohne Augenbewegung in einem Augen zentrierten und mit Augenbewegung in einem Kopf zentrierten Referenzrahmen kodiert sind. Wie weit sich die Ergebnisse aus Untersuchungen mit konkreten Bewegungen auf periodische Bewegungen übertragen lassen ist allerdings unklar.

Die alltagstheoretisch begründete Annahme, Bewegungen in die gleiche Richtung wären einfacher als Bewegungen in die Gegenrichtung heißt nichts anderes als die Annahme motorisch bedingter Richtungsabhängigkeiten zwischen Bewegungen verschiedener Effektoren. So naheliegend diese Annahme auch ist, so schwierig ist es, sie theoretisch zu

formulieren. Empirische Nachweise fehlen bisher weitgehendst. Die vorliegenden empirischen Belege für Richtungskopplungen zeigen ein durchaus uneinheitliches Gesamtbild.

2.1.2 Veränderung der Kopplung

Angeregt vor allem durch die Theorien der gekoppelten Oszillatoren und der dynamischen Modelle wurden in den letzten 25 Jahren zahlreiche Experimente zu periodischen Bewegungen durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden Ergebnisse aus Experimenten dargestellt, die nicht die Kopplung an sich, sondern deren Veränderung durch unterschiedliche Aufgabenstellung zum Inhalt hatten. Die Veränderung der Kopplung wurde dabei durch unterschiedliche Aufmerksamkeitszuwendung, durch Veränderung der mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile oder durch Hinzufügen einer Zusatzaufgabe erreicht.

Die Darstellung der Ergebnisse beschränkt sich auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Aufgabensituationen allein auf Phasenverschiebung und Phasenvariabilität. Die Darstellung von Ergebnissen zu Kennwerten rund um den Phasensprung wird auf das zum Verständnis des jeweiligen Ergebnisses nötige Ausmaß beschränkt, da Phasensprünge in der hier vorliegenden Arbeit aufgrund zu langsamer Bewegungen nicht vorkamen und der Phasensprung daher nicht unmittelbares Thema dieser Arbeit ist. Andererseits fehlen leider in den beschriebenen Arbeiten Angaben zu Bewegungsparametern wie Bewegungsweiten oder Periodendauern der einzelnen Bewegungen, die zu betrachten für ein besseres Verständnis der Steuerprinzipien und -mechanismen menschlicher Bewegung durchaus lohnenswert wäre. Aber auch die Verwendung von Phasenverschiebung und Phasenvariabilität ist bei den verschiedenen Autoren durchaus unterschiedlich. Wenn in den folgenden Ausführungen bei manchen Experimenten nur von Phasenvariabilität oder nur von Phasenverschiebung berichtet wird liegt das nicht an mangelnder Darstellung, sondern daran, dass die Autoren in den entsprechenden Arbeiten zu den nicht erwähnten Bewegungsparametern keine Aussagen machen.

2.1.2.1 Veränderung durch Aufmerksamkeitszuwendung

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Experimenten zu Bewegungskoordination mit systematisch variiertem Aufmerksamkeitszuwendung. In der einen Art wird nur eine Koordinationsaufgabe durchgeführt. Die Aufmerksamkeit wird dann der einen oder der anderen Bewegung zugewandt. Bei der anderen Art wird zusätzlich eine Ablenkungsaufgabe durchgeführt. Die Aufmerksamkeit richtet sich in derartigen Experimenten entweder mehr auf die Zusatztätigkeit oder mehr auf die Koordination. Der wichtige Unterschied zwischen diesen beiden Arten ist, dass in der ersten die eine oder die andere Bewegung besonders beachtet wird und in der zweiten beide Bewegungen gleich, und zwar entweder beide stark oder beide nicht stark. Die Aufmerksamkeit wird also, wenn sie auf die Bewegung konzentriert ist, auf die Koordination selbst gerichtet. Dieser Unterschied ist bei dem Vergleich der Ergebnisse zu beachten. Im zusammenfassenden Absatz am Ende dieses Abschnittes wird entsprechend darauf eingegangen.

Die Aufgabe in einer Studie von Stucchi & Viviani (1993) bestand darin, im Stehen mit vorgestreckten und gebeugten Armen Ellipsen durch Bewegung der Ellbogen und Schultern mit beiden Zeigefingern gleichzeitig in die Luft zu malen. Diese Bewegungen wurden in vier verschiedenen Mustern durchgeführt. Die zwei gleichphasigen Muster waren einwärts und auswärts, also symmetrische Bewegungen. Die zwei gegenphasigen Muster waren parallele Ellipsen mit und gegen den Uhrzeigersinn. Sechs verschiedene Geschwindigkeiten zwischen 40 und 90 Kreisen pro Minute wurden durch ein akustisches Taktsignal vorgegeben, das aber

aufhörte, wenn die Messung begann. Die Probanden waren angehalten die Geschwindigkeit möglichst beizubehalten.

Bei Rechtshändern eilte die rechte Hand um 24 msec voraus, bei Linkshändern die linke um 21 msec. Bewegungstyp und Geschwindigkeit hatten keinen signifikanten Einfluss. Um die Aufmerksamkeit auf eine der beiden Hände zu lenken, wurde ein Tongenerator an der entsprechenden Hand befestigt. Die Probanden waren angehalten, auf den Ton zu achten. Dies bewirkte allerdings keinerlei Veränderung der Phasenverschiebung. Allerdings war diese Aufmerksamkeitszuwendung nur bei gleichphasigen Bewegungen angewandt worden, da kein Grund bestand anzunehmen, dass dies bei gegenphasigen Bewegungen anders sein könnte.

Die Autoren (Stucchi & Viviani, 1993) erklärten diesen von Bewegungsmuster, Geschwindigkeit und Aufmerksamkeitszuwendung unabhängigen Vorlauf der dominanten Hand um ca. 25 msec mit der „interhemispheric transmission time hypothesis“ (=Transporthypothese). Nach dieser Hypothese wird ein Bewegungsprogramm für beide Bewegungen in der dominanten Hemisphäre programmiert. Der beobachtete zeitliche Verzug der nicht dominanten Hand entspricht der Zeit, die dafür benötigt wird, dieses Programm in die nicht dominante Hemisphäre zu transportieren.

Nicht direkt widerlegen, aber in ihrer Bedeutung doch beträchtlich relativieren konnten diese Hypothese Swinnen, Jardin & Meulenbroek (1996) mit einem ganz ähnlichen Experiment. Sie ließen ihre Probanden mit beiden Händen gleichzeitig Kreise in horizontaler Ebene auf einem Digitalisiertablett malen. Das gleichphasige Muster waren wieder symmetrische Bewegungen, das heißt, die Kreise einer Hand wurden gegen den Uhrzeigersinn und jene der anderen Hand im Uhrzeigersinn gemalt. Die Geschwindigkeit wurde durch ein akustisches Signal vom Computer vorgegeben und betrug 1 Hz. Gegenphasige Bewegungen wurden nicht untersucht. Unterschiedliche Aufmerksamkeitszuwendung wurde durch die Instruktion erreicht, entweder die dominante Hand oder die nicht dominante Hand zu beobachten. Außerdem wurden die Bewegungen mit geschlossenen Augen und ohne besondere Aufmerksamkeitszuwendung durchgeführt. Rechtshänder wurden mit Linkshändern verglichen, wobei für beide Gruppen nur Probanden mit ausgeprägter Dominanz ausgewählt wurden.

Die dominante Hand eilte im Schnitt um 6.7° (=19 ms) voraus, bei Rechtshändern deutlich mehr als bei Linkshändern. Wenn die dominante Hand beobachtet wurde, vergrößerte sich der Vorlauf der dominanten Hand wohingegen sich die Phasenvariabilität verkleinerte. Das Bewegungsmuster wurde also durch Aufmerksamkeitszuwendung bei größerer Phasenverschiebung insgesamt stabiler. Bei Beobachtung der nicht dominanten Hand verringerte sich die Phasenverschiebung und erhöhte sich die Phasenvariabilität. Bei verteilter Aufmerksamkeit oder beim blinden malen lagen die Werte jeweils dazwischen. Signifikante Unterschiede dieser Einflüsse zwischen Rechts- und Linkshändern bestanden nicht.

Am unteren Ende befestigte Holzstäbe wurden von den Probanden bei Amazeen et al (1997) mit den Händen vor und zurück gependelt. Diese Bewegungen wurden nur gleichphasig, das heißt beide gleichzeitig vor und zurück, in einer Frequenz von 0.83 Hz ausgeführt. Unterschiedliche Aufmerksamkeitszuteilung wurde durch Papierstreifen bewirkt, die von oben herabhängend einer der beiden Hände als Zielpunkte der Pendelbewegung diente. Das Ende des Stabes sollte immer von einem Papierstreifen zum anderen und zurück geschwungen werden.

Bei Linkshändern war die linke Hand um 6.8° (= 23 msec) voraus, bei Rechtshändern die rechte um 2.6° (= 9 msec). Aufmerksamkeitszuwendung auf die dominante Hand vergrößerte die Phasenverschiebung und verringerte die Phasenvariabilität. Aufmerksamkeit auf die nicht dominante Hand verkleinerte die Phasenverschiebung und vergrößerte die Phasenvariabilität.

Rechtshänder hatten tendenziell kleinere Phasenvariabilitäten. Die Aufmerksamkeitsverteilung wirkte sich bei beiden Gruppen in gleicher Weise aus.

Die beiden letztgenannten Experimente führten also zu gleichen Ergebnissen. Durch Aufmerksamkeitszuwendung zur dominanten Hand vergrößerte sich die Phasenverschiebung und durch Aufmerksamkeitszuwendung zur nicht dominanten Hand verkleinerte sie sich. Größere Phasenverschiebung ging mit kleinerer Phasenvariabilität einher.

Warum das erstgenannte Experiment sich im Ergebnis davon unterscheidet, ist bis heute nicht ganz klar. Beim Malen von Kreisen (Swinnen, Jardin & Meulenbroek, 1996) und beim Pendeln von Holzstäben (Amazeen et al., 1997) konnte eine Verringerung der Phasenverschiebung durch Aufmerksamkeitszuwendung auf die nicht dominante Hand erreicht werden. Dies wurde im Gegensatz dazu bei der Ausführung von Kreisen des Zeigefingers bei vorgestreckten Armen (Stucchi & Viviani, 1993) nicht beobachtet. Swinnen et al sehen die Hauptursache für diesen Unterschied darin, dass die Befestigung eines Tongenerators an der bewegten Hand nicht so wirksam die Aufmerksamkeit auf die betreffende Hand lenkt wie die Anweisung, nur diese Hand zu beobachten.

Weitere Unterschiede der Aufgabe waren die Ebene, in der die Bewegung stattfand. Bei den Pendelbewegungen war das die Saggitalebene, beim Malen von Kreisen am Digitalisiertablett die horizontale und beim Kreisen mit vorgestreckten Armen die Frontalebene. Ein anderer und vielleicht wichtigerer Unterschied bestand darin, dass bei den beiden Experimenten, in denen eine Veränderung der Phasenverschiebung durch Aufmerksamkeitszuwendung beobachtet wurde, die Bewegung im Gegensatz zu dem Experiment in dem Aufmerksamkeitszuwendung keine Veränderung der Phasenverschiebung bewirkte, extern durch Töne getriggert war.

Um den Einfluss von willkürlicher Aufmerksamkeitszuwendung auf die Koordination von zwei Handbewegungen mit einer motorischen Zusatzaufgabe ging es in einem Experiment von Temprado et al (1999). Die Koordinationsaufgabe bestand darin, mit beiden Händen je einen Joystick seitlich hin und her zu bewegen. Die Frequenz war nicht vorgegeben und lag bei durchschnittlich 1.55 Hz. Die Bewegungen wurden in gleich- und in gegenphasigem Bewegungsmuster durchgeführt. Als Zusatzaufgabe sollten die Vpn auf akustische Signale hin möglichst schnell mit einem Druck beider Zeigefinger gleichzeitig auf die Feuer-Taste des jeweiligen Joysticks reagieren. Die Probanden wurden instruiert, die Aufmerksamkeit wahlweise entweder der Koordinationsaufgabe oder der Reaktionszeitaufgabe zuzuwenden oder gleichmäßig auf die beiden Aufgaben zu verteilen.

Eine Zuwendung der Aufmerksamkeit auf die Koordinationsaufgabe bewirkte sowohl bei der allein durchgeführten Koordinationsaufgabe als auch in Kombination mit der Reaktionszeitaufgabe eine Verringerung der Phasenvariabilität im gegenphasigen Muster, während sich das gleichphasige Muster nicht änderte.

Versuchsordnung und Aufgabe waren in einer weiteren Studie (Monno et al 2000) sehr ähnlich. Die Geschwindigkeit der Bewegung wurde aber systematisch in sechs Stufen von 1.0 bis 3.5 Hz variiert. Dazu wurde die Frequenz durch ein optisches Metronom vorgegeben, das jedoch erlöschte, sobald die Messung der Bewegung begann. Die Bewegungen waren dann also intern getriggert. Ein weiterer Unterschied bestand in der Art der Zusatzaufgabe. In diesem Experiment sollten die Probanden auf das akustische Signal hin mit beiden Füßen gleichzeitig Fußtasten betätigen.

Es wurde immer im gegenphasigen Muster begonnen. Bei den höheren Frequenzen kam es dann häufiger zum Phasensprung, also zu einem plötzlichen Wechsel in des gleichphasige Muster. Die Aufmerksamkeit sollte entweder der Bewegungsaufgabe zugewandt oder gleichmäßig verteilt werden.

Die Phasenvariabilität wurde mit zunehmender Frequenz größer und konnte durch Aufmerksamkeitszuwendung verringert werden. Der Einfluss der Aufmerksamkeitszuwendung war aber von der Frequenz unabhängig (keine signifikante Interaktion). Das galt sowohl für die in gegenphasigem Muster durchgeführten Perioden vor dem Phasensprung als auch für die in gleichphasigem Muster durchgeführten Perioden nach dem Phasensprung, nur dass bei den letzteren die Phasenvariabilität grundsätzlich kleiner war als bei den ersteren.

Sowohl Phasenvariabilität als auch Phasenverschiebung können bei manchen Aufgaben durch Aufmerksamkeitszuwendung verändert werden und bei manchen nicht. Beides, die Art der Aufmerksamkeitszuwendung und Merkmale der Bewegungsaufgabe, scheinen dabei von Bedeutung zu sein. Offensichtlich ist es nicht unerheblich, ob die Aufmerksamkeit durch optische oder akustische Hinweisreize gelenkt wird und ob sie auf einen der beiden bewegten Körperteile gerichtet wird oder auf das gesamte Muster. An Merkmalen der Bewegung scheinen vor allem die räumliche Ebene, die beteiligten Körperteile sowie die Tatsache, ob die Bewegung intern oder extern getriggert ist, von Bedeutung zu sein.

Die zu Beginn dieses Abschnitts gestellte Frage, ob ein Zuwenden der Aufmerksamkeit auf eine der beiden der koordinierten Bewegungen sich anders auswirkt als die Konzentration auf das Bewegungsmuster gesamt lässt sich auf Grund der vorliegenden Ergebnisse nur ansatzweise beantworten. Das liegt daran, dass in zwei von den drei Experimenten, die zur ersten Gruppe zählen, nur die Phasenverschiebung gemessen wurde und in jenen, die der zweiten Gruppe zugeordnet werden können, nur die Phasenvariabilität. Als einzige Ausnahme wurde in dem Experiment mit den vor und zurück gependelten Holzstäben (Amazeen et al. 1997) auch die Phasenvariabilität gemessen. Diese konnte durch Zuwenden der Aufmerksamkeit auf die dominante Hand verkleinert werden. Konzentration auf die nicht dominante Hand bewirkte eine Vergrößerung der Phasenvariabilität. Die Phasenvariabilität ließ sich also durch Zuwenden der Aufmerksamkeit sowohl auf die dominante Hand als auch auf das Bewegungsmuster als ganzes verkleinern.

Ob die Aufmerksamkeitszuwendung bei gleichphasigem Bewegungsmuster anders wirkt als bei gegenphasigem geht aus den bisher dargestellten Befunden nicht eindeutig hervor. Experimente, die durch Veränderung der mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile Veränderungen der Kopplung bewirken widmeten sich genau auf diese Frage.

2.1.2.2 Veränderung durch Veränderung der mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile

Bei Baldissera et al. (1991) bewegten die Probanden die rechte Hand und den rechten Fuß periodisch auf und ab. Sowohl die Hand als auch der Fuß waren jeweils an eine Platte befestigt, deren Rotation um eine unterhalb des Hand- bzw. Fußgelenks gelegene Rotationsachse gemessen wurde. Die Bewegungen wurden in gleichphasigem und gegenphasigem Bewegungsmuster bei Frequenzen von 0.6 bis 3.0 Hz durchgeführt. Bei gleichphasigem Bewegungsmuster betrug der Vorlauf des Fußes bis zu 35°, bei gegenphasigem deutlich weniger.

Die Bewegungen der Hand wurden entweder durch Gummibänder elastisch oder durch eine Bleischeibe gleichmäßig gebremst. Das elastische Bremsen hatte keine systematische Auswirkung auf den Vorlauf des Fußes. Das gleichmäßige Bremsen vergrößerte hingegen die Phasenverschiebung im gleichsinnigen Bewegungsmuster, und verkleinerte sie im gegensinnigen. Die Verringerung des Vorlaufes des Fußes erreichten die Probanden durch entsprechend früheres Einsetzen der Armmuskelaktivität (gemessen mittels EMG).

Dieses auf den ersten Blick erstaunliche Ergebnis erklärten die Autoren (Baldissera et al., 1991) durch unterschiedliche Verwendung von Feedback bei den beiden Bewegungsmustern.

Während das einfachere, gleichphasige Bewegungsmuster weitgehend automatisch abläuft, wird das schwierigere, gegenphasige Bewegungsmuster durch vermehrte Überwachung aufrecht erhalten. Daher ist die Phasenverschiebung im gegenphasigen Bewegungsmuster grundsätzlich kleiner und gleichmäßiges Bremsen kann besser kompensiert werden. Beim gleichphasigen Muster hingegen wird das weitere Zurückhinken ja gar nicht bemerkt und deshalb auch nicht kompensiert. Das Bremsen kann sich deshalb stärker auf die Bewegung auswirken.

In einer weiteren Studie (Baldissera, Borroni & Cavallari, 2000) untersuchten die Autoren bei gleicher Aufgabenstellung die Kompensationsmechanismen genauer. Wieder war die Phasenverschiebung im gegenphasigen Muster kleiner. Frauen zeigten im gleichphasigen Bewegungsmuster mit 20.3° größere Phasenverschiebung als Männer (16.2°), im gegenphasigen geringere (2.9° , Männer 8.7°).

Da dieser Unterschied möglicherweise von unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile herrühren könnte, wurde die Phasenantwortkurve (Phase Response) als Kennwert der mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile herangezogen. Mittels EMG (Elektromyografie) lässt sich Aktivität der Muskeln unabhängig von beobachtbarer Bewegung messen. Üblicherweise beginnt Muskelaktivität schon einige Zeit, bevor der entsprechende Körperteil tatsächlich in Bewegung versetzt wird. Die Phasenantwort ist die Zeit zwischen dem Einsetzen von Muskelaktivität und dem tatsächlichen Bewegungsbeginn. Dieser Kennwert ist von Gewicht und Elastizität der bewegten Körperteile abhängig. Je schwerer ein Körperteil ist, desto länger ist die Phasenantwort. Aber auch ein elastischer Körperteil hat eine längere Phasenantwort als ein steifer.

Die Phasenantwort war bei Frauen unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegungsausführung immer bei der Hand um ca. 45° größer als beim Fuß. Bei Männern vergrößerte sich der Unterschied zwischen den Gliedmaßen bei höherer Geschwindigkeit. Dieser Unterschied ließ auch unterschiedliche Kompensationsstrategien erwarten und tatsächlich zeigte sich, dass nur bei Männern die Aktivität der Handmuskeln kompensatorisch je früher einsetzten je schneller die Bewegungen ausgeführt wurden. Frauen aktivierten die Muskeln von Hand und Fuß bei allen Geschwindigkeiten gleichzeitig.

Die Kompensation durch früheres Einsetzen der Handmuskelaktivität war jedoch nur eine von zwei Strategien, die angewandt wurden. Die andere Strategie war eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Handbewegung durch gleichzeitige Anspannung von Agonisten und Antagonisten. Durch die dadurch bewirkte Versteifung wurden elastische Komponenten der Handbewegung erhöht und die mechanischen Eigenschaften der Handbewegung wurden insgesamt denen der Fußbewegung ähnlicher. Diese Strategie wendeten sowohl Frauen als auch Männer beim gegenphasigen Bewegungsmuster an.

Das elastische Bremsen der Bewegung veränderte die mechanischen Eigenschaften auf ähnliche Weise wodurch die geringere Phasenverschiebung erklärt werden kann. In dieser Bedingung setzten bei Männern und Frauen die EMG Aktivitäten der Hände gleichzeitig mit denen der Füße ein (Baldissera & Cavallari, 2001). In dieser Studie wurde vor allem auch hinterfragt, auf welche Art die Probanden das zeitliche Vorseilen der Armmuskelaktivität realisierten. Dies geschah dadurch, dass der Handbeuger (ECR extensor carpi radialis) verhältnismäßig mehr an der Bewegung beteiligt war als der Strecker (TA tibialis anterior). Dieses Ungleichgewicht stieg mit zunehmender Geschwindigkeit im ungeladenen Zustand an. Ebenso erhöhte gleichmäßiges Bremsen die übermäßige Beteiligung des Beugers wohingegen elastisches Bremsen zu dessen Verringerung führte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Veränderung der Phasenverschiebung zwischen periodischen Hand und Fußbewegungen von Veränderung der mechanischen

Eigenschaften bei gleichphasigen Bewegungen anders abhängt als bei gegenphasigen. Deutliche Anzeichen sprechen dafür, dass im gegenphasigen Bewegungsmuster propriozeptives Feedback mehr zur Aufrechterhaltung des Bewegungsmusters herangezogen wird als bei gleichphasigen Bewegungen. Damit einher geht die Bemühung, durch Veränderung von Muskelanspannungen die mechanischen Eigenschaften der Hand zu verändern, um sie denen des Fußes ähnlicher zu machen. Im gleichphasigen Bewegungsmuster hingegen scheinen Männer und Frauen unterschiedliche Strategien anzuwenden um mit den unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Körperteile umzugehen.

Ob diese Strategieeffekte auch Auswirkung auf die Phasenvariabilität haben, wurde nicht untersucht. Der aus den Experimenten mit unterschiedlicher Aufmerksamkeitsverteilung nur vage hervorgegangene Befund, dass die beiden Phasenlagen unterschiedlich gesteuert sein könnten, wird durch diese Ergebnisse bekräftigt. Mit der Erklärung unterschiedlich starker Verwendung von propriozeptivem Feedback liegt auch eine sehr plausible Erklärungsansatz vor.

Sowohl die im vorigen Abschnitt dargestellte Aufmerksamkeitszuwendung als auch die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der bewegten Körperteile veränderten Phasenverschiebung und Phasenvariabilität. Allerdings lässt sich kein einheitliches Muster ausmachen. Der Einfluss der die Kopplung verändernden Faktoren scheint sehr stark von der Aufgabe abzuhängen. Die Dritte Art von Befunden zu Veränderungen der Kopplung waren Experimente, in denen Kopplung durch Ablenkung verändert wurde. Diese werden im folgenden beschrieben.

2.1.2.3 Veränderung durch Ablenkung

Ähnlich wie bei den Experimenten mit unterschiedlicher Aufmerksamkeitszuwendung, lassen sich auch bei den Ablenkungsexperimenten zwei Arten voneinander unterscheiden. Der Unterschied besteht darin, wie der Einfluss der Ablenkung variiert wird. Dies kann entweder durch Verändern der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe bewirkt werden oder durch Verschieben der Aufmerksamkeit entweder auf die Erstaufgabe oder auf die Zusatzaufgabe. Dem aufmerksamen Leser ist es bestimmt nicht entgangen, dass die zweite Gruppe genau der zweiten Gruppe der Experimente mit veränderter Aufmerksamkeitszuwendung entspricht. Das ist auch insofern logisch, als es sich ja um Experimente handelt, in denen einerseits die Aufmerksamkeitszuwendung variiert wird und die andererseits Ablenkung im Sinne einer Zusatztätigkeit enthalten. Die Ergebnisse der entsprechenden Experimente werden daher noch einmal kurz angeführt.

In der schon erwähnten Arbeit von Temprado, Zanone & Laurent (1999) bewegten die Probanden mit jeder Hand einen Joystick in gleich- und gegenphasigem Bewegungsmuster. Neben den weiter oben schon berichteten Einflüssen unterschiedlich zugewandter Aufmerksamkeit wurde auch der grundsätzliche Einfluss von Ablenkung durch Vergleich der Bewegungsaufgabe allein mit der Dual-Task Situation untersucht. Die Zweitaufgabe war möglichst schnelles Drücken der Feuer-Taste beider Joysticks mit den Zeigefingern auf ein akustisches Signal hin.

Im Vergleich zur Einzelaufgabensituation erhöhte die Zusatzaufgabe die Phasenvariabilität im gegenphasigen Bewegungsmuster, nicht aber im gleichphasigen. Zuwenden der Aufmerksamkeit zur Bewegungsaufgabe konnte einen Teil dieser Erhöhung der Phasenvariabilität ausgleichen. Zuwenden der Aufmerksamkeit zur Zweitaufgabe hingegen erhöhte den Effekt noch.

Dieses Ergebnis, dass die Phasenvariabilität verringert werden kann, wenn die Bewegungsaufgabe verstärkt und die Ablenkaufgabe weniger beachtet wird, konnten die

Autoren in einer nachfolgenden Studie (Monno et al 2000) bestätigen. Eine andere Zusatztätigkeit, nämlich gleichzeitiges Reagieren beider Füße sowie unterschiedliche Frequenzen der Bewegungsaufgabe hatten keinen Einfluss auf diesen Effekt.

Die Probanden bei Summers et al (1998) malten mit beiden Händen Kreise und zählten dabei Töne. Das Malen der Kreise erfolgte in den vier Bedingungen einwärts/auswärts und im/gegen den Uhrzeigersinn. Die Frequenz war durch ein Metronom vorgegeben und entsprach der zuvor ermittelten kritischen Frequenz der jeweiligen Vp. 2/3 davon. Die taktgebenden Töne konnten entweder hoch (1000 Hz) oder tief (500 Hz) sein. Die Zusatzaufgabe bestand darin die hohen Töne zu zählen und die Summe am Ende jedes Durchganges zu berichten. Der Prozentsatz der zu zählenden Töne und damit die Schwierigkeit der Zusatzaufgabe war in fünf Stufen zwischen 0% und 70% variiert.

Der Vorlauf der dominanten Hand gegenüber der nicht dominanten vergrößerte sich durch höhere Schwierigkeit der Zusatzaufgabe nur im gegenphasigen Bewegungsmuster und bei der höheren Geschwindigkeit. Die Phasenvariabilität blieb durch unterschiedliche Schwierigkeit der Zweitaufgabe bei beiden Bewegungsmustern unberührt.

Da auch die Zähl Aufgabe mehr Fehler zeigte wenn die Bewegungsaufgabe im gegenphasigen Muster und in der höheren Geschwindigkeit ausgeführt wurde, sahen sich die Autoren berechtigt, anzunehmen, dass das gegenphasige Bewegungsmuster höhere kognitive Anforderungen stellt als das gleichphasige.

Diese Annahme wurde in einem Experiment bestätigt, in dem Fingerbeugebewegungen im Takt eines Metronoms durchgeführt wurden (Carson et al., 1999). Das Synchronisieren einer einzelnen Bewegung zu einem vorgegebenen Takt ist zwar nicht direkt eine Koordinationsaufgabe, da sich aber die typische Charakteristik von Koordination mit einer stabileren und einer instabileren Phasenlage und dem Phasensprung beobachten lässt, ist ein Vergleich mit Koordinationsaufgaben durchaus sinnvoll.

Die Probanden führten rhythmische Bewegungen mit dem rechten Mittelfinger zum Takt eines Metronoms aus. Das gleichphasige Bewegungsmuster war, die Beugung des Fingers mit dem Takt des Metronoms zu synchronisieren, das gegenphasige die Streckung. Es wurde die kritische Frequenz über alle Vpn gemittelt. Sie betrug 2.76 Hz. Die Bewegungen wurden knapp darüber und knapp darunter durchgeführt (+0.4/-0.1 KF). Als Zusatzaufgabe mussten die Vpn auf optische Signale hin möglichst schnell eine Fußtaste betätigen.

Die Reaktionszeit des Fußtastendruckes war beim gegenphasigen Muster um 16.5 msec länger als beim gleichphasigen. Neben der Bestätigung des höheren kognitiven Bedarfs im gegenphasigen Bewegungsmusters deutet dieses Experiment vor allem auch auf die nahe Beziehung der Bewegungsausführung mit dem externen, akustischen Trigger hin. Da selbst die Koordination einer einzelnen Bewegung mit einem periodischen akustischen Signal bestimmten Kopplungsmechanismen zu unterliegen scheint, ist es auch nicht verwunderlich, dass es grundsätzlich unterschiedlich ist, ob zwei koordinierte Bewegungen intern oder extern getriggert sind.

In drei Experimenten (Pellechia & Turvey, 2001) führten die Probanden Pendelbewegungen mit Stäben aus Aluminium mit Holzgriff aus. Diese waren links und rechts neben den Probanden wie Schistöcke so angeordnet, dass die Probanden sie mit abgewinkelten Armen bequem halten konnten. Die Probanden saßen bei dieser Aufgabe. Die Richtung der Bewegung war durch einen Drehpunkt am unteren Ende der Stäbe auf die sagittale (vor – zurück) Ebene beschränkt.

Im ersten Experiment waren beide Pendel gleich lang (48 cm). Es wurden gleichphasige und gegenphasige Bewegungen in den Frequenzen 0.5, 1.0 und 1.5 Hz durchgeführt. Als Zusatzaufgabe zählten die Probanden von 200 ab in Dreierschritten rückwärts.

Alle drei Faktoren, höhere Frequenzen, Ablenkung und das gegenphasige Bewegungsmuster vergrößerten die absolute Phasenverschiebung (Betrag der mittleren Phasenverschiebung). Die Phasenvariabilität wurde nur durch das Bewegungsmuster beeinflusst. Sie war im gegenphasigen Muster größer.

In einem zweiten Experiment mit ähnlicher Aufgabenstellung wurde die Bewegung durch unterschiedlich lange Pendel erschwert (Detuning). Die Geschwindigkeit war nun frei wählbar und wurde gemessen.

Die absolute Phasenverschiebung war von Ablenkung und von Detuning abhängig, im Gegensatz zum ersten Experiment aber nicht von der Phasenlage. Die Phasenvariabilität wurde durch Ablenkung bei im gegenphasigen Bewegungsmuster erhöht, wenn die beiden Stäbe nicht gleich lang waren. Phasenlage und Ablenkung hatten keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Bewegungsausführung, wohl aber Detuning. Ungleich lange Stäbe verlangsamten die Bewegung.

Bei gleicher Länge der Pendel und selbstgewählter Frequenz wurde im dritten Experiment die Zusatzaufgabe variiert. Zwei akustisch dargebotene Ziffern mussten in umgedrehter Reihenfolge wiedergegeben bzw. addiert werden. Die dritte Aufgabe war ein Klassifizieren der aus den beiden genannten Ziffern gebildeten Zahl als kleiner oder größer als 50 und die vierte Aufgabe entsprach der Ablenkungsaufgabe der beiden anderen Experimente, also Rückwärts zählen in Dreierschritten.

Wie im ersten Experiment hatte Ablenkung keinen Einfluss auf die Phasenvariabilität. Die unterschiedlichen Ablenkungsaufgaben hatten unterschiedlichen Einfluss auf die absolute Phasenverschiebung. Die Umkehraufgabe erhöhte sie im Vergleich zur Einzelaufgabe um 6°, Addition um 8°, klassifizieren um 9° und rückwärts Zählen um 10°.

Trotz unterschiedlicher Aufgaben lassen sich bei den Ergebnissen dieser Studien zur Veränderung von Kopplungen durch Ablenkung einige Gemeinsamkeiten entdecken. Grundsätzlich scheint die Phasenverschiebung unter Ablenkung größer zu werden. Im Gegensatz dazu scheint die Phasenvariabilität gegenüber Ablenkung relativ unempfindlich zu sein. Auf die Phasenvariabilität wirken sich Phasenlage und Frequenz der Bewegung mehr aus. Wenn sich Ablenkung auf Phasenvariabilität auswirkt, dann eher im gegenphasigen Bewegungsmuster als im gleichphasigen. Aus den Experimenten von Pellechia & Turvey (2001) geht ganz deutlich hervor, dass die Schwierigkeit der Zusatzaufgabe und damit der Grad der Ablenkung einen wesentlichen Einfluss auf das Ausmaß der Veränderung der Kopplung hat.

2.1.2.4 Zusammenfassung und Erklärungsansatz

Sowohl Phasenvariabilität als auch Phasenverschiebung wurden bei manchen Aufgaben durch die drei Einflussfaktoren Aufmerksamkeitszuwendung, Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Bewegung und Ablenkung verändert und bei manchen nicht. Das insgesamt uneinheitliche Befundmuster, aber auch die unsystematische Untersuchungstechnik weisen darauf hin, wie weit wir von einem tieferen Verständnis der bei der Koordination von menschlicher Bewegung ablaufenden Vorgänge noch entfernt sind. Dennoch sei im folgenden ein Versuch unternommen, die bisher dargestellten Einzelergebnisse zu ordnen und ein gemeinsames Erklärungsmuster zu finden.

Ein erstes Ergebnis aus dieser Literaturübersicht ist, dass Phasenverschiebung und Phasenvariabilität getrennt behandelt werden müssen, da sie von den beschriebenen

Einflussfaktoren in den verschiedenen Untersuchungssituationen unterschiedlich beeinflusst worden sind. In der folgenden Übersicht werden die beiden Maße daher getrennt von einander und jeweils in Hinblick auf den Einfluss der drei Einflussfaktoren dargestellt.

Die Phasenverschiebung war von allen drei Einflussfaktoren verändert worden. Nur in einem einzigen Experiment, beim Zeichnen von Kreisen in die Luft (Stucchi & Viviani, 1993), war die Phasenverschiebung durch Aufmerksamkeitszuwendung nicht verändert worden. Dass Aufmerksamkeitszuwendung die Phasenverschiebung grundsätzlich verändern kann, zeigten aber zwei weitere Experimente, in denen entweder Kreise auf einem Digitalisiertablett gemalt (Swinnen, Jardin & Meulenbroek, 1996) oder Holzstäbe vor und zurück gependelt (Amazeen et al, 1997) wurden. Swinnen, Jardin & Meulenbroek (1996) machten für den Unterschied hauptsächlich die Art der Aufmerksamkeitszuwendung verantwortlich. Bei Viviani wurde dies durch die Befestigung eines Tongenerators an der zu beachtenden Hand bewirkt, die Probanden bei Swinnen, Jardin & Meulenbroek bekamen beim malen von den Kreisen die Instruktion, eine der beiden Hände zu betrachten und bei Amazeen et al. wurde die Aufmerksamkeitszuwendung durch Papierstreifen, die über einem der beiden vor und zurück gependelten Holzstäbe befestigt waren, erzielt. Weitere Unterschiede waren aber die Ebene der Bewegungsausführung sowie der Umstand, dass die Bewegung bei Stucchi & Viviani (1993) intern und bei den beiden andern Experimenten extern durch Töne getriggert war.

Deutlichen Einfluss auf die Phasenverschiebung hatte die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Bewegung. Die Experimente von Baldissera und seinen Mitarbeitern (Baldissera et al., 2000; Baldissera, Borroni & Cavallari, 2000; Baldissera & Cavallari 2001) erzielten einige, wesentliche Ergebnisse. So hatte ein elastisches Bremsen der Bewegung durch Gummibänder keinen Einfluss auf die Phasenverschiebung, ein gleichmäßiges aufgrund von Bleischeiben allerdings schon. Das erstaunliche daran war, dass dieses Abbremsen der Bewegung im gleichphasigen Bewegungsmuster zu einer Vergrößerung der Phasenverschiebung führte und im gegenphasigen zu einer Verkleinerung. Dies wurde von den Autoren durch unterschiedliche Verwendung von propriorezeptiver Rückmeldung erklärt. Diese sei für die Aufrechterhaltung des gegenphasigen Bewegungsmusters wesentlich wichtiger ist als für die Durchführung des gleichsinnigen Bewegungsmusters. Die Veränderungen durch das Abbremsen wurden daher nur im gegensinnigen Bewegungsmuster bemerkt und entsprechend kompensiert. Männer und Frauen unterschieden sich beträchtlich, sowohl aufgrund unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften der Bewegungen selbst als auch in Hinsicht auf die verwendeten Kompensationsstrategien.

Unter Ablenkung scheint die Phasenverschiebung unabhängig von sonstigen Parametern größer zu werden. Dies zeigten Ergebnisse beim Malen von Kreisen (Summers et al, 1998) und beim Pendeln von Stäben (Pellechia & Turvey, 2001). Das dritte Experiment von Pellechia & Turvey (2001) ergab außerdem einen linearen Zusammenhang zwischen der Größe der Veränderung der Phasenverschiebung durch Ablenkung und der Schwierigkeit der Zusatzaufgabe.

Im Gegensatz zur Phasenverschiebung war die Phasenvariabilität durch Aufmerksamkeitszuwendung und Ablenkung weniger deutlich beeinflusst worden. Der Einfluss von Veränderung der mechanischen Eigenschaften auf die Phasenvariabilität war nicht untersucht worden.

Durch Zuwenden der Aufmerksamkeit auf die dominante Hand konnte die Phasenvariabilität beim Malen von Kreisen am Digitalisiertablett (Swinnen, Jardin & Meulenbroek, 1996) sowie beim Pendeln von Holzstäben (Amazeen et al, 1997) verkleinert werden. Ein verstärktes Beachten der nicht dominanten Hand bewirkte das Gegenteil. Auch wenn die Bewegung als Ganzes verstärkt beachtet wurde, verkleinerte sich die Phasenvariabilität im Vergleich zu der Situation, dass eine Zusatzaufgabe verstärkt beachtet wurde. Dies wurde in Experimenten

untersucht, bei denen die Probanden Joysticks seitlich hin und her bewegten (Temprado et al, 1999; Monno et al, 2000). Wenn die Zusatzaufgabe darin bestand, auf ein akustisches Signal hin möglichst schnell beide Feuer-Tasten der Joysticks zu drücken, war diese Verkleinerung nur beim gegenphasigen Bewegungsmuster zu bemerken (Temprado et al, 1999). Wobei anzumerken ist, dass andererseits die Phasenvariabilität auch nur im gegenphasigen Bewegungsmuster durch Ablenkung überhaupt größer wurde. Ein Teil dieser Vergrößerung der Phasenvariabilität durch Ablenkung konnte also durch Zuwenden der Aufmerksamkeit zur Bewegungsaufgabe ausgeglichen werden. Oder, anders ausgedrückt, die Zusatzaufgabe konnte mitsamt ihrem, die Phasenvariabilität vergrößernden, Einfluss, in den Hintergrund geschoben werden.

Dieses Muster, dass nur das gegenphasige Bewegungsmuster verändert worden war, zeigte sich auch in einem Experimenten mit Pendeln von Holzstäben (Pellechia & Turvey, 2001, Experiment 2). Das bemerkenswerte an den Ergebnissen dieses Experimentes ist, dass dieser Einfluss der Ablenkung im gegensinnigen Bewegungsmuster nur in jenem Experiment auftrat, in dem die Länge der Stäbe unterschiedlich war. In den beiden Experimenten mit gleich langen Stäben hatte Ablenkung keinerlei Auswirkung auf die Phasenvariabilität (Pellechia & Turvey, 2001, Experiment 1 und 3). Auch das Zählen von Tönen, während die Probanden gleichzeitig mit beiden Händen Kreise malten (Summers et al, 1998), veränderte die Phasenvariabilität der bimanuellen Koordination nicht.

Insgesamt deuten die beschriebenen Befunde darauf hin, dass die Phasenverschiebung von den beschriebenen Einflussgrößen deutlich beeinträchtigt wird, die Phasenvariabilität jedoch nicht so eindeutig. Die Phasenvariabilität wird nur dann beeinflusst, wenn zusätzliche, erschwerende Faktoren mitwirken, wie zum Beispiel unterschiedlich lange Stäbe (Pellechia & Turvey, 2001) oder die Durchführung des gegensinnigen Bewegungsmusters (Monno et al, 2000, Temprado et al, 1999).

Nun stellt sich natürlich die Frage, was zu diesem Unterschied führt. Keine der bestehenden Theorien zur Koordination menschlicher Bewegung gibt darauf eine eindeutige Antwort. Ein vorsichtiger Erklärungsversuch sei dennoch unternommen. Aus den Experimenten von Baldissera und seinen Mitarbeitern lässt sich erkennen, dass die Größe der Phasenverschiebung offensichtlich in engem Zusammenhang mit verwendeten Strategien steht. Da ja das Anwenden bestimmter Strategien immer etwas mit Planung und Kontrolle zu tun hat, ist die Annahme einer engen Zusammenarbeit zwischen den für die Phasenverschiebung verantwortlichen Steuereinheiten und übergeordneten, handlungssteuernden Funktionsbereichen nahe liegend. Dies könnte auch dafür verantwortlich sein, dass Ablenkung nur im gegenphasigen Bewegungsmuster Auswirkung auf die Phasenvariabilität. Beim gegenphasigen Bewegungsmuster scheint propriozeptive Rückmeldung wichtiger zu sein als beim gleichphasigen. Die Steuerung der Bewegung und gleichzeitige Verarbeitung von sensorischen Einflüssen erfordert daher beim gegenphasigen Bewegungsmuster mehr planende und kontrollierende Elemente als nur die Bewegungssteuerung im gleichphasigen Bewegungsmuster.

Andererseits liegen ganz eindeutige Befunde vor (Überblick z.B. bei Heuer, 1995, vgl. Abschnitt 1.1 dieser Arbeit) dass die Phasenvariabilität von anderen als den bisher beschriebenen Einflussgrößen wie Phasenlage oder Frequenz der Bewegung bestimmt wird. Die Phasenvariabilität im gegenphasigen Bewegungsmuster ist immer größer als im gleichphasigen. Schneller Bewegungen haben immer größere Phasenvariabilität als langsamere. Dies könnte ein Hinweis dafür sein, dass die Größe der Phasenvariabilität mehr in der Steuerung der spezifischen Bewegung selbst begründet zu liegen scheint. Sie kann daher als direkteres Maß für die Enge und als Hinweis auf die Art der Kopplung angesehen werden. Die Phasenverschiebung könnte hingegen in Zusammenhang mit übergeordneten

Planungs- und Steuerelementen gesehen werden. Diese könnten auch im gegensinnigen Bewegungsmuster Einfluss auf die Phasenvariabilität haben und deren Beeinflussbarkeit durch Aufmerksamkeitszuwendung oder Ablenkung erklären.

Dies deutet auf zwei unterscheidbare Anteile der Bewegungssteuerung hin. Einen nahe bei der Bewegung liegenden, gewissermaßen die Kopplung selbst. Dieser Anteil scheint von Aufmerksamkeitszuwendung oder Ablenkung unabhängig zu sein. Und einen weiter entfernten, der den Zusammenhang mit übergeordneten Handlungszielen herstellt und zwischen Steuerung und Verarbeitung von sensorischen Einflüssen vermittelt und daher auch empfindlich auf Zusatztätigkeiten reagiert.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit waren die strukturellen Randbedingungen als Rahmenkonzept dieser Arbeit vorgestellt worden. Strukturelle Randbedingungen sind keinesfalls mit anatomischen Strukturen gleichzusetzen sondern als das Ergebnis der Funktionalität aller beteiligter Strukturen zu verstehen. Dennoch legt dieses Konzept den Grundstein dafür, auch nach den anatomischen Strukturen der Randbedingungen zu suchen. Denn wenn die Randbedingungen schon mal aufgezeigt ist, liegt es doch nahe, danach zu fragen, was denn diese Randbedingungen verursacht.

Eine in der Literatur recht eindeutig beschriebene Kopplung zwischen Kopf und Extremitäten ist der asymmetrische, tonische Halsreflex. Da bei diesem Reflex, im Gegensatz zu den meisten der bisher beschriebenen Kopplungen das anatomische Substrat feststeht, eignet er sich besonders, um den Einfluss unterschiedlicher, an der Steuerung von Bewegung beteiligter, Gehirnstrukturen zu untersuchen. Dieser Reflex und einige experimentelle Nachweise seiner Wirksamkeit in Alltagssituation werden im nun folgenden Abschnitt beschrieben.

2.1.3 Der asymmetrische, tonische Halsreflex

Der asymmetrische tonische Halsreflex wurde erstmals von R. Magnus (1924) systematisch beschrieben. Bei neugeborenen Kindern lassen sich bei passiver, horizontaler Kopfdrehung Strecktendenzen der Extremitäten auf der gesichtszugewandten Seite und Beugtendenzen auf der gesichtsabgewandten Seite beobachten. Da diese Stellung in etwa der Haltung beim Fechten entspricht, wird sie auch Fechterstellung genannt und gehört zur Standarduntersuchung neurologischer Gesundheit bei Neugeborenen.

Versuche mit decerebrierten Katzen zeigten, dass dieser Reflex im Mittelhirn zu lokalisieren und auf Rückmeldungen der ersten drei Zervikalnerven angewiesen ist (McCouch, Deering, und Ling 1950, Lindsay, Roberts & Rosenberg, 1976, Wilson, Ezure & Timerick, 1984, Suzuki, Timerick & Wilson, 1985). In Zusammenarbeit mit den Labyrinth –Reflexen sorgt der tonische Halsreflex bei vierbeinigen Tieren für Ausgleichsbewegungen der Extremitäten, um bei vertikal bewegtem Untergrund die Lage des Rumpfes im Raum und in Bezug auf den Kopf konstant zu halten.

Diese Aufgabe ist beim Menschen durch den aufrechten Gang weitestgehend verloren gegangen. Außer bei manchen Hemiplegikern (Byers, 1938) kann dieses Bewegungsmuster daher auch im allgemeinen bei erwachsenen Menschen nicht beobachtet werden. Aus mehreren Untersuchungen zum asymmetrischen tonischen Halsreflex geht jedoch hervor, dass dieses Reflexmuster neuronal immer noch vorhanden ist und auch in Alltagssituationen Einfluss auf die Steuerung von Bewegung nehmen kann. Ein experimenteller Nachweis der Wirkung dieses Reflexes beim gesunden Menschen gelang Ikai (1950) mit Hilfe eines einfachen mechanischen Apparates. Tokizane et al (1951) konnten Effekte des tonischen Halsreflexes im M. Triceps brachii per EMG messen und Hellebrandt, Houtz, Patridge und Walters (1956) fanden eine Verstärkung und Verlängerung des Krafteinsatzes bei Armbeugebewegungen, wenn der Kopf abgewandt wurde. Dem Reflexmuster entsprechende,

systematische Abweichungen bei der Reproduktion von erlernten Kräften fanden Shea et al. (1995). Die Probanden lagen am Rücken und sollten mit aufgestellten Unterarmen einen an einem Seil befestigten Handgriff durch Strecken der Ellenbogen nach unten ziehen. In Lerndurchgängen wurden die Probanden trainiert, dabei 30, 60 oder 90 Prozent ihrer Maximalkraft einzusetzen. Wenn der Kopf bei der Wiedergabe der gelernten Kräfte um 90° nach rechts gehalten wurde nahm die Streckkraft des rechten Armes zu, bei nach links gehaltenem Kopf nahm sie ab.

Diese Ergebnisse sowie Beobachtungen aus dem Alltag wie zum Beispiel bestimmte Balletthaltungen, Basketball-Korbleger, Baseballspieler (siehe dazu Illert, 1992), legen die Vermutung nahe, dass der tonische Halsreflex beim erwachsenen Menschen nicht gänzlich verschwunden ist. Der Gedanke, das Muster des tonischen Halsreflexes könne sich unter bestimmten Voraussetzungen auch in einer fahr-ähnlichen Situation wiederfinden, ist also nicht ganz abwegig. In einer mit der vorliegenden Arbeit in Zusammenhang stehenden Reihe von Experimenten (Heuer & Klein, 1998, Heuer & Klein, 1999a) konnte der tonische Halsreflex jedoch nur in einer bestimmten Situation festgestellt werden. Ein Fahrradlenker wurde mit starken Federn in der Mittelstellung gehalten. Über einen Zeitraum von einer halben Minute musste der Lenker in dezentraler Position gehalten werden. Die dabei auftretende unbeabsichtigte Rück-Drift war dem Reflexmuster entsprechend von der Kopfhaltung abhängig. Bei nach rechts gedrehtem Kopf war die Rück-Drift des links gehaltenen Lenkers kleiner und bei nach links gedrehtem Kopf die des rechts gehaltenen.

2.1.4 Zusammenfassung und Fragestellung

Dass die neuronalen Schaltkreise des Reflexes im Mittelhirn vorhanden sind, kann aufgrund der angeführten Belege nicht angezweifelt werden. Die Beobachtung, dass der Reflex beim Neugeborenen noch gut sichtbar ist und nach wenigen Monaten verschwindet, legt die Vermutung nahe, dass sich in dieser Zeit in höheren kortikalen Zentren Strukturen bilden, die Einflüsse dieses Reflexes kompensieren.

Um Einflüsse des tonischen Halsreflexes prüfen zu können war eine Aufgabe erforderlich, in der sowohl der Kopf als auch die Arme oder Beine bewegt werden. Eine Alltagssituation, in der Kopfbewegungen unter Umständen zu ungewollten Auswirkungen auf Armbewegungen führen könnten, ist das Auto- oder Fahrradfahren. Das ist eine Aufgabe, in der besonders gut deutlich wird, wie verschiedene Anteile an der Steuerung zusammenwirken. Autofahren ist eine Tätigkeit, in der hoch komplexe, erlernte und automatisierte Bewegungen ausgeführt werden. Alltagstheoretisch begründet bestimmen allein diese erlernten Bewegungen das Geschehen. Die Vermutung besteht jedoch, dass auch der asymmetrische, tonische Halsreflex, der ja bestimmt nicht erlernt ist, zur Steuerung der Gesamtsituation beiträgt.

Ziel dieser Arbeit war, herauszufinden, welchen Anteil an der Gesamtbewegungssteuerung die verschiedenen Gehirnstrukturen beitragen. Das dazu verwendete Mittel war Ablenkung. Da es sich bei jenen, den Reflex überlagernden, Steuermechanismen um erlernte Prozesse handelt, sollten sie durch Ablenkung beeinträchtigt werden können. Da der Reflex im Gegensatz dazu aber gegenüber Ablenkung unempfindlich sein sollte, war zu erwarten, dass der Reflex größere Anteile an der Gesamtsteuerung haben könnte, wenn die höheren Steuerprozesse durch Ablenkung beeinträchtigt werden.

Die Fragestellung dieses Experimentes lässt sich demnach wie folgt formulieren: Lassen sich die höheren Steuermechanismen durch Ablenkung soweit blockieren, dass sich Einflüsse des Reflexes stärker im Bewegungsmuster zeigen?

2.1.5 Hypothesen

Nach dem Muster des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes geht eine Kopfdrehung nach links mit einer Streckung des linken Armes und eine Beugung des rechten einher, was bei Verwendung eines Fahrradfahrers zu einer Lenkbewegung nach rechts führt. Auswirkungen des Halsreflexes sollten daher zu einer Bevorzugung des gegensinnigen Bewegungsmuster führen. Die Bevorzugung sollte sich in kleinerer Phasenverschiebung zeigen.

Aufgrund von Experimenten mit ähnlicher Versuchsanordnung (Heuer & Klein, 1998) war zu erwarten, dass sich die Einflüsse der höheren, den Reflex überlagernden Steuerfunktionen aber zu einer Bevorzugung des gleichsinnigen Bewegungsmusters führen sollten. Wenn sich die höheren Funktionen durch Ablenkung soweit beeinträchtigen lassen, dass Einflüsse des Reflexes sichtbar werden, sollte mit Ablenkung das gegensinnige Bewegungsmuster und ohne Ablenkung das gleichsinnige Bewegungsmuster bevorzugt sein. Ablenkung sollte zu einer Umkehrung der Phasenbeziehung führen, was sich in einer Interaktion von Ablenkung mit dem Bewegungsmuster zeigen müsste.

Wahrscheinlicher als ein Einfluss von Ablenkung auf die Phasenvariabilität war eine Veränderung der Phasenverschiebung. Falls Ablenkung die Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom Bewegungsmuster umkehren würde, wäre das ein Beleg für eine durch Ablenkung beeinträchtigte Wirkung des Halsreflexes.

Neben diesen Kennwerten der Koordination der Kopf- und Lenkbewegungen könnte sich der Reflex aber auch in Bewegungsmaßen der einzelnen Bewegungen niederschlagen. Die durch den Reflex veränderten Kräfte könnten theoretisch, so wie beim Reproduzieren gelernter Kräfte (Shea, Guadagnoli & Dean 1995), auch bei periodischen Bewegungen wirksam sein. Unterschiedliche Bewegungsmuster müssten demnach weitere Lenkbewegungen im gegensinnigen Bewegungsmuster zeigen. Der Reflex sollte sich deshalb nur auf die Bewegungsweiten der Lenkbewegungen, nicht aber auf jene der Kopfbewegungen auswirken, da die Aktivität der Extremitäten durch Rückmeldung der Kopfposition an das Gehirn ausgelöst wird (Suzuki, Timerick & Wilson, 1985). Position oder Bewegung der Gliedmassen lösen hingegen keine Kopfdrehung aus. Wenn sich diese Wirkung des Reflexes unter Ablenkung zeigen würde hieße das kleiner Bewegungsweiten der Lenkbewegungen ohne Ablenkung im gleichsinnigen Bewegungsmuster und mit Ablenkung im gegensinnigen.

2.2 Versuchsdarstellung

2.2.1 Versuchspersonen

An dem Experiment nahmen 12 Vpn im Alter von 21 bis 39 Jahren (Durchschnitt 28.1 Jahre) teil. Sie waren über die Ziele des Experimentes nur sehr grob informiert und erhielten als Aufwandsentschädigung DM 25,-.

2.2.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchung wurde in einem eigens dafür eingerichteten Labor durchgeführt. Die eigentliche Versuchskammer (5m x 6m x 3.5m) war ein mit schwarzem Stoff verhängtes Lattengerüst. Auch die Decke und der Fußboden waren schwarz abgedunkelt. Die Vorderseite der Versuchskammer wurde zur Gänze von der 4 x 2.5 m großen Leinwand eingenommen. Mit einem Großbildprojektor, der sich in 2.5 m Höhe hinter der Vp befand, wurden die Anweisungen auf die Leinwand projiziert. Zur Darstellung der seitlichen Reize waren schräg hinter den Vpn LED Anzeigen angebracht auf denen Ziffern oder Buchstaben im Ausmaß von 3 x 6 cm dargestellt wurden. Diese Kammer befand sich in einem Raum, in dem auch noch Platz für die Steueranlagen und den Versuchsleiter war.

Als Sitzgelegenheit für die Vpn diente ein Friseurstuhl, der mittels Hydraulik stufenlos höhenverstellbar war, sodass der Lenker für alle Vpn angenehm zu bedienen war. Dieser Stuhl stand ca. 3m von der Leinwand entfernt.

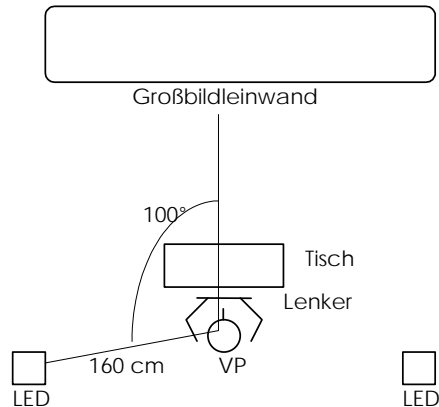


Abb. 2.1 Schemadarstellung der Versuchsanordnung

Zwischen Stuhl und Leinwand stand ein Tisch an dem in horizontaler Lage ein Fahrradlenker (Länge 63 cm) befestigt war. Ein Drehpotentiometer maß die Lenkerdrehung.

Die Übertragung der Kopfbewegungen der Vp auf das Messgerät erfolgte mittels eines besonders für diesen Zweck ausgestatteten Helmes. Zur zusätzlichen Fixierung war im Kinnbereich eine Kinnklemme angebracht. Ein im Hinterkopfbereich eingeklemmtes Handtuch bewirkte ähnliche, manchmal sogar bessere Fixierung. Am Scheitelpunkt des Helmes war das Verbindungsstück zum Messgerät befestigt. Zur Übertragung der akustischen Signale wurden im Helm auf beiden Seiten je ein handelsüblicher Lautsprecher montiert. Die Schultern waren durch ein Metallgerüst so gut wie möglich fixiert. Minimale Bewegungen der Schultern konnten dadurch aber nicht gänzlich verhindert werden.

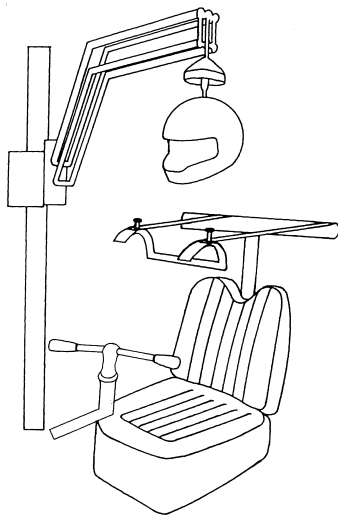


Abb. 2.2 Darstellung des Stuhles auf dem die Probanden saßen mit Lenker, Kopfmessgerät und Metallgerüst zur Fixierung der Schultern. Minimale Bewegungen der Schultern waren dennoch möglich.

2.2.3 Messung

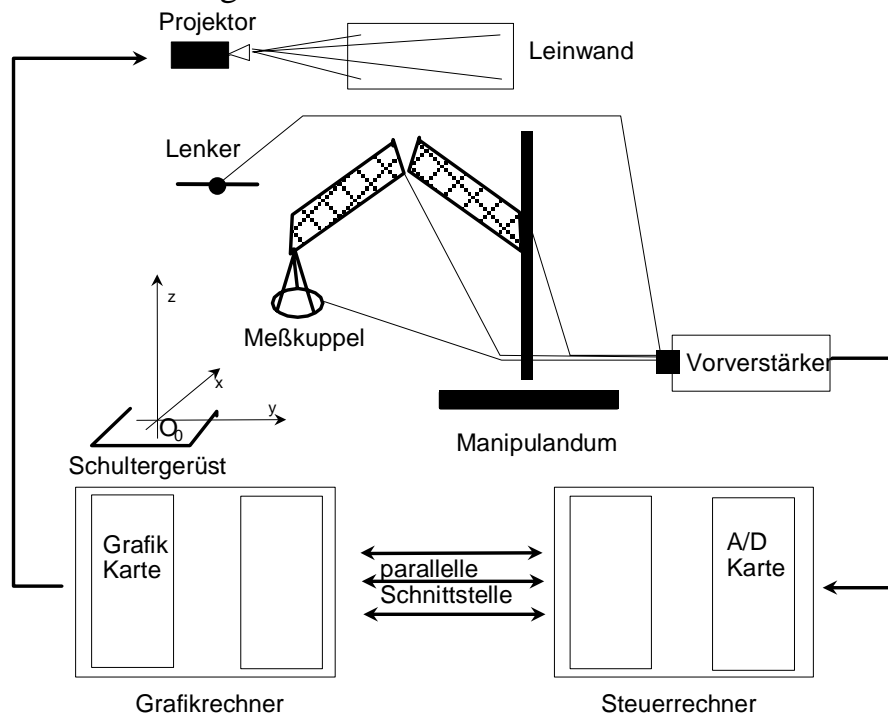


Abb. 2.3 Symboldarstellung der Mess- und Versuchssteuerungsanlage

Ein Manipulandum maß die Bewegungen des Helms. An einem stabilen Ständer war auf der Höhe von 119 cm der dreigliedrige Messarm befestigt. Über drei Drehpotentiometer, die den Achsen des Messarmes entsprachen, wurde die Position des Helmes in Bezug auf den Ständer gemessen. Das dritte Glied war die Meßkuppel, die mit Hilfe von weiteren drei Drehpotentiometern die Lage des Helmes im Raum maß. Der Versuch wurde mit Hilfe von zwei, über eine parallele Schnittstelle gekoppelten, Rechnern gesteuert. Der Grafikrechner stellte die Anweisungen zum Versuch zur Verfügung und übergab diese dem Projektor. Die gemessenen Bewegungsdaten liefen über einen Vorverstärker und wurden dann vom Steuerrechner mittels einer A/D Wandlerkarte aufgezeichnet. Mit diesem Aufbau war eine Messung der Kopf- und Lenkbewegungen in einer Frequenz von 100 Hz möglich. Der Messfehler der Drehpotentiometer betrug weniger als 0.1° .

2.2.4 Vektormodell

Um Falschmessungen durch unterschiedliche Kopfnäigung zu vermeiden, wurde aus den Messwerten der sechs Potentiometer des Manipulandums die Position des Scheitelpunktes berechnet. Bei fixierten Schultern wurde anhand eines einfachen Vektormodells der Blickvektor berechnet. Die horizontale Richtungsänderung dieses Vektors im Raum diente als Maß für die Drehung des Kopfes.

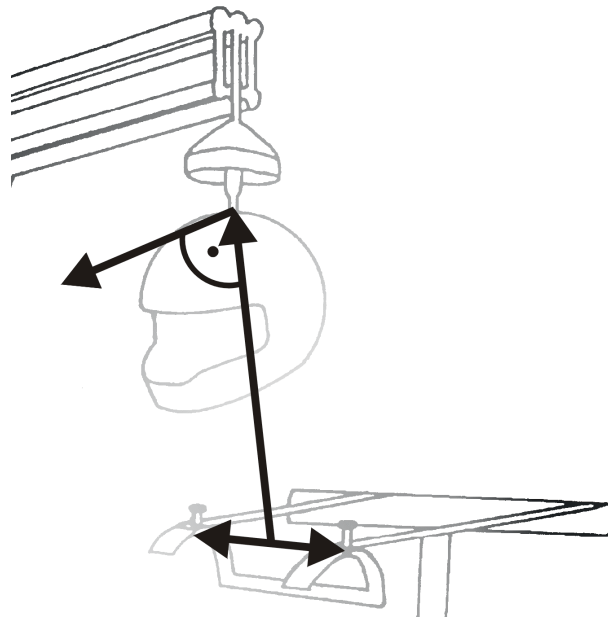


Abb. 2.4 Vektormodell zur Berechnung des Blickvektors.

2.2.5 Aufgabe

Die Probanden führten gleichzeitig periodische Drehbewegungen mit dem Kopf und einem Fahrradlenker in den Phasenlagen „gleichsinnig“ (Kopf rechts - Lenker rechts) und „gegensinnig“ (Kopf rechts - Lenker links) aus.

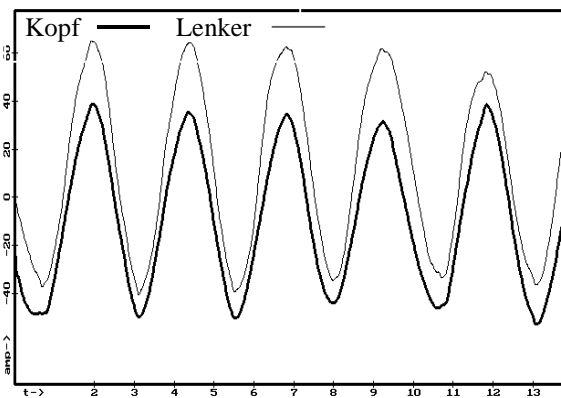


Abb. 2.5 Beispiel für ein gleichsinniges Bewegungsmuster

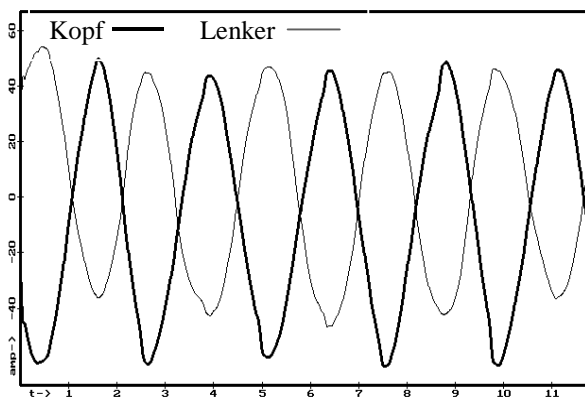


Abb. 2.6 Beispiel für ein gegensinniges Bewegungsmuster

Die Frequenz betrug ca. 0.6 Hz. Um Unterschiede zwischen den verschiedenen Koordinationsmustern deutlich zu machen, werden üblicherweise höhere Frequenzen (1.5 – ca. 3 Hz) gewählt. Das war nicht möglich, da so schnelle Kopfbewegungen zumindest zu Unwohlsein, wenn nicht sogar zu Verletzungen im Nackenbereich führen könnten.

Die Weiten der Lenkbewegungen betragen laut Anweisung ca. 40° von der Mitte aus gemessen. Um ein Mindestmaß von 15° Lenkerausschlag zu gewähren, wurden Durchgänge sofort abgebrochen und wiederholt, in denen diese Mindestamplitude unterboten wurde. Die Weiten der Kopfbewegungen waren von der jeweiligen Versuchsbedingung des Faktors „Blick“ abhängig. Es gab die drei Bedingungen „kurz ohne Blickrichtungswechsel (BW)“, „kurz mit Blickrichtungswechsel (BW)“ und „weit“. Die Probanden mussten Ziffern beobachten, die entweder in der Mitte der Leinwand („kurz ohne BW“), an den Rändern der Leinwand („kurz mit BW“) oder an den seitlich schräg hinter der Vp angebrachten LEDs („weit“) dargeboten wurden. Um die an den Leinwandrändern dargebotenen Ziffern beobachten zu können, waren kurze Kopfbewegungen von ca. 30° von der Mitte aus gemessen nötig, um jene an den LEDs zu beobachten, weite von ca. 90°.

Wenn die Ziffern in der Mitte der Leinwand erschienen („kurz ohne BW“), mussten die Probanden den Kopf wie bei der Bedingung „kurz mit BW“ ca. 30° bewegen und dabei zur Mitte schauen. Das führte zu periodischen Kopf-im-Raum und Auge-im-Kopf Bewegungen bei unveränderter Blickrichtung. Diese Versuchsbedingung diente dazu, Einflüsse der Blickrichtung von Einflüssen der Kopfdrehung unterscheiden zu können.

Ablenkung wurde in Form von zwei unterschiedlich schwierigen Zusatzaufgaben eingeführt. „P-zählen“ galt als Bedingung ohne Ablenkung, „addieren“ als Bedingung mit Ablenkung. Bei der Bedingung „P-zählen“ waren die Ziffern nur zu beobachten. Vereinzelt statt der Ziffern dargebotene „P“ mussten gezählt werden. In einem Block von 60 Bewegungen konnten maximal zwei „P“ auftreten, das zweite jeweils kurz vor Schluss. Diese Aufgabe war konstruiert, um die kognitive Belastung möglichst konstant und gleichzeitig möglichst gering zu halten. Bei der Bedingung „addieren“ mussten die Ziffern addiert werden. Wenn die Probanden mit dem Rechnen durcheinander kamen konnten sie „verrechnet“ rufen. Dann erschien als nächstes eine „0“ und mit der nächsten Ziffer sollte wieder neu zu addieren begonnen werden. Diese Maßnahme sollte die Probanden motivieren, auch im Falle eines Durcheinanderkommens weiter zu rechnen. Sowohl die Anzahl der „P“ als auch das Ergebnis der Addition wurden nach Ende eines Blocks mündlich dem Versuchsleiter mitgeteilt.

2.2.6 Reihenfolge

Jeder Block bestand aus 60 Ziffern. Eine neue Ziffer erschien bei den ersten 20 Bewegungen nach jeweils 800 msec. und bei weiteren 40 Bewegungen immer dann, wenn die Kopf- und Lenkbewegung in die richtige Richtung und über einen Mindestwinkel von 15° hinaus ausgeführt wurde. Die ersten 20 Bewegungen waren als Vorlauf definiert, um die Probanden anzuregen, eine halbwegs einheitliche Frequenz einzuhalten. In die Berechnung gingen dann aber nur die 40 Bewegungen ein, bei denen kein Takt mehr vorgegeben war. Das hatte den Sinn, eine zusätzliche Synchronisierungsaufgabe mit einem äußeren Signal zu vermeiden. Ein Block mit Vorlauf dauerte etwa eine Minute.

In fünf Übungsblöcken lernten die Probanden die Kopfbedingungen „Blick zur Mitte“, „kleine“ und „große Kopfbewegungen“, die beiden Phasenlagen „gleichsinnig und gegensinnig“ sowie die beiden Ablenkbedingungen „P-zählen“ und „addieren“ kennen. Danach wurden pro Kopf-, Phasen- und Ablenkbedingung je drei Blöcke unmittelbar hintereinander durchgeführt (insgesamt 36). Vor jedem dieser Dreierblöcke wurde zur Erinnerung ein weiterer, kurzer Übungsblock durchgeführt. Die Abfolge aller Blöcke war über die Probanden systematisch variiert.

2.2.7 Kennwerte

Das Kopfsignal und das Signal des Lenkers wurden vor der Weiterverarbeitung mit einem Butterworth Tiefpassfilter (10 Hz Grenzfrequenz, 4. Ordnung, vorwärts und rückwärts Filterung) gefiltert. Mit einem im Hause erprobten Algorithmus wurden die Extrempunkte der Signale ermittelt und anschließend händisch auf Fehler überprüft.

Innerhalb und zwischen den Signalen wurden folgende Kennwerte berechnet (jeweils gemittelt über einen Durchgang):

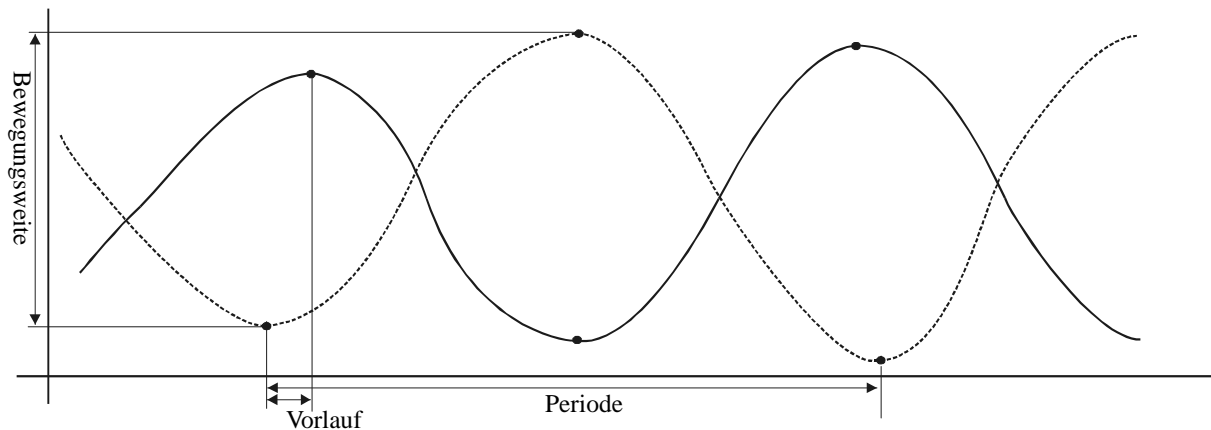


Abb. 2.7 Schematische Darstellung der Kennwerte.

Die Bewegungsweite war der absolute Unterschied zwischen einem Umkehrpunkten und seinem unmittelbaren Nachfolger (peak to peak). Es wurden die Amplituden der Bewegungen des Kopfes von rechts nach links und der zugehörigen Lenkbewegung (bei gleichsinniger Phasenlage auch links und bei gegensinniger Phasenlage rechts) gemessen und über einen Block gemittelt. Die Standardabweichung der Bewegungsweiten des Kopf- bzw. Lenk-Signals war die Weitenvariabilität. Als Periodendauer galt die Zeitdifferenz zweier benachbarter Extrema auf der linken Seite innerhalb des Kopfsignals bzw. der zugehörigen Extrema des Lenk-Signals. Als Periode war also eine Bewegung von links nach rechts und zurück nach links definiert. Wie bei den Bewegungsweiten wurde auch bei den Perioden die Standardabweichung der Periodendauern über einen Block als Periodenvariabilität berechnet. Die über einen Block gemittelten zeitlichen Differenzen zwischen zwei zusammengehörenden Extrema von Kopf- und Lenksignal als Prozentsatz der Dauer der vorangegangenen Kopfperiode war als Phasenverschiebung definiert, deren Standardabweichung als Phasenvariabilität. Diese beiden Kennwerte wurde an den linken und an den rechten Umkehrpunkten der Kopfbewegung berechnet.

2.2.8 Variablen und Design

Die wichtigsten abhängigen Variablen waren Phasenverschiebung und Phasenvariabilität, zusätzlich wurden aber auch die Kennwerte Bewegungsweite, Weitenvariabilität, Periodendauer und Periodenvariabilität in die Berechnung mit aufgenommen. Diese Kennwerte wurden, zum Teil inhaltlich, zum Teil formal bedingt, in unterschiedlichen Varianzanalysen gerechnet. Alle Faktoren waren Messwiederholungsfaktoren.

Allen Analysen gemeinsam waren die Faktoren Ablenkung und Bewegungsmuster. Die beiden Stufen des Faktors Ablenkung waren „P-zählen“ und „Addieren“. Die Stufe „Addieren“ wird im weiteren als „mit Ablenkung“ bezeichnet, das „P-zählen“ als „ohne Ablenkung“. Die Stufen des Faktors Bewegungsmuster waren „gegensinnig“ und „gleichsinnig“.

Der dritte Faktor, „Blick“ wurde bei der Versuchsdurchführung in den drei Stufen „weit“, „kurz mit BW“ und „kurz ohne BW“ variiert. Da mit den drei Stufen zwei unterschiedliche Fragestellungen verbunden waren, wurde dieser Faktor für die Berechnung in zwei getrennte Designs aufgeteilt. Im „Blickrichtungsdesign“ wurden die kurzen Kopfbewegungen ohne BW mit den kurzen Kopfbewegungen mit BW verglichen. Dieses Design diente dazu, Einflüsse der Kopfbewegung von Einflüssen der Blickrichtung unterscheiden zu können. Ein Vergleich der weiten Kopfbewegungen mit den kurzen Kopfbewegungen mit BW wurde als „Weitendesign“ bezeichnet und sollte zeigen, ob der Reflex erst ab einer gewissen Bewegungsweite der Kopfbewegungen zum Tragen kommt.

Da in der Literatur gelegentlich von Seitenasymmetrien berichtet wird (z.B. Swinnen et al., 1996; Viviani et al., 1998) wurde bei den Kennwerten Phasenverschiebung und Phasenvariabilität zusätzlich der Faktor „Seite“ mit den beiden Stufen „links“ und „rechts“ in das Design mit aufgenommen.

2.3 Ergebnisse

Da die Ergebnisse nach mehreren Bedeutungsdimensionen gleichzeitig geordnet werden müssen, gestaltet sich deren Darstellung nicht ganz einfach. Auch dürfte es die relativ große Anzahl an Einzelergebnissen dem Leser erschweren, den Überblick zu bewahren. Neben einer pragmatischen wurde daher vor allem eine hypothesenorientierte Gewichtung der Dimensionen vorgenommen. Pragmatisch insofern, als die einzelnen Kennwerte am leichtesten auseinander zu halten sind. Die Kennwerte sind daher die erste Ordnungsstufe und werden nacheinander dargestellt. Innerhalb der Darstellung der Ergebnisse zu einem Kennwerte wurde die Reihenfolge der Darstellung aufgrund der Bedeutung in Bezug auf die Hypothesen vorgenommen. Die beiden Dimensionen Bevorzugung des Bewegungsmusters und Ablenkung werden daher gleichzeitig dargestellt. Schließlich werden noch die besonderen Einflüsse der Weite der Kopfbewegungen bzw. der unterschiedlichen Blickrichtung auf den jeweiligen Kennwert dargestellt. Doch zunächst erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Daten.

2.3.1 Allgemeine Beschreibung der Daten

Von den 17280 in den gemessenen Durchgängen theoretisch durchgeführten Bewegungen wurden 4135 von weiterer Berechnung ausgeschlossen. Das entspricht 24%.

Ausschlusskriterien waren vor allem Pausen in der Bewegung und zu kurze oder unrhythmische Bewegungen. Trat in einem Block ein Fehler auf, wurde nur die längste, fehlerfreie Sequenz von Bewegungen in die Berechnung aufgenommen. Diese sehr konservative Vorgehensweise hatte sich in Vorgängerexperimenten als zielführend erwiesen.

Der Aufgabenstellung entsprechend waren die weiten Kopfbewegungen tatsächlich weiter $F(1,11) = 470.298$ $p < .01$ als die kurzen. Sie betragen im Schnitt 141° (peak to peak) und waren damit fast doppelt so weit wie die kurzen mit 78° . Die Lenkbewegungen waren mit durchschnittlich 79° den kurzen Bewegungen des Kopfes in ihrer Weite sehr ähnlich.

Eine ganze Periode dauerte im Schnitt ohne Ablenkung 1889 msec und mit Ablenkung 2008 msec. Ablenkung verlängerte also die Periodendauer (in beiden Designs, bei Kopf und Lenker $F(1,11) > 100$, $p < .001$) Dieses Ergebnis kann als Nachweis der höheren kognitiven Belastung durch die schwierigere Zusatzfähigkeit betrachtet werden.

Diese Interpretation ist möglicherweise durch ein experimentelles Detail in ihrer Bedeutung eingeschränkt. Die Probanden konnten die Bewegungsgeschwindigkeit selbst kontrollieren und bewegten daher den Kopf und den Lenker vielleicht nur so schnell wie sie zählen bzw. die Zahlen beobachten konnten. Dadurch war theoretisch die Möglichkeit gegeben, einen höheren kognitiven Bedarf auf eine längere Zeitstrecke zu verteilen. Ob sie diese

Kompensationsstrategie angewandt haben oder nicht, bleibt natürlich der Spekulation überlassen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Verlängerung von ca. 120 msec bei einer Gesamtperiodendauer von 2000 msec. scheint dies eher unwahrscheinlich. Daher wurde auf nähere Untersuchung dieser Einschränkung verzichtet.

2.3.2 Phasenvariabilität

Das erwartete statistische Ergebnis war eine Interaktion von Ablenkung und Bewegungsmuster. Ohne Ablenkung sollte die Phasenvariabilität beim gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner sein und mit Ablenkung beim gegensinnigen. Die Phasenvariabilität war in beiden Designs im gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner als im gegensinnigen (Weitendesign: $F(1,11) = 6.132$ $p < .031$, Blickrichtungsdesign: $F(1,11) = 9.789$ $p < .01$). Ablenkung veränderte die Phasenvariabilität nicht ($F(1,11) < 1$). Auch die Interaktion zwischen Phasenlage und Ablenkung war weit davon entfernt, signifikant zu werden ($F(1,11) < 1$). Aus Abb. 2.8 geht deutlich hervor, dass die Phasenvariabilität auch mit Ablenkung im gegensinnigen Bewegungsmuster größer war als im gleichsinnigen. Mit Ablenkung war die Phasenvariabilität zwar größer als ohne, der Unterschied war jedoch nicht signifikant.

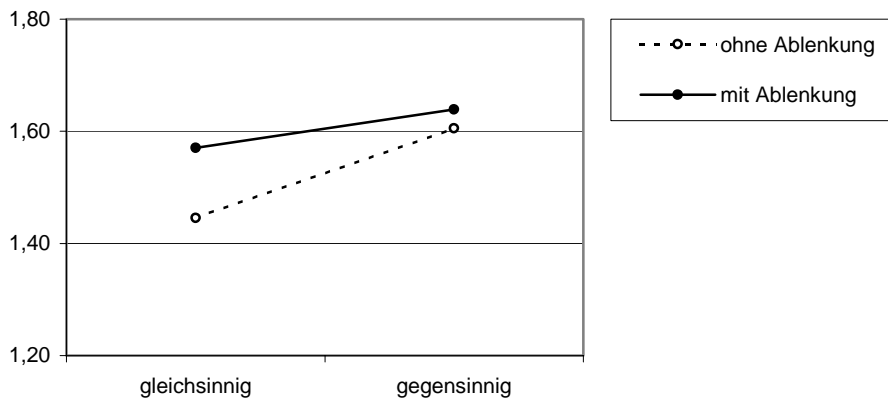


Abb. 2.8 Phasenvariabilität in % im Blickrichtungsdesign. Im Weitendesign waren die Ergebnisse ähnlich.

Es war immer das gleichsinnige Bewegungsmuster stabiler, niemals das gegensinnige. Stabilisierende Einflüsse des tonischen Halsreflexes konnten auch mit Ablenkung nicht nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis fügt sich in die Reihe anderer Experimente, in denen auch die Phasenvariabilität durch Ablenkung nicht beeinflusst worden war (Summers et al., 1998; Pellechia & Turvey, 2001). Die Weite der Kopfbewegungen sowie die Tatsache, ob der Blick mitbewegt wurde oder nicht, hatten keinen Einfluss auf die Phasenvariabilität.

2.3.3 Phasenverschiebung

Im Gegensatz zur Phasenvariabilität wurde die Phasenverschiebung durch Ablenkung größer (im Weitendesign mit 1.34%, das entspricht ca. 27 msec oder 5° , deutlicher $F(1,11) = 11.445$ $p < .006$ als im Kopfrichtungsdesign mit 0.14 %, das entspricht ca. 3 msec oder 0.5° $F(1,11) = 6.402$ $p < .028$). Neben der Ablenkung hatte aber auch das Bewegungsmuster in beiden Designs direkten Einfluss auf die Phasenverschiebung. Beim gegensinnigen Bewegungsmuster war die Phasenverschiebung größer als beim gleichsinnigen ($F(1,11) = 7.692$ $p < .018$ im Blickrichtungsdesign und $F(1,11) = 4.636$ $p < .051$ im Weitendesign).

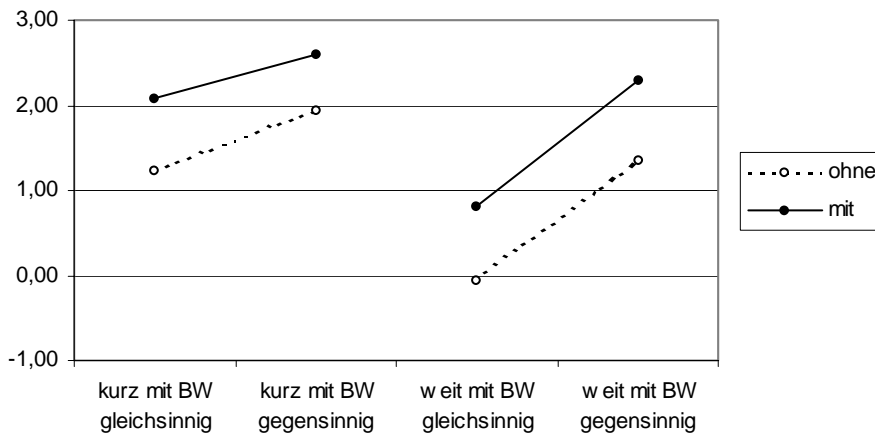


Abb. 2.9 Phasenverschiebung in %, Weitendesign. Positive Werte entsprechen einem Vorlauf des Kopfes gegenüber dem Lenker.

Die Interaktion von Ablenkung und Bewegungsmuster war in beiden Designs nicht signifikant. Die Phasenverschiebung war immer, ob mit oder ohne Ablenkung, im gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner als im Gegensinnigen. Im Blickrichtungsdesign war aber der Unterschied zwischen den Bewegungsmustern von Ablenkung und Blickbedingung abhängig $F(1,11) = 6.86 p < .024$. Bei kurzen Kopfbewegungen mit Blickrichtungswechsel vergrößerte Ablenkung die Phasenverschiebung in beiden Bewegungsmustern. Bei den Kopfbewegungen ohne Blickrichtungswechsel, also wenn der Blick zur Mitte des Bildschirms gehalten wurde, vergrößerte Ablenkung die Phasenverschiebung im gleichsinnigen Bewegungsmuster, verkleinerte sie aber im gegensinnigen. Das geht aus Abb. 2.10 deutlich hervor.

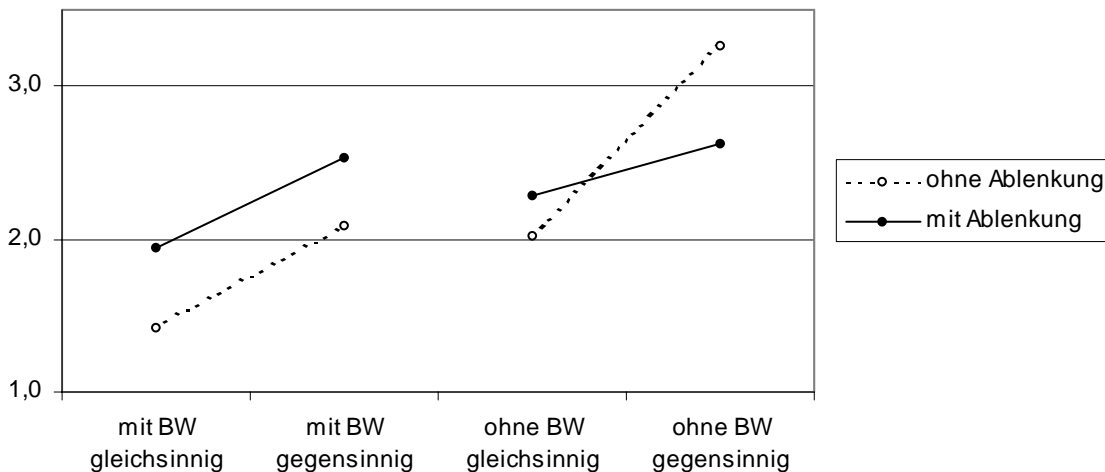


Abb. 2.10 Ablenkung vergrößerte die Phasenverschiebung in der Blickbedingung mit Blickrichtungswechsel bei beiden Bewegungsmustern und in der Blickbedingung ohne Blickrichtungswechsel nur beim gleichsinnigen Bewegungsmuster.

Insgesamt verkleinerte dadurch Ablenkung die Phasenverschiebung bei der Blickbedingung ohne Blickrichtungswechsel und vergrößerte sie bei der Blickbedingung mit Blickrichtungswechsel $F(1,11) = 6.634 p < .026$. Das ist allerdings nur ein Mittelungsergebnis und daher inhaltlich belanglos. Wesentlich bedeutungsvoller ist hingegen der Einfluss von Ablenkung auf den Unterschied der Phasenverschiebung zwischen den beiden

Bewegungsmustern in der Blickbedingung ohne Blickrichtungswechsel. Die ungewohnte Situation, den Kopf zu drehen und dabei den Blick geradeaus zur Mitte zu halten führte dazu, dass die Phasenverschiebung ohne Ablenkung im gegensinnigen Bewegungsmuster deutlich größer war als in der Blickbedingung mit Blickrichtungswechsel. Das könnte im Zusammenhang damit stehen, dass bei dieser ungewohnten Bewegung andere Strategien verwendet wurden als bei der eher gewohnten Bedingung mit Blickrichtungswechsel. Der Unterschied der Phasenverschiebung zwischen den Bewegungsmustern ist in Abb. 2.11 noch einmal gesondert aufgezeigt.

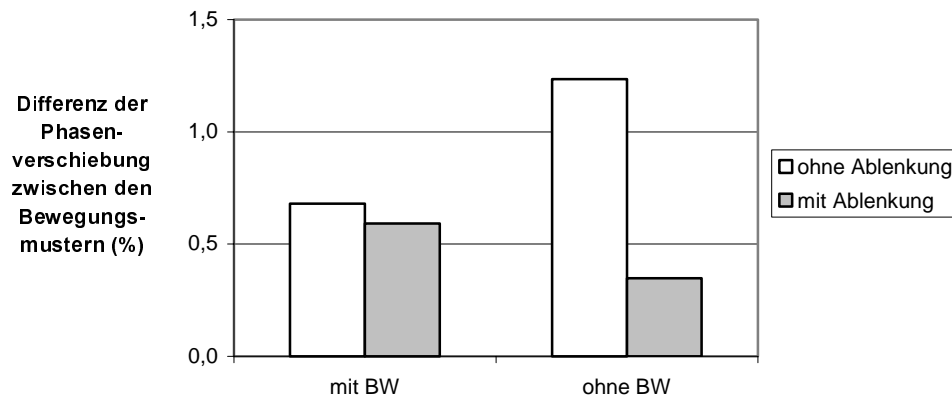


Abb. 2.11 Ablenkung veränderte den Unterschied der Phasenverschiebung zwischen den Bewegungsmustern nur in der Blickbedingung ohne Blickrichtungswechsel.

Die Interpretation dieses Ergebnisses deshalb unklar, weil die Augen im Kopf eine Bewegung in die entgegengesetzte Richtung der Bewegung des Kopfes im Raum ausführten. Die Verringerung der Phasenverschiebung im gegensinnigen Bewegungsmuster war also in Wirklichkeit eine Verringerung der Phasenverschiebung im gleichsinnigen Bewegungsmuster, bezogen auf die Augenbewegung. Höchst wahrscheinlich handelt es sich bei diesem Ergebnis daher um Kompensationsstrategien, um mit dieser schwierigen Situation umzugehen. Diese Strategien haben sich vermutlich durch Ablenkung verändert.

Die Weite der Kopfbewegungen hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Phasenverschiebung. Tendenziell war die Phasenverschiebung aber bei weiten Kopfbewegungen eher kleiner als bei kurzen. Auch die Vergrößerung der Phasenverschiebung im gegensinnigen Bewegungsmuster im Vergleich zum gleichsinnigen war bei weiten Kopfbewegungen tendenziell größer als bei kurzen $F(1,11) = 3.903$ $p < .074$. Ablenkung änderte daran aber nichts.

Die wichtigste Frage dieses Experimentes war: Ist es möglich, die höheren Steuermechanismen durch Ablenkung soweit zu blockieren, dass sich der Reflex direkt im Bewegungsmuster zeigt? Diese Frage lässt sich mit einem klaren „Nein!“ beantworten, wenn man davon ausgeht, Einflüsse des Reflexes müssten sich in den Kennwerten Phasenvariabilität und Phasenverschiebung messen lassen. An der Phasenvariabilität änderte Ablenkung überhaupt nichts und die Phasenverschiebung wurde durch Ablenkung größer, unabhängig vom Bewegungsmuster. Ausgenommen davon waren nur kurze Kopfbewegungen ohne Blickrichtungswechsel. Bei diesen Bewegungen war die Phasenverschiebung im gegensinnigen Bewegungsmuster mit Ablenkung kleiner als ohne Ablenkung. Sie war aber immer noch größer als im gleichsinnigen Bewegungsmuster.

Da der Reflex hinsichtlich seiner Wirkung auf qualitative Merkmale von Bewegung bisher noch nicht untersucht worden war, war nicht klar, ob er sich vielleicht nicht auch in anderen als den bisher dargestellten Bewegungsmerkmalen zeigt. Im folgenden werden daher die

Kennwerte Periodenvariabilität, Bewegungsweiten und Weitenvariabilität, jeweils für Lenker- und Kopfbewegungen getrennt dargestellt.

2.3.4 Bewegungsweiten

Die Lenkbewegungen waren beim gegensinnigen Bewegungsmuster weiter als beim gleichsinnigen ($F(1,11) = 6.926$ $p < .023$ beim Weitendesign und $F(1,11) = 5.085$ $p < .045$ beim Blickrichtungsdesign). Dabei war der Unterschied zwischen den Bewegungsmustern mit $9,21^\circ$ bei den weiten Kopfbewegungen am größten, mit $9,07^\circ$ knapp gefolgt von den kurzen Kopfbewegungen mit Blickwechsel und mit $4,05^\circ$ bei den kurzen Kopfbewegungen ohne Blickwechsel deutlich kleiner.

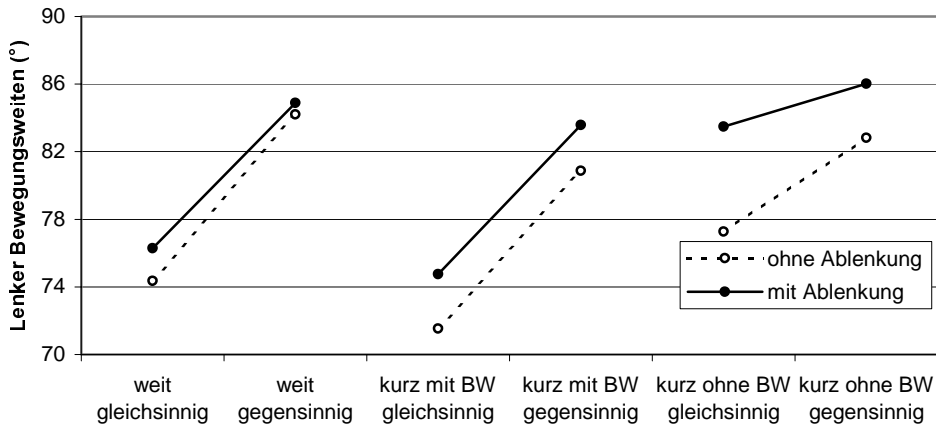


Abb. 2.12 Alle drei Durchführungsbedingungen sind zur Übersicht in einer Grafik vereint. Die Lenkbewegungen sind, dem Reflexmuster entsprechend, im gegensinnigen Bewegungsmuster weiter.

Ablenkung vergrößerte die Lenkbewegungen insgesamt. Am weitesten bei den kurzen Kopfbewegungen ohne Blickwechsel, wodurch beim Blickrichtungsdesign auch die Faktoren Ablenkung $F(1,11) = 16.413$ $p < .002$ und Blick $F(1,11) = 5.097$ $p < .045$ signifikant wurden. Ablenkung hatte aber bei den verschiedenen Bewegungsmustern keine unterschiedlich starke Auswirkung (bei allen Interaktionen $F < 1$).

Die Weiten der Kopfbewegungen waren hingegen vom Bewegungsmuster vollkommen unabhängig. Ablenkung verringerte die Weiten der Kopfbewegungen im Blickrichtungsdesign um 4° $F(1,11) = 41.659$ $p < .001$. Im Weitendesign wirkte sich Ablenkung bei den kurzen Kopfbewegungen deutlich mehr aus als bei den weiten $F(1,11) = 44.541$ $p < .001$. Das ist durch den Umstand erklärbar, dass die weiten Bewegungen an der physisch machbaren Grenze statt fanden. Sie wurden gewissermaßen „bis zum Anschlag“ ausgeführt. Daher ist fehlende Auswirkung von Ablenkung bei dieser Bedingung nicht sehr verwunderlich.

2.3.5 Weitenvariabilität

Die Weitenvariabilität der Kopf und Lenkbewegungen wurde durch Ablenkung in den verschiedenen Kopfbedingungen ganz unterschiedlich verändert. Grundsätzlich wurde sie durch Ablenkung eher kleiner (Weitendesign: Kopf $F(1,11) = 15.826$ $p < .002$, Lenker $F(1,11) = 14.780$ $p < .003$; Blickrichtungsdesign: Kopf $F(1,11) = 6.787$ $p < .024$, Lenker nicht signifikant).

Die Weitenvariabilität der Kopfbewegungen war bei den weiten Kopfbewegungen kleiner als bei den kurzen $F(1,11) = 31.225$ $p < .001$. Dies kann möglicherweise auf einen Deckeneffekt zurückgeführt werden. Die weiten Kopfbewegungen waren an der Grenze der schmerzfreen Beweglichkeit auszuführen. Interessant dabei ist, dass Ablenkung zwar einen deutlich

kleineren Effekt hatte als bei den kurzen Kopfbewegungen $F(1,11) = 4.380$ $p < .06$ aber dennoch auch in dieser Kopfbedingung zu einer Verringerung der Weitenvariabilität führte.

Die Tatsache, ob der Blick mitbewegt wurde oder nicht, veränderte die Auswirkung von Ablenkung auf die Weitenvariabilität von Kopf- und Lenkbewegungen. Ablenkung verringerte die Weitenvariabilität der Kopfbewegungen wesentlich weniger, wenn der Blick nicht mitbewegt wurde $F(1,11) = 15.470$ $p < .002$. Dafür war in dieser Bedingung das Bewegungsmuster ausschlaggebend. Die Weitenvariabilität der Kopfbewegungen war bei Kopfbewegungen ohne Blickrichtungswechsel im gegensinnigen Bewegungsmuster kleiner als im gleichsinnigen $F(1,11) = 5.756$ $p < .035$.

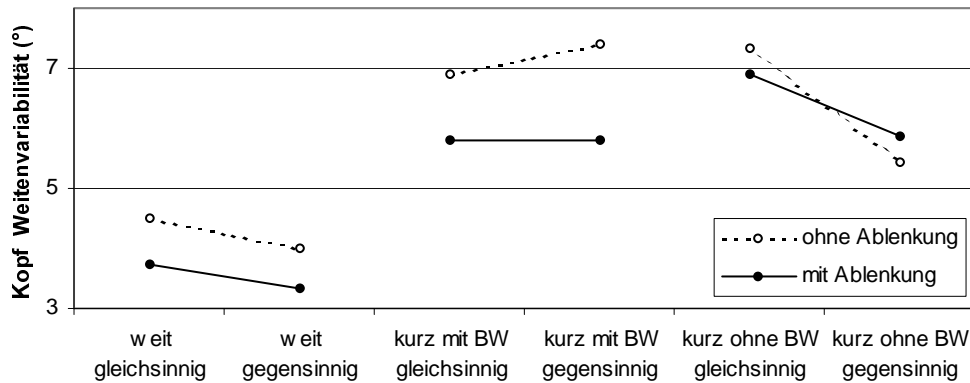


Abb. 2.13 Die Weitenvariabilität der Kopfbewegungen ist, vielleicht durch einen Deckeneffekt, bei den weiten Kopfbewegungen geringer und wird außer in der Blickbedingung mit zur Mitte gerichtetem Blick durch Ablenkung kleiner.

Bei den Lenkbewegungen verkleinerte Ablenkung die Weitenvariabilität, wenn der Blick mitbewegt wurde und vergrößerte sie, wenn dies nicht der Fall war $F(1,11) = 7.419$ $p < .02$. Der Einfluss des Bewegungsmusters war tendenziell ähnlich wie bei den Kopfbewegungen, wurde aber nicht signifikant.

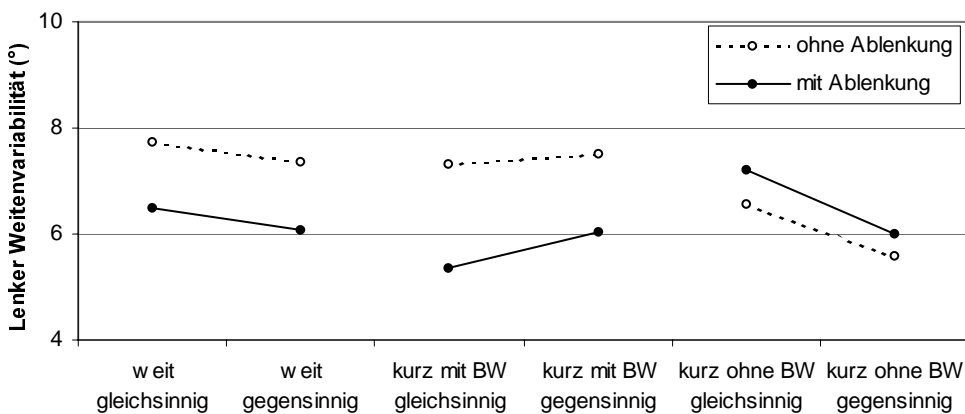


Abb. 2.15 Alle drei Durchführungsbedingungen sind zur Übersicht in einer Grafik vereint.

2.3.6 Periodenvariabilität

Ablenkung veränderte den Einfluss des Bewegungsmusters auf die Periodenvariabilität der Lenkbewegungen bei den verschiedenen Kopfbedingungen auf unterschiedliche Weise (Weitendesign: $F(1,11) = 7.311$ $p < .021$; Blickrichtungsdesign: $F(1,11) = 4,58$ $p < .056$).

Bei den kurzen Kopfbewegungen mit Blickrichtungswechsel (Abb. 2.12 in der Mitte) war die Periodenvariabilität ohne Ablenkung im gegensinnigen Bewegungsmuster kleiner. Unter

Ablenkung unterschieden sich die Bewegungsmuster nicht. Im Unterschied dazu war die Periodenvariabilität bei den weiten Kopfbewegungen (Abb. 2.12 links) und bei den kurzen Kopfbewegungen ohne Blickrichtungswechsel (Abb. 2.12 rechts) ohne Ablenkung im gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner und mit Ablenkung im gegensinnigen.

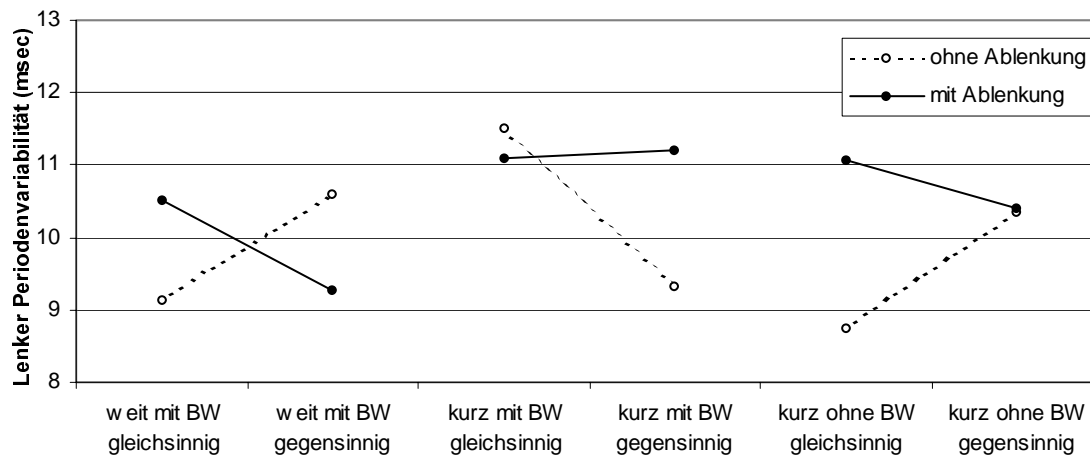


Abb. 2.14 Alle drei Durchführungsbedingungen sind zur Übersicht in einer Grafik vereint.

Sowohl die Weite der gleichzeitig ausgeführten Kopfbewegungen als auch die Tatsache, ob sich mit dem Kopf auch die Blickrichtung drehte oder nicht, hatten also maßgeblichen Einfluss darauf, wie sich Ablenkung in Abhängigkeit von der Phasenlage auf die Periodenvariabilität der Lenkbewegungen auswirkte.

Bei den Periodenvariabilitäten der Kopfbewegungen war das Muster ähnlich. Insgesamt war die Periodenvariabilität der Kopfbewegungen etwas größer als jene der Lenkbewegungen. Aber auch hier unterschieden sich die verschiedenen Kopfbedingungen hinsichtlich des Einflusses von Ablenkung auf die Periodenvariabilität in Abhängigkeit vom Bewegungsmuster ($F(1,11) = 11.498$ $p < .006$ im Weitendesign und $F(1,11) = 7.169$ $p < .022$ im Blickrichtungsdesign).

2.3.7 Seiteneffekte

Der Vorlauf des Kopfes und die Phasenvariabilität wurden an den linken und rechten Umkehrpunkten getrennt berechnet. Dabei fielen Unterschiede auf. Bei kurzen Kopfbewegungen war der Vorlauf des Kopfes ohne Ablenkung auf der rechten Seite kleiner und mit Ablenkung auf der linken $F(1,11) = 7.392$ $p < .02$. Diese Seitenumkehr trat bei den weiten Kopfbewegungen nicht auf $F(1,11) = 18.580$ $p < .01$.

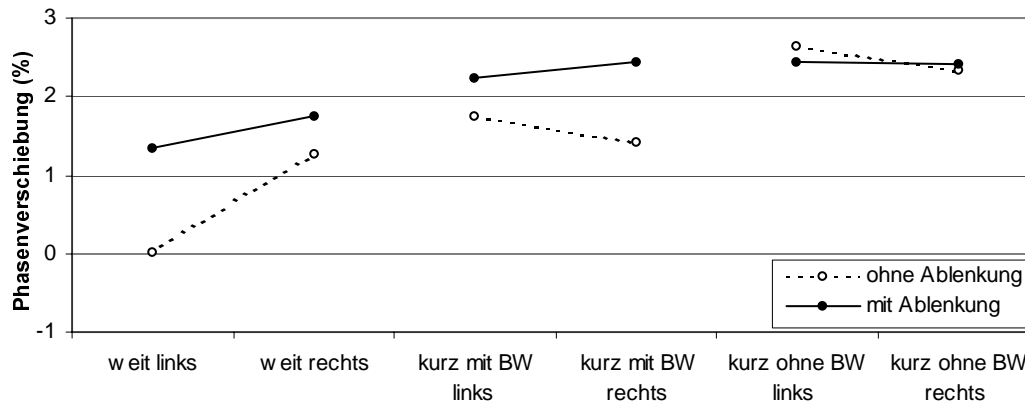


Abb. 2.15 Gegenüberstellung der an den linken und rechten Umkehrpunkten gemessenen Phasenverschiebung bei den unterschiedlichen Blickbedingungen.

Da Seitenasymmetrien nicht eigentlicher Inhalt dieser Untersuchung waren, wurde auf weitere Erklärung verzichtet. An dieser Stelle sei nur festgehalten, dass Seitenasymmetrien grundsätzlich vorhanden und von der Weite der Kopfbewegung, von Ablenkung, und davon, ob der Blick mitbewegt wurde oder nicht, abhängig waren. Bisher wurden nur ein Unterschiede des Vorlaufs zwischen der dominanten und der nicht dominanten Hand gefunden (z.B. Viviani et al, 1998, Swinnen, Jardin & Meulenbroek 1996). Die hier dargestellten Bewegungen unterschieden sich davon darin, dass es sich hier um ein Bewegungsmuster gehandelt hat, bei dem immer Muskelaktivität auf beiden Körperseiten nötig war. Seitenasymmetrien sind daher grundsätzlich nicht selbstverständlich. Ob diese in irgendeiner Form hemisphärenabhängig waren, lässt sich aufgrund der Ergebnisse dieses Experimentes nicht bestimmen.

2.4 Diskussion

2.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

2.4.1.1 Phasenvariabilität

Die Phasenvariabilität war nur vom Bewegungsmuster abhängig. Das gleichsinnige Bewegungsmuster war das bevorzugte. Ablenkung hatte keinen Einfluss auf die Phasenvariabilität. Ein Einfluss des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes auf die Stabilität von periodischen Lenkbewegungen war auch unter Ablenkung nicht nachweisbar.

Ablenkung hatte überhaupt keinen Einfluss auf die Stabilität der Bewegung. Eine ähnliche Robustheit der Phasenvariabilität gegenüber Ablenkung fanden auch Summers et al. (1998) deren Probanden mit beiden Händen gleichzeitig Kreise malten und Pellechia & Turvey (2001), die Pendelbewegungen mit Holzstäben untersuchten. Das einzige Experiment, in dem sich eine Veränderung der Phasenvariabilität unter Ablenkung zeigte war, wenn die beiden Stäbe nicht gleich lang waren (Pellechia & Turvey 2001, Experiment 2).

2.4.1.2 Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung war ebenfalls im gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner als im gegensinnigen. Die Bevorzugung des gleichsinnigen Bewegungsmusters zeigte sich also auch im Kennwert Phasenverschiebung. Ablenkung vergrößerte die Phasenverschiebung und wirkte sich unterschiedlich aus, je nachdem, ob der Blick mitbewegt oder zur Mitte gehalten wurde. Wenn der Blick nicht mitbewegt wurde, bewirkte Ablenkung beim gegensinnigen Bewegungsmuster eine Verringerung der Phasenverschiebung.

2.4.1.3 Bewegungsweiten

Die Lenkbewegungen waren im gegensinnigen Bewegungsmuster weiter als im gleichsinnigen. Ablenkung änderte daran nichts (signifikant). Wenn der Blick nicht mitbewegt wurde, war der Einfluss von Ablenkung größer und jener des Bewegungsmusters kleiner.

Im Gegensatz dazu waren die Weiten der Kopfbedingung vom Bewegungsmuster unabhängig und wurden durch Ablenkung verkleinert. Bei den weiten Kopfbewegungen hatte Ablenkung weniger Auswirkung, da hier die physischen Grenzen bedeutsamen Einfluss hatten.

Ein Zusammenhang zwischen den weiteren Lenkbewegungen im gegensinnigen Bewegungsmuster und dem Reflex ist nicht gesichert, einige Gründe sprechen aber dafür. Der einfachste ist der Mangel an anderen, ähnlich einfachen und plausiblen Erklärungsgründen. Ein weiterer ist, dass nur die Bewegungsweiten der Lenkbewegungen, nicht aber jene der Kopfbewegungen vom Bewegungsmuster abhängig waren. Eine Erklärung durch den Reflex würde genau das vorhersagen, da die Aktivität der Extremitäten durch Rückmeldung der Kopfposition an das Gehirn ausgelöst wird (Suzuki, Timerick & Wilson, 1985). Position oder Bewegung der Gliedmassen lösen hingegen keine Kopfdrehung aus.

Die Grundidee des Experimentes, den tonischen Halsreflex durch Ablenkung hervortreten zu lassen, gelang aber auch bei den Weiten der Lenkbewegung nicht. Mit oder ohne Ablenkung, die Lenkbewegungen waren immer beim gegensinnigen Bewegungsmuster weiter als beim gleichsinnigen.

2.4.1.4 Periodenvariabilität und Weitenvariabilität

Über die inhaltliche Bedeutung dieser beiden Kennwerte war im einleitenden Teil dieses Experimentes nicht gesprochen worden. Das liegt daran, dass es sich hierbei um Kennwerte der Bewegungsausführung der einzelnen Bewegungen handelt und nicht um Kennwerte der Koordination dieser beiden Bewegungen. Eine Bedeutung für die Koordination ergibt sich nur in jenen Fällen, in denen diese Kennwerte das Zustandekommen eines der Kennwerte der Koordination (Phasenverschiebung und Phasenvariabilität) allein erklären können. Diesem Gedanken sind im folgenden einige Zeilen gewidmet.

Die Periodenvariabilität von Lenk- und Kopfbewegungen wurde bei den unterschiedlichen Kopfbedingungen und Bewegungsmustern von Ablenkung ganz unterschiedlich beeinflusst. In manchen Bedingungen wurde sie größer, in manchen kleiner und in manchen blieb sie unverändert. Die Periodendauer war hingegen nur von Ablenkung beeinflusst und wurde in allen Versuchsbedingungen gleichmäßig durch Ablenkung länger. Die unterschiedlichen Periodenvariabilitäten sind daher nicht durch unterschiedliche Periodendauern erklärbar. Andererseits können die unterschiedlichen Periodenvariabilitäten aber auch nicht als Erklärung der Effekte der Phasenvariabilität herangezogen werden. Die Phasenvariabilität war, von Ablenkung und Blickbedingung unabhängig, immer im gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner.

Ähnlich wie die Periodenvariabilität wurde auch die Weitenvariabilität durch Ablenkung ganz unterschiedlich beeinflusst. Grundsätzlich wurde sie durch Ablenkung eher kleiner. Wenn der Blick nicht mitbewegt wurde, hatte Ablenkung weniger Einfluss. In dieser Bedingung war eher das Bewegungsmuster maßgeblich mit kleineren Variabilitäten im gegensinnigen Bewegungsmuster.

2.4.2 Die Beteiligung des Reflexes

Wir waren ursprünglich davon ausgegangen, dass die höheren Steuerfunktionen den Reflex modulieren. Beeinträchtigung der höheren Funktionen durch Ablenkung sollte dieses Modulieren nicht mehr möglich machen, der Reflex sollte sich in der Bewegung deutlicher

zeigen. Die Ergebnisse zeigen ganz eindeutig, dass das so nicht geklappt hat. Dafür lassen sich verschiedene, mögliche Erklärungen finden. Die eine ist, dass der asymmetrische, tonische Halsreflex bei dieser Art von Bewegungen gar nicht beteiligt ist. Unsere Ergebnisse geben keinen eindeutigen Hinweis auf eine Beteiligung des Reflexes. Eventuell lassen sich die weiteren Lenkbewegungen im gegenphasigen Bewegungsmuster dadurch erklären. Diese Einflüsse waren aber auch ohne Ablenkung vorhanden und veränderten sich durch Ablenkung nicht. Wenn also tatsächlich der Reflex für die weiteren Lenkbewegungen verantwortlich war, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der Reflex unabhängig von höheren Steueranteilen wirkte.

Eine Möglichkeit, woran das liegen könnte ist, dass die ursprüngliche Idee der Modulation des Reflexes durch höhere Funktionen nicht stimmt. Vielleicht bleibt der Reflex unverändert und die höheren Funktionen greifen direkt auf Motoneuron-Ebene in die Steuerung der Bewegung ein. Reflex und höhere Funktionen wirken nach diesem Modell unabhängig voneinander direkt auf die Bewegung. Die folgende Abbildung (Abb. 2.17) zeigt eine schematische Darstellung der ursprünglichen und der Veränderten Annahmen. Während nach unserer ursprünglichen Annahme höhere Funktionen die Bewegung durch Modulation des Reflexes verändern, haben sie nach der neuen Sichtweise direkten Zugriff auf die Bewegung.

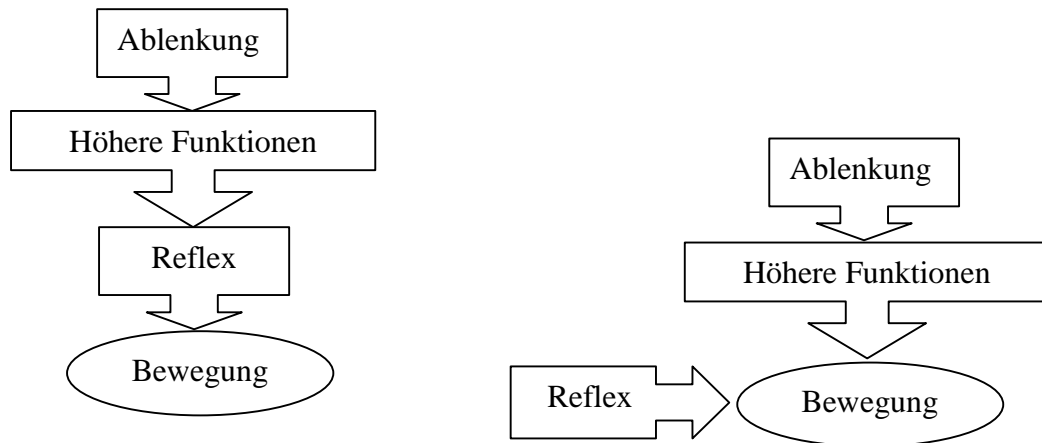


Abb. 2.16 Ursprüngliches und alternatives Modell mit unabhängiger Wirkung von Reflex und höheren Steuerfunktionen auf die Bewegung

Dieses Modell steht in Einklang mit dem Ergebnis, dass Einflüsse des Reflexes auf die Weiten der Bewegungen gefunden wurde, dieser Einfluss aber von Ablenkung unabhängig war.

2.4.3 Unterschiedliche Arten höherer Steuerfunktionen

Die Phasenverschiebung vergrößerte sich unter Ablenkung, die Phasenvariabilität veränderte sich hingegen nicht. Dies steht auch in Einklang mit Ergebnissen von Summers et al (1998) und von Pellechia & Turvey (2001). Das Ergebnis unseres Experimentes fügt sich also in die Reihe von bestehenden, empirischen Belegen, die auf eine Zweiteilung der Steuerfunktionen in Bezug auf Abhängigkeit von Ablenkung hinweisen. Bestimmte Kennwerte der Bewegung sind von Ablenkung abhängig, andere nicht. Damit muss das entworfene Funktionsmodell noch um eine Einheit erweitert werden:

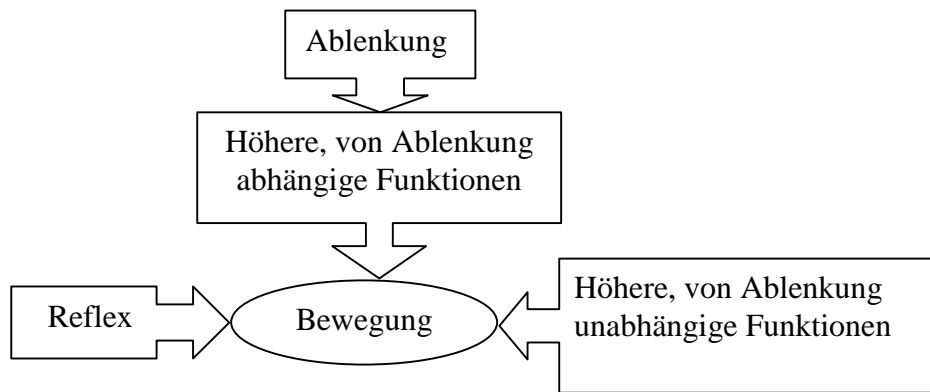


Abb. 2.17 Symboldarstellung eines Modells mit zwei von Ablenkung unabhängigen und einer von Ablenkung abhängigen Komponente.

Spannender und für ein tieferes Verständnis von Bewegungssteuerung bedeutungsvoller als die Einteilung der Steuerfunktionen in diese zwei Gruppen ist die Beantwortung der Frage, wodurch sich die beiden Gruppen noch unterscheiden, außer dass sie mehr oder weniger von Ablenkung abhängig sind.

Ein erster Hinweis könnte sich aus den Experimenten zu Veränderung der Kopplung durch Aufmerksamkeitszuwendung ergeben. Während sich die Phasenverschiebung bei intern getriggerten Bewegungen (Stucchi & Viviani, 1993) durch Aufmerksamkeitszuwendung nicht veränderte, bewirkte Aufmerksamkeitszuwendung bei Bewegungen, die auf Töne synchronisiert wurden (Swinnen, Jardin & Meulenbroek, 1996; Amazeen et al, 1997) sehr wohl eine Veränderung der Phasenverschiebung. Möglicherweise liegt der entscheidende Unterschied am Vorliegen von modalitätsübergreifender Koordination. Dies könnte auch erklären warum bei Pellechia & Turvey (2001) die Phasenvariabilität durch Ablenkung in dem einzigen Experiment mit unterschiedlich langen Stäben verändert worden war. Durch die unterschiedlich langen Stäbe sind zusätzliche Steuervorgänge nötig, die von Ablenkung abhängig sind, während das „normale Pendeln“ unabhängig ist.

Als Ergebnis des ersten Experimentes können also zwei neue Sichtweisen angeführt werden.

1. Es scheint so zu sein, dass die Steuerfunktionen, die sich im Laufe des Lebens eines Menschen ausprägen um den asymmetrischen, tonischen Halsreflex auszugleichen, nicht diesen Reflex modulieren, sondern unabhängig davon direkt auf die Bewegung wirken.
2. Es scheint zwei durch unterschiedlich starke Abhängigkeit von Ablenkung von einander unterscheidbare Arten höherer Steuerfunktionen menschlicher Bewegung zu geben, die möglicherweise in Verbindung mit unterschiedlichen kortikalen Strukturen gebracht werden können.

Zu beiden Punkten sei angemerkt, dass es sich dabei um mögliche Sichtweisen handelt, die mit unseren und einigen bereits publizierten Ergebnissen in Einklang stehen. Die Ergebnisse sind aber nicht in der Lage deren Richtigkeit zu belegen.

3 Kopf – Arm Koordination bei diskreten Bewegungen

3.1 Einleitung

Periodische Bewegungen, wie sie im ersten Experiment beschrieben worden waren, kommen im Alltag relativ selten vor. Wo findet sich schon eine Straße in gleichmäßigem Slalomverlauf. Viel öfter steht der Mensch vor der Aufgabe, mit einzelnen, gezielten Bewegungen ein übergeordnetes Handlungsziel zu erreichen. Um zum Beispiel ein Fahrziel unfallfrei zu erreichen, ist es einerseits erforderlich, mit ausgleichenden Lenkbewegungen den Wagen auf der Fahrbahn zu halten und andererseits, auf unerwartet eintretende Ereignisse, wie zum Beispiel einen auf die Fahrbahn rollenden Kinderwagen, schnell und richtig zu reagieren.

Es ist also, um das Ziel zu erreichen, eine Reihe gezielter, einzelner Bewegungen durchzuführen. Jede dieser Bewegungen hat einen Anfang und ein Ende. Einzelne Bewegungen mit erkennbarem Anfang und Ende sind diskrete Bewegungen. Bedingt durch ihre klare zeitliche Struktur lässt sich für die Steuerung derartiger Bewegungen gut zwischen Vorbereitung und Durchführung der Bewegung unterscheiden.

Die grundlegende Idee des ersten Experimentes war gewesen, mit Hilfe von Ablenkung verschiedene an der Steuerung beteiligter Prozesse oder Mechanismen voneinander zu trennen und ihren jeweils besonderen Anteil an der Gesamtsteuerung herauszufiltern. Einflüsse des Reflexes wurden von höheren Steuerfunktionen unterschieden und diese wurden in eine von Ablenkung abhängige und eine von Ablenkung nicht abhängige Art unterteilt.

Diese Idee sollte im zweiten Experiment auf diskrete Bewegungen übertragen werden. Dazu war es erforderlich, zu der strukturellen Perspektive eine zeitliche Dimension hinzuzufügen und zu untersuchen, ob die Vorbereitung oder die Durchführung der Bewegungen von Ablenkung beeinflusst werden. Die Fragestellung für das zweite Experiment lautete nicht nur „Welche Anteile tragen wie zur Gesamtsteuerung von Bewegung bei?“ sondern auch noch „Und wann wirken sie?“

Wieder war der asymmetrische, tonische Halsreflex Ausgangspunkt der Untersuchung und damit Richtungsabhängigkeiten von Kopf- und Lenkbewegungen. Der Kopf war in diesem Experiment aber nicht immer in Bewegung sondern wechselte in vorgegebenem Ablauf zwischen den Positionen geradeaus, 90° nach links und 90° nach rechts gedreht. Auswirkungen dieser verschiedenen Positionen auf die Lenkbewegung waren der Inhalt dieses Experimentes. Im Gegensatz zum ersten Experiment wurde also nicht die Koordination zwischen zwei bewegten Körperteilen untersucht, sondern die Auswirkung der Haltung eines Körperteils, nämlich des Kopfes, auf die Bewegung von anderen, nämlich den Armen und Händen. Der Einfachheit halber, wird dieser Bewegungs-Haltungs-Zusammenhang aber mit dem selben Begriff „Bewegungsmuster“ bezeichnet wie die Koordination des ersten Experimentes.

Die Lenkbewegungen entsprachen einer Wahlreaktionsaufgabe. Auf ein über Kopfhörer dargebotenes, akustisches Signal hin sollte möglichst schnell in die Richtung gelenkt werden, aus der ein Ton kam. Mit dieser Anordnung sollten Richtungsabhängigkeiten zwischen kurzfristig eingenommenen Kopfhaltungen und willkürlich ausgelösten, schnellen Lenkreaktionen untersucht werden. Um zeitliche Aspekte dieser Abhängigkeiten zu untersuchen wurde die Dauer zwischen Erreichen der exzentrischen Kopfposition und dem Zeitpunkt des Auslösesignals für die Lenkbewegung zwischen 0, 400 und 800 msec. variiert. Ablenkung sollte wieder Aufschluss über mögliche beteiligte Komponenten, vor allem aber auch deren zeitliche Organisation ermöglichen. Wie im ersten Experiment wurde der Grad der

kognitiven Beanspruchung der Ablenkung durch die beiden Bedingungen „P zählen“ und „Addieren“ variiert.

Soweit dem Verfasser bekannt ist, wurde ein ähnliches Experiment bisher in der Literatur noch nicht berichtet. Die Hypothesen aufgrund experimenteller Befunde zu generieren, war daher so gut wie gar nicht möglich. Dennoch war die Fragestellung nicht ohne theoretischen Hintergrund entstanden. Ergebnisse aus zwei unterschiedlichen Forschungsbereichen haben wesentlich zum Entwurf dieses Experimentes beigetragen. Einerseits waren die Befunde zu Effekten von Voraktivierung auf Reaktionszeit und –kraft. Diese werden daher im folgenden beschrieben. Andererseits gibt es Befunde aus Experimenten zur parametrischen Kopplung, die zeigen, dass Kopplung auch auf Vorbereitungsebene stattfindet. Einige dieser Befunde werden im Anschluss vorgestellt.

3.1.1 Effekte von Voraktivierung

Den Einfluss von Vorspannung der Muskulatur auf Reaktionszeiten untersuchte Sanders (1980) mittels einer 4-fach Wahlreaktionsaufgabe. Die Aufgabe bestand darin, möglichst schnell mit dem Zeigefinger einen von vier Schaltern zu drücken, die rund um den Bildschirm angeordnet waren. Welcher der Schalter zu drücken war wurde nach einer Vorankündigung durch ein optisches Signal angezeigt. Dieses bestand aus einer horizontalen und einer diagonal verlaufenden Linie, die sich in der entsprechenden Ecke trafen. Vor Darbietung des Reizes ruhte der Finger auf einem Schalter am Tisch. Die gemessenen Variablen waren die Reaktionszeit als Zeit zwischen Ende der Reizdarbietung und Loslassen des Ruheschalters und die Bewegungszeit zwischen Loslassen des Ruheschalters und Drücken des richtigen Zielschalters. Als Vorankündigungszeit war die Dauer zwischen Vorankündigung und Darbietung des reaktionsauslösenden Reizes definiert.

Im ersten Experiment war die Vorankündigungszeit mit einer bzw. zehn Sekunden variiert. Die zweite unabhängige Variable war der Grad der Muskelanspannung. In der Hälfte der Durchgänge waren die Probanden angehalten, die entsprechenden Muskeln nach der Vorankündigung so stark wie möglich anzuspannen. Nach erfolgter Reaktion bis zur nächsten Vorankündigung sollten die Muskeln wieder möglichst gut entspannt werden. In den Kontrollblöcken fehlte die Anspannung der Muskulatur in der Vorankündigungsperiode.

Muskelvorspannung verkürzte die Reaktionszeit. Bei längerer Vorankündigungszeit wurde die Reaktionszeit länger und die Verkürzung der Reaktionszeit durch Muskelanspannung weniger. Auf die Bewegungsdauer hatte die Muskelvorspannung keinen signifikanten Einfluss.

Aufgrund der Ergebnisse von zwei weiteren Experimenten mit ähnlicher Aufgabenstellung konnte der Autor sicherstellen, dass es sich hierbei nicht um Effekte der Wahrnehmungsverarbeitung, sondern um Einfluss der Voraktivierung auf rein motorischer Ebene handelte.

Voraktivierung auf kognitiver Ebene wurde im „motor readiness model“ (Näätänen, 1971; Niemi & Näätänen, 1981) entwickelt. In diesem Modell wird zwischen einer unspezifischen Voraktivierung und einer gezielten, die Handlung auslösenden Aktivierung unterschieden. Nach dem „motor readiness model“ erhöht der Organismus das allgemeine motorische Aktivierungsniveau in Erwartung einer bevorstehenden Handlung schon vor der Darbietung des reaktionsauslösenden Reizes. Je näher das allgemeine Aktivierungsniveau an der Auslöseschwelle ist, desto weniger spezifische Aktivierung ist dann noch nötig um Bewegung auszulösen.

Mattes, Ulrich & Miller (1997) erweiterten dieses Modell und konnten dadurch den Effekt erklären, dass mit verkürzten Reaktionszeiten auch die Reaktionskraft kleiner wurde. Die

Logik ihrer Erklärung ist folgende: ein kleiner Unterschied zwischen Voraktivierungsniveau und Auslöseschwelle bei hohem Voraktivierungsniveau erfordert nur noch kleine spezifische Aktivierung, um die Bewegung auszulösen. Ist der Unterschied hingegen größer, muss auch die spezifische Aktivierung größer sein. Aufgrund der allgemeinen Variabilität des motorischen Systems ist bei größerer spezifischer Aktivierung auch größere Variabilität zu erwarten. Genauer noch, es ist nicht nur größere Variabilität sondern größeres, systematisches Überschießen zu erwarten.

Dadurch hat höhere Voraktivierung zwei Vorteile. Erstens kann die Bewegung schneller ausgelöst werden (kleinere Reaktionszeit) da weniger spezifische Aktivierung aufgebaut werden muss. Zweitens wird die Bewegung aber auch genauer im Sinne kleinerer Reaktionskraft. Mit der kleineren spezifischen Aktivierung wird auch deren Überschießen kleiner, was sich in niedriger Reaktionskraft messen lässt.

Die Aufgabe bei Mattes, Ulrich & Miller war eine einfache Reaktionsaufgabe. 500 msec lang wurde am Bildschirm eine der Zahlen 10, 20, 40, 60, 80 oder 100 dargeboten. Diese Zahl entsprach der Wahrscheinlichkeit (ausgedrückt in %), dass nach der Vorankündigung auch ein Reaktionssignal erscheinen wird. 800 msec nach Verschwinden der Wahrscheinlichkeitsanzeige wurde für 300 msec ein Fixierkreuz dargeboten und in den Fällen, in denen das Reaktionssignal dargeboten wurde, erschien dieses 1750 msec danach als weißes Rechteck am Bildschirm. Eine Taste, die mit einem Kraftmesser ausgestattet war sollte daraufhin möglichst schnell gedrückt werden.

Nach dem motor readiness model sollte die Reaktionszeit bei höherer Reaktionswahrscheinlichkeit kleiner werden. Und zwar deswegen, weil eine höhere Wahrscheinlichkeit einer Reaktion mit mehr Anstrengung, eine solche vorzubereiten verbunden ist. Dadurch sollte auch die Voraktivierung höher sein. Die Erweiterung des motor readiness model von Mattes, Ulrich & Miller ließ zusätzlich zur kürzeren Reaktionszeit auch kleinere Reaktionskraft erwarten. Genau dies trat ein.

In einem zweiten Experiment wurde die Dauer zwischen dem Fixierkreuz und dem Reaktionssignal in drei Stufen von 0.5, 1.75 und 3.0 sec variiert. Es ist bekannt, dass längere Vorperioden diesen Wahrscheinlichkeitseffekt auf die Reaktionszeit verringern. Falls das etwas mit Voraktivierung zu tun hat, sollte sich entsprechend auch eine Verringerung des Wahrscheinlichkeitseffektes bei der Reaktionskraft zeigen. Die erwartete Interaktion trat zwar bei der Reaktionskraft ein, nicht jedoch bei der Reaktionskraft.

Um die Wahrscheinlichkeit einer Beteiligung von Voraktivierung weiter abzuklären, wurde in einem dritten Experiment statt des optischen Vorankündigungssignals ein akustisches verwendet, dessen Voraktivierungskraft bedeutend höher sind. Dennoch bewirkten längere Vorperioden nur einen Unterschied des Effekts der Reaktionswahrscheinlichkeit bei den Reaktionszeiten, nicht aber bei den Reaktionskräften.

Die Autoren stellten zwei mögliche Interpretationswege vor. Entweder zeigen die Ergebnisse, dass die verkürzten Reaktionszeiten keine Auswirkung einer höheren Voraktivierung sind. Eine solche müsste sich ja auch bei den Reaktionskräften zeigen. Oder aber, und dieses Interpretationsmuster wird von den Autoren bevorzugt, die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Reaktionszeit und Reaktionskraft nicht, wie sie es ausdrücken „die zwei Seiten einer Münze“ sind. In anderen Worten, Reaktionskraft und Reaktionszeit „index different aspects of motor functioning“.

Aus einer formalen Sichtweise betrachtet, handelt es sich bei der Reaktionszeit um Aspekte der Vorbereitung von Bewegung und bei der Reaktionskraft um Aspekte der Bewegungsdurchführung. Spezifische Kopplungseffekte während der Vorbereitung von

Bewegung wurden im Rahmen des Modells der parametrischen Kopplung beschrieben und werden im folgenden vorgestellt.

3.1.2 Kopplung auf Vorbereitungsebene

Belege für Kopplung auf Vorbereitungsebene konnte Heuer schon vor einigen Jahren erbringen (Heuer, 1986). Die Begrifflichkeit hat sich zwar in der Zwischenzeit verändert, aber letztlich ging es in dem im folgenden vorgestellten Experiment um genau dieses Thema.

Das Experiment diente der Frage, ob relations-abhängige Vorprogrammierung oder Programmierungswechselwirkungen besser zur Erklärung von Reaktionszeitunterschieden in Wahlreaktionsaufgaben herangezogen werden konnte. Was ist darunter genau zu verstehen: das experimentelle Paradigma war eine Zweifach-Wahlreaktionsaufgabe mit Vorankündigung wie sie von Rosenbaum (1980) zur Untersuchung von Bewegungsvorbereitung eingeführt worden war. Die beiden Reaktionen waren einfache Bewegungen mit beiden Händen. Zwischen dem Vorankündigungssignal und dem Reaktionssignal ist Zeit, die Bewegung soweit vorzubereiten, wie Wissen über ihre mögliche Ausprägung vorhanden war. Dies wird im weiteren als Vorprogrammierung bezeichnet. Nach dem Reaktionssignal müssen die Bewegungen fertig vorbereitet und zur Ausführung gebracht werden, was im weiteren als Hauptprogrammierung bezeichnet werden soll.

Das Ergebnis, das sich in derartigen Experimenten findet, sind längere Reaktionszeiten, wenn zwei unterschiedliche Bewegungen vorbereitet werden müssen. Die Logik der relations-abhängigen Vorprogrammierung ist folgende: werden zwei unterschiedliche Bewegungen vorbereitet, können nur die gemeinsamen Merkmale während der Vorprogrammierung vorbereitet werden. Nach dem Reaktionssignal müssen dann auch noch die unterschiedlichen Merkmale programmiert werden. Je unterschiedlicher also die beiden Bewegungen sind, desto weniger weit fortgeschritten ist der Vorbereitungsprozess zum Zeitpunkt des Reaktionssignals und desto mehr Programmierungsarbeit ist nach dem Reaktionssignal noch zu leisten, was sich in der längeren Reaktionszeit niederschlägt.

Die Hypothese der Programmierungswechselwirkungen verzichtet auf die in der Hypothese der relations-abhängigen Vorprogrammierung implizit enthaltenen strikte Unterscheidung zwischen Vorprogrammierung und Hauptprogrammierung. Sie geht von Wechselwirkungen zwischen den parallel verlaufenden Programmierungen der beiden Bewegungen aus, die vor oder nach dem Reaktionssignal stattfinden können.

Das impliziert unterschiedliche Annahmen bei unterschiedlicher Güte der Vorprogrammierung. Während bei relations-abhängiger Vorprogrammierung der Unterschied zwischen gleichen und ungleichen Bewegungen bei weniger guter Vorbereitung kleiner werden sollte, sollte er aufgrund der Programmierungswechselwirkungen größer werden.

Tatsächlich war der Reaktionszeitunterschied zwischen der Vorbereitung von gleichen und ungleichen Bewegungen bei beeinträchtigter Vorprogrammierung größer, wie es das Modell der Programmierungswechselwirkungen vorhergesagt hatte. Die Erklärung der längeren Reaktionszeit bei unterschiedlichen Bewegungen kann demzufolge auf Wechselwirkungen während der Programmierung zurückgeführt werden.

In einer Variation des Experimentes zeigte sich, dass weder unterschiedlich lange Vorprogrammierungszeiten noch die Einführung einer Zusatzaufgabe den beschriebenen Effekt veränderte. Die Zusatzaufgabe hatte nur grundsätzlich längere Reaktionszeiten zur Folge.

Dieses Überspiel der Programmierung einer Bewegung auf die Programmierung der zweiten fand sich in einer Reihe anderer Experimenten (für einen Überblick siehe z.B. Heuer 1994) und wurde in Form eines Modells mit zwei gekoppelten Akkumulatoren formalisiert (Heuer,

1987). Erweitert um einen transienten Aspekt, der nähere Beachtung im dritten Experiment dieser Arbeit findet, war dieses Modell die Grundlage des Modells der parametrischen Kopplung (Heuer, 1993). Auswirkungen von Ablenkung durch mentale Zusatzaufgaben auf die parametrische Kopplung wurden bislang noch nicht untersucht.

3.1.3 Fragestellung

Aufgrund der Befunde zur Voraktivierung wäre es durchaus denkbar, dass eine exzentrische Kopfposition unspezifische Voraktivierung auslöst, ähnlich der Erwartung einer motorischen Reaktion. Dann müsste bei exzentrischer Kopfposition die Reaktionszeit kürzer und der Krafteinsatz kleiner sein als bei geradeaus gehaltenem Kopf. Der Krafteinsatz wurde nicht direkt gemessen. Als Maß für die verwendete Kraft eignen sich bedingt aber auch Bewegungsweite und Bewegungszeit.

Die Richtung der zu erwarteten Voraktivierung könnte aber unterschiedlich sein, je nachdem ob das Reflexmuster oder eine Kopplung auf höherer Ebene dafür verantwortlich wäre. Nach dem tonischen Halsreflex wäre eine Voraktivierung des gegensinnigen Bewegungsmusters zu erwarten. Bei einer Kopfdrehung nach links wären daher kürzere Reaktionszeiten, kleinere Amplituden und kürzere Bewegungsdauern der Lenkbewegungen nach rechts zu erwarten.

Wenn höhere Steuerprozesse zu einer Voraktivierung bestimmter Muskelgruppen führen sollten, wäre eher das gegenteilige Muster zu erwarten, also kleinere Amplituden und kürzere Bewegungsdauern der Lenkbewegungen nach rechts wenn auch der Kopf nach rechts gedreht ist. Da nicht klar war, ob die Kopfposition im Sinne einer Voraktivierung bestimmte Bewegungen bevorzugt und andere nicht, war natürlich erst recht nicht klar, wie sich das durch Ablenkung verändern würde.

Eine weitere Fragestellung war, ob parametrische Kopplung Einfluss auf die Reaktionszeit der Lenkbewegung haben könnte. Aufgrund der Tatsache, dass die Kopfbewegung und die Lenkbewegungen nicht gleichzeitig ausgeführt wurden, war dies eher nicht zu erwarten. Dass die Einhaltung bestimmter Kopfpositionen sich in Form parametrischer Kopplung auf die Vorbereitung der Lenkbewegungen auswirkt geht nicht aus dem Modell parametrischer Kopplung hervor.

3.1.4 Hypothesen

Wenn der asymmetrische, tonische Halsreflex im Sinne einer Voraktivierung das Auslösen von Bewegungen erleichtert, die dem Reflexmuster entsprechen, müssten die Reaktionszeiten der Lenkbewegungen nach links bei nach rechts gehaltenem Kopf kürzer sein als bei geradeaus oder nach rechts gehaltenem Kopf. Umgekehrt müssten die Lenkbewegungen nach rechts bei nach links gehaltenem Kopf kürzer sein.

Ob sich der Reflex auf die Vorbereitung der Bewegung auswirkt oder auf die Durchführung oder auf beides, war im vorhinein nicht klar. Auswirkungen auf die Vorbereitung sollten sich in veränderten Reaktionszeiten, Auswirkungen auf die Durchführung in veränderten Bewegungsweiten oder –dauern zeigen. Dass dies sich durch Ablenkung verändert, war aufgrund der Ergebnisse des ersten Experimentes nicht zu erwarten. Im ersten Experiment hatte sich gezeigt, dass Einflüsse des Reflexes, wenn überhaupt, dann unabhängig von Ablenkung wirken.

Zu erwarten war außerdem eine vom Reflex und von Ablenkung unabhängige Bevorzugung des gleichsinnigen Bewegungsmusters aufgrund höherer, aber von Ablenkung unabhängiger Steuerprozesse. Diese könnten sich sowohl auf Vorbereitungsebene, also in kürzeren Reaktionszeiten im gleichsinnigen Bewegungsmuster, als auch auf Durchführungsebene in kürzeren Bewegungsdauern und weiteren Bewegungen zeigen.

3.2 Versuchsdarstellung

3.2.1.1 Versuchspersonen

An dem Experiment nahmen 2 weibliche und 10 männliche Probanden im Alter von 22 bis 32 Jahren (Durchschnitt 25.75 Jahre) teil. Sie waren über die Ziele des Experimentes nur sehr grob informiert und bekamen DM 12,50 pro Stunde.

3.2.1.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau war der gleiche wie beim ersten Experiment.

3.2.1.3 Aufgabe

In der Mitte der Leinwand wurden in regelmäßigen Abständen (alle 3 sec.) einstellige Ziffern (!= 0) gezeigt. Wenn unmittelbar nach der Ziffer ein Pfeil erschien, mussten die Vpn den Kopf unverzüglich in die Richtung des Pfeils drehen, denn die nächste Ziffer wurde auf der LED auf jener Seite angezeigt. Die darauffolgende Ziffer wurde wieder in der Mitte angezeigt. Der Ablauf aus der Sicht der Vp war also: „Kopf in der Mitte - Zahl sehen, bei Pfeil: drehen zur Seite und auf die nächste Zahl warten, danach gleich wieder Kopf zurück zur Mitte und auf die nächste Zahl bzw. den nächsten Pfeil warten usw.“

Zu bestimmten Zeitpunkten zwischen den Ziffern hörten die Vpn über Kopfhörer 30 ms lange Töne in einer Tonhöhe von 2000 Hz, auf die hin mit einer möglichst schnellen Lenkbewegung zu reagieren war. In Abb. 3.1 ist eingetragen, wann die Töne erfolgen konnten. ZP0 entspricht der zeitlichen Position genau bei Ende der Kopfdrehung. Diese war als erster von 10 aufeinanderfolgenden Datenpunkten des Kopfsignals mit einem Mittelwert unter 0.5° definiert. ZP400 und ZP800 waren Zeitpunkte 400 bzw. 800 msec. nach diesem Bewegungsende. Bei geradeaus gehaltenem Kopf betrug der zeitliche Abstand zwischen der letzten Zahl und dem Ton immer 1200 msec.

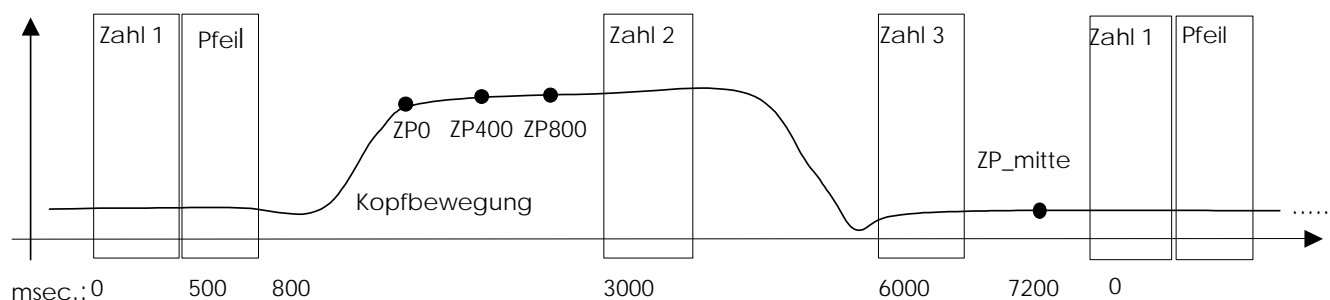


Abb. 3.1 Schemadarstellung des Versuchsablaufes. ZP0, ZP400 und ZP800 entsprechen den zeitlichen Positionen der reaktions-auslösenden kurzen, hohen Töne bei exzentrisch gehaltenem Kopf und ZP_mitte bei geradeaus gehaltenem Kopf.

Wenn die Reaktionszeit länger als der Mittelwert der letzten 5 Bewegungen plus drei mal die Standardabweichung oder wenn die Lenkbewegung nicht mindestens 30° weit war, wurde dies als Fehler mit einem 4572 Hz hohen und 100 ms langen Ton auf beiden Ohren gleichzeitig rückgemeldet. Die gleiche Art von Rückmeldung erfolgte, wenn der Kopf innerhalb einer Sekunde nach der Darbietung des Pfeils nicht zur Seite, bzw. nach Darbietung der Ziffer an der LED nicht zurück gedreht wurde. Bei mehr als zehn Fehlern wurde der gesamte Block unterbrochen und musste wiederholt werden. Die Ablenkung war wie in Experiment 1 mit der leichten Bedingung „P zählen“ und der schwierigeren „addieren“.

3.2.1.4 Reihenfolge

Pro Block erschienen 60 Ziffern, jede dritte war nicht in der Mitte. Pro Block kamen also 10 Ziffern pro Seite und 40 in der Mitte. Die Ablenkbedingungen wechselten sich bei jedem Block ab. In fünf Übungsblöcken lernten die Probanden die Aufgaben kennen, danach folgte eine Übungsserie mit 10 Blöcken. Die darauf folgenden 20 Blöcke wurden in die Berechnung aufgenommen. Es folgten immer ein Block mit P-zählen und ein Block mit addieren abwechselnd, die Hälfte der Vpn begann mit P-zählen, die andere mit addieren.

3.2.1.5 Messung

Es wurden wie im ersten Experiment die Drehung des Lenkers (Lenksignal) und des Blickvektors gemessen. Die Messung des Blickvektors war zur Bestimmung der Reaktionszeitpunkte während der Durchführung erforderlich. Nur das Lenksignal wurde gefiltert (Butterworth Tiefpassfilter, 4.Ordnung, 10 Hz Grenzfrequenz) und zur Berechnung der im folgenden dargestellten Kennwerte herangezogen.

3.2.1.6 Kennwerte

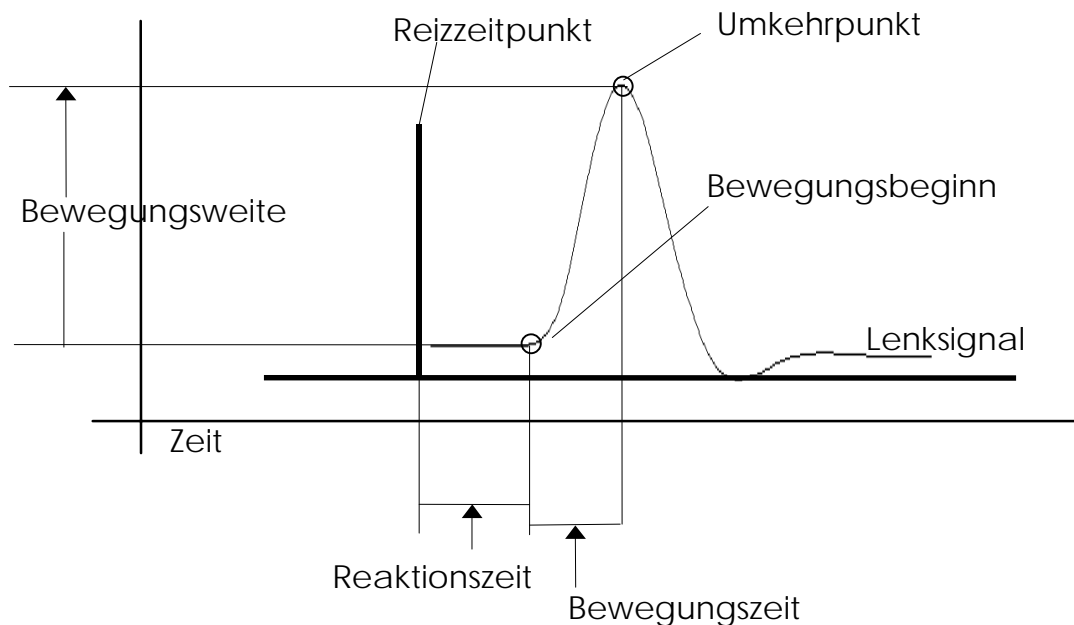


Abb. 3.2: Gemessene Punkte und berechnete Kennwerte

Nach jedem Reiz wurde das Lenksignal innerhalb einer Grenze von 2 sec. nach einem Umkehrpunkt durchsucht, dessen Amplitude sich um mindestens 15° vom Winkel des Lenkers zum Zeitpunkt des Reizes unterschied. Vor jedem gefundenen Umkehrpunkt wurde nach einem Bewegungsbeginn gesucht. Das war der erste Datenpunkt, dessen Abstand zum nächsten kleiner als 0.5° und dessen Amplitude kleiner als zwei Drittel der Amplitude des Umkehrpunktes waren. Bei einer Samplingfrequenz von 100 Hz entsprechen 0.5° zwischen zwei Datenpunkten $0.005^\circ/\text{sec}$.

Die daraus berechneten Größen waren die Reaktionszeit als Zeitdauer vom Beginn des Tones bis zum Beginn der Bewegung, die Bewegungsdauer als Zeitdauer von Bewegungsbeginn bis zum Umkehrpunkt. Als Bewegungsweite war der Amplitudenunterschied zwischen Bewegungsbeginn und Umkehrpunkt definiert.

3.2.1.7 Design

Diese Kennwerte wurden in zwei verschiedenen Varianzanalysen mit Messwiederholung ausgewertet. Wie im ersten Experiment werden diese beiden Berechnungen im weiteren als

unterschiedliche Designs bezeichnet, und zwar als Kopfrichtungsdesign und als Zeitpunktdesign. Das Ziel des Kopfrichtungsdesign war ein Vergleich von zentraler mit exzentrischer Kopfposition. Der Faktor Kopfrichtung war deshalb mit den Ausprägungen „Kopf links“, „Kopf mitte“ und „Kopf rechts“ dreistufig. Das Zeitpunktdesign diente hingegen der Frage nach dem Einfluss des Zeitpunktes der Lenkbewegung nach dem Ende der Kopfdrehung. Der Faktor Kopf war nur zweistufig mit den Stufen „Kopf links“ und „Kopf rechts“, Lenkbewegungen bei zentraler Kopfposition gingen in diese Berechnung nicht ein. Als zusätzlicher, zweiter Faktor kam aber der Faktor Zeitpunkt hinzu mit den drei Stufen „ZP 0“, „ZP 400“ und „ZP 800“ wobei „ZP“ die Abkürzung für Zeitpunkt war und die dazu gehörige Zahl den msec. nach Ende der Kopfdrehung entsprach. Beiden Designs gemeinsam waren die beiden zweistufigen Faktoren Lenkrichtung mit den Stufen „lenken links“ und „lenken rechts“ sowie Ablenkung mit den Stufen „mit Ablenkung“ und „ohne Ablenkung“.

3.3 Ergebnisse

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Kopfrichtungsdesign die drei verschiedenen Reizzeitpunkte von 0, 400 und 800 msec nach Ende der Kopfdrehung bei exzentrischer Kopfposition gemittelt wurden und mit konstanten Reizzeitpunkten von 1200 msec. nach Darbietung der Zahl bei zentraler Kopfposition verglichen wurden. Ein Vergleich zwischen den drei Kopfpositionen ist bei genauerer Betrachtung also ein Vergleich zwischen „exzentrischer Kopfposition nach erfolgter Kopfbewegung“ mit „zentraler Kopfposition ohne vorangegangener Kopfdrehung“. Mögliche Einflüsse dieser Tatsache werden an entsprechender Stelle im Zusammenhang mit den Ergebnissen diskutiert.

3.3.1 Allgemeine Beschreibung der Daten

Reaktionen, die zu spät oder gar nicht erfolgten (628), weniger als 15° weit waren (94) oder zur falschen Seite (118) ausgeführt worden waren wurden von der weiteren Berechnung ausgeschlossen. Von den 5760 theoretisch im Kopfrichtungsdesign ausgeführten Lenkbewegungen verbliebenen 4920, das entspricht einer Ausfallquote von 14.6%. Im Zeitpunktdesign wurden von den 2880 theoretisch auszuführenden Lenkbewegungen 361 (12.5%) von weiterer Berechnung ausgeschlossen. Die Reaktion war entweder gar nicht oder zu spät erfolgt (10.1%), zu klein (1.1%) oder zur falschen Seite (1.3%) ausgeführt worden.

3.3.2 Reaktionszeit

Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit um ca. 25 msec. $F(1,11) = 20.97$ $p < .01$. Die Reaktionszeit der Lenkbewegungen nach links war um ca. 10 msec. kürzer als die der Lenkbewegungen nach rechts $F(1,11) = 6.45$ $p < .027$. Der Unterschied zwischen den Reaktionszeiten der Lenkbewegungen nach links und nach rechts war von der Kopfposition abhängig $F(1,11) = 6.91$ $p < .013$. Ein zur Seite gedrehter Kopf verkürzte im Vergleich zum geradeaus gehaltenen Kopf die Reaktionszeit der Lenkbewegungen in die Gegenrichtung. Ablenkung verlängerte zwar insgesamt die Reaktionszeit, veränderte aber die Unterschiede zwischen den Lenkbewegungen nach links und nach rechts bei den verschiedenen Kopfpositionen nicht (alle Interaktionen $F(1,11) < 1$). Aus Abb. 3.3 geht hervor, dass die Reaktionszeiten der Lenkbewegungen in die der Kopfrichtung entgegengesetzte Richtung kürzer sind als bei gerade gehaltenem Kopf. Die Reaktionszeiten der Lenkbewegungen in die selbe Richtung sind hingegen kaum verkürzt, mit Ablenkung auf der rechten Seite sogar etwas verlängert.

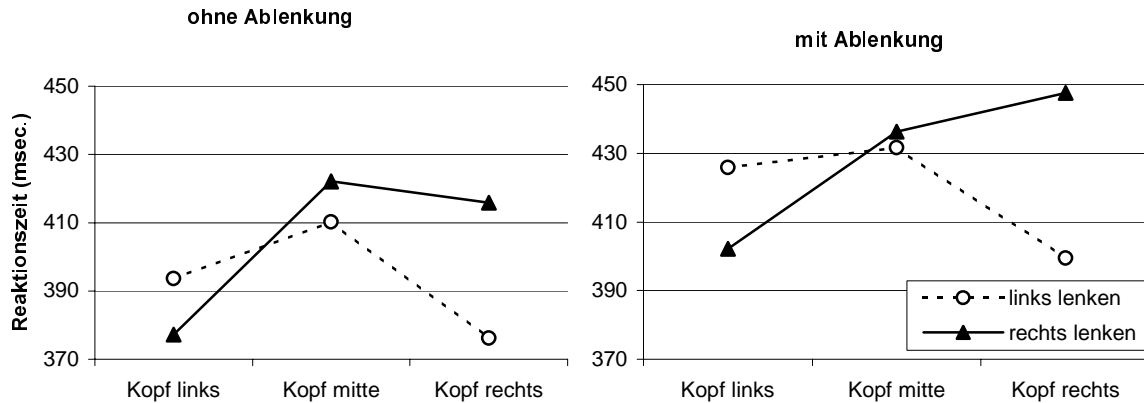


Abb. 3.2 Gegenüberstellung von Bewegungen mit und ohne Ablenkung. Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit, veränderte aber die Abhängigkeiten zwischen Lenkrichtung und Kopfposition nicht.

Dieses Ergebnis stimmt genau mit der Erwartung überein und lässt sich im Sinne einer Voraktivierung des Muskeltonus aufgrund des Halsreflexes interpretieren. Einige Gründe sprechen aber auch dagegen.

Bei einem früheren Experiment (Klein & Heuer 1999, Experiment 1), in dem der Kopf über längere Zeit in exzentrischer Position gehalten wurde war der Unterschied der Reaktionszeiten der Lenkbewegungen nicht von der Kopfposition abhängig. Der wesentliche Unterschied zu dem hier vorgestellten Experiment war die fehlende Rückkehrbewegung des Kopfes. Die Rückkehrbewegung des Kopfes scheint daher in dem jetzigen Experiment von entscheidender Bedeutung gewesen zu sein. Sowohl die Richtung als auch der Zeitpunkt der Rückkehr des Kopfes waren für die Vpn voraussehbar. Es ist davon auszugehen, dass die Rückbewegung des Kopfes sofort nach oder sogar schon während der Drehbewegung des Kopfes vorbereitet wurde. Dann erklärt sich die kürzere Reaktionszeit durch Übereinstimmung der Richtung der sich bereits in Vorbereitung befindenden Rückkehrbewegung des Kopfes mit der gerade auszuführenden Lenkbewegung. Das Modell der parametrischen Kopplung zweier Bewegungen (Heuer, 1993) würde derartiges vorhersagen.

Wenn die kürzere Reaktionszeit der Lenkbewegung auf gleichzeitige Vorbereitung der Rückkehrbewegung des Kopfes zurückgeführt werden kann, müsste sich dieser Einfluss eigentlich im Laufe der Zeit verändern. Die Vorbereitung einer einfachen Lenkbewegung sollte irgendwann fertig sein. Der Zeitpunkt des Beginns der Lenkbewegung nach dem Ende der Kopfdrehung hatte aber keinerlei Auswirkungen auf diesen Effekt.

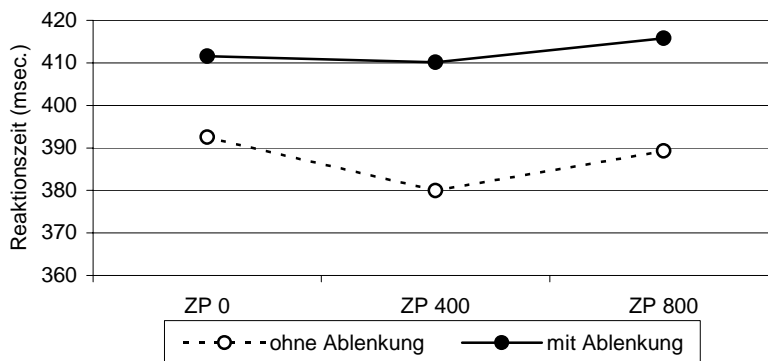


Abb. 3.3. Unterschiede zwischen den verschiedenen Zeitpunkten waren nicht signifikant.

Die wahrscheinlichste Erklärung für fehlenden Einfluss des Zeitpunktes ist, dass die Probanden die Rückkehrbewegung des Kopfes nicht immer zum gleichen Zeitpunkt vorbereitet haben. Dadurch dürfte sich der Einfluss gleichmäßig auf die verschiedenen Zeitpunkte verteilt haben. Eine andere Erklärung wäre, dass zu früheren Zeitpunkten die Voraktivierung durch den Reflex ausschlaggebend war und zu späteren mehr die Vorbereitung der Rückkehrbewegung des Kopfes. Dies auseinander zu halten ist aber aufgrund der vorliegenden Daten nicht möglich.

Wie dem auch sei, ob Reflex oder parametrische Kopplung, oder beides, Tatsache ist, dass der Effekt der Verkürzung der Reaktionszeit von Lenkbewegungen in die Gegenrichtung bei exzentrisch gehaltenem Kopf nicht durch Ablenkung verändert wurde. Aus diesem Ergebnis sind zwei wichtige Erkenntnisse abzuleiten. Erstens, es gibt Abhängigkeiten zwischen Kopfposition und Lenkbewegungen auf Vorbereitungsebene und zweitens, diese Abhängigkeiten werden nicht durch Ablenkung verändert. Falls es sich um Einflüsse von Voraktivierung durch den Reflex handelt deutet das darauf hin, dass der Reflex, wie auch im ersten Experiment von Ablenkung unabhängig auf die Bewegung wirkt. Falls die Interpretation durch parametrische Kopplung hingegen die richtige ist, deutet das Ergebnis darauf hin, dass zumindest einige Anteile der parametrischen Kopplung von Ablenkung unabhängig ablaufen.

3.3.3 Bewegungsweiten

Im ersten Experiment waren die Lenkbewegungen im gegensinnigen Bewegungsmuster weiter gewesen als im gleichsinnigen. Wenn sich dieser Effekt auch auf diskrete Bewegungen übertragen lässt, wären weitere Lenkbewegungen in die Gegenrichtung des zur Seite gedrehten Kopfes zu erwarten. Im Vergleich zu geradeaus gehaltenem Kopf waren aber die Lenkbewegungen nach rechts weiter wenn der Kopf nach rechts gedreht war, und jene nach links weiter, wenn der Kopf nach links gedreht war $F(1,11) = 7.93 p < .01$.

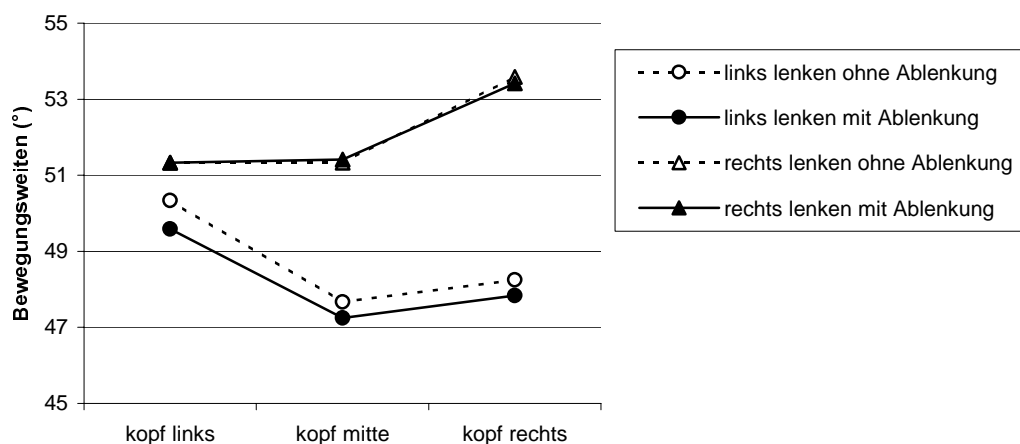


Abb. 3.4 Bewegungsweiten der Lenkbewegungen in °

Mit dem tonischen Halsreflex lässt sich dieses Ergebnis auf keinen Fall erklären. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Halsreflex an der Bestimmung der Weiten der in diesem Experiment durchgeführten diskreten Lenkbewegungen nicht beteiligt war. Die naheliegendste Erklärung dafür sind die kurzen Bewegungsdauern von ca. 300 msec. Dem Verfasser ist keine Studie bekannt, in der untersucht wurde, ab welchem Zeitpunkt nach Bewegungsbeginn erste Auswirkungen des Halsreflexes zu bemerken sind, aber aufgrund der tonischen Eigenschaften des Reflexes ist die Vorstellung nicht abwegig, dass dafür 300 msec zu kurz sind.

Die Lenkbewegungen nach rechts waren insgesamt im Schnitt um 3.58° weiter $F(1,11) = 4.93$ $p < .048$. Dies hängt vielleicht damit zusammen, dass bei Rechtshändern Lenkbewegungen nach rechts grundsätzlich weiter sind als nach links. Ablenkung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Weiten der Lenkbewegungen. Tendenziell wirkte sich Ablenkung auf die Lenkbewegungen nach links mehr aus als auf jene nach rechts $F(1,11) = 3.06$ $p < .108$.

Der Unterschied zwischen Lenkbewegungen nach links und nach rechts war 400 msec nach dem Ende der Kopfdrehung größer als unmittelbar oder 800 msec danach $F(2,10) = 4,80$ $p < .035$. Aus Abb. 3.5 geht hervor, dass die Lenkbewegungen nach links 400 msec. nach Bewegungsende der Kopfdrehung kürzer waren als zu den anderen Zeitpunkten und jene nach rechts weiter.

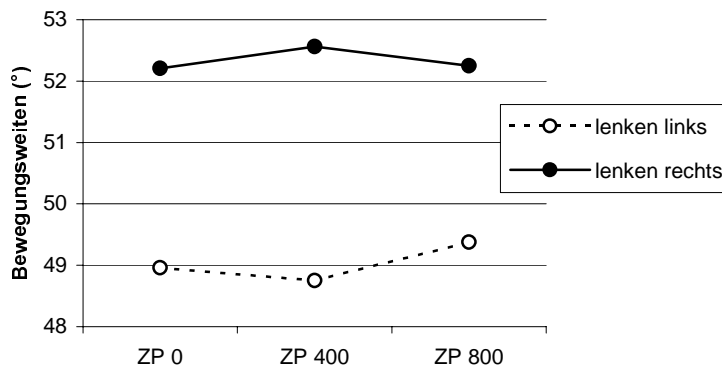


Abb. 3.5 400 msec. nach Ende der Kopfbewegung waren die Lenkbewegungen nach links am kürzesten und jene nach rechts am weitesten.

3.3.4 Bewegungsdauern

Im Gegensatz zu den Reaktionszeiten wurden die Bewegungsdauern der Lenkbewegungen durch Ablenkung kürzer $F(1,11) = 8.14$ $p < .016$. Wenn der Kopf zur Mitte gehalten wurde waren die Bewegungsdauern kürzer als bei exzentrischer Kopfposition $F(2,10) = 5.29$ $p < .027$. Die Lenkbewegungen nach rechts dauerten länger als jene nach links $F(1,11) = 4.11$ $p < .067$. Dieser Unterschied war größer wenn der Kopf geradeaus gehalten wurde $F(1,11) = 3.37$ $p < .076$

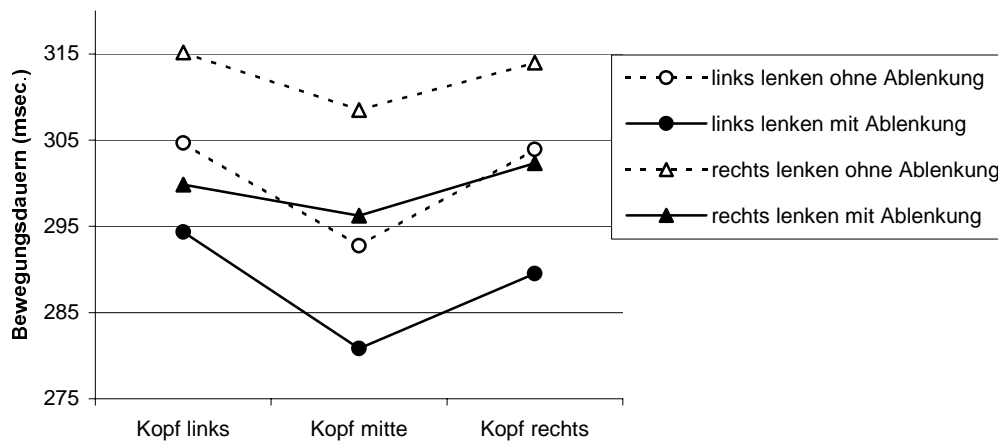


Abb. 3.6 Die Bewegungsdauern wurden durch Ablenkung kürzer.

Je später der Zeitpunkt war, desto kürzer die Bewegungsdauer $F(2,10) = 6,95 p < .01$. Der Unterschied in der Dauer der Lenkbewegungen nach rechts und nach links war 400 msec nach Ende der Kopfdrehung größer als unmittelbar und 800 msec. danach $F(2,10) = 3,50 p < .07$.

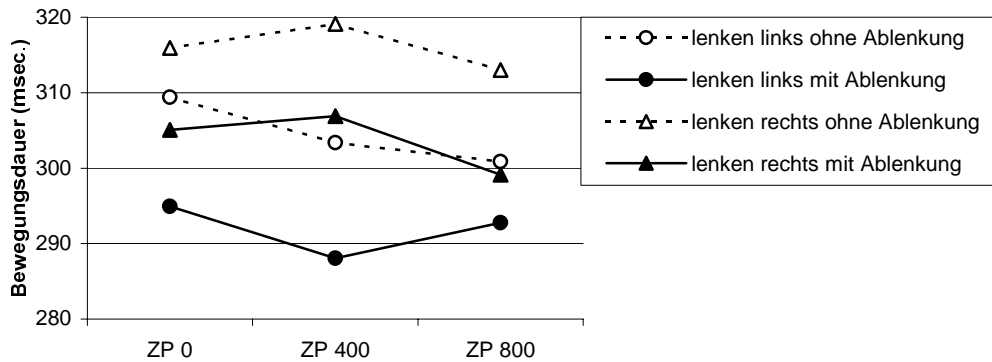


Abb. 3.7 Wie bei den Bewegungsweiten war der Unterschied bei den Dauern 400 msec. nach Ende der Kopfdrehung am größten.

3.3.5 Einfluss des Zeitpunkts

Die drei Zeitpunkte von Lenkbewegungen nach dem Ende der Kopfdrehung hatten ja den Zweck, zu überprüfen, wie sich der Einfluss der Kopfhaltung auf Reaktionszeit, Bewegungsweite und Bewegungsdauer der Lenkbewegungen im Laufe von 800 msec. verändert. Die Ergebnisse werden daher nun noch einmal in Hinblick auf diese Fragestellung beleuchtet.

Der Reizzeitpunkt hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeit ($F < 1$). Die Reaktionszeit wurde nicht kürzer oder länger, ob der Reiz für die Lenkbewegung direkt bei Ende der Kopfdrehung dargeboten wurde, oder 400 sowie 800 msec. danach. Im Gegensatz dazu wurde aber die Bewegungsdauer bei größerem Abstand zwischen Ende der Kopfbewegung und Zeitpunkt der Reizdarbietung kürzer. Dies galt für die Lenkbewegungen nach rechts und nach links nicht in gleichem Ausmaß. Der Unterschied zwischen den beiden Lenkrichtungen war 400 msec. nach Ende der Kopfdrehung größer als unmittelbar und 800 msec. danach.

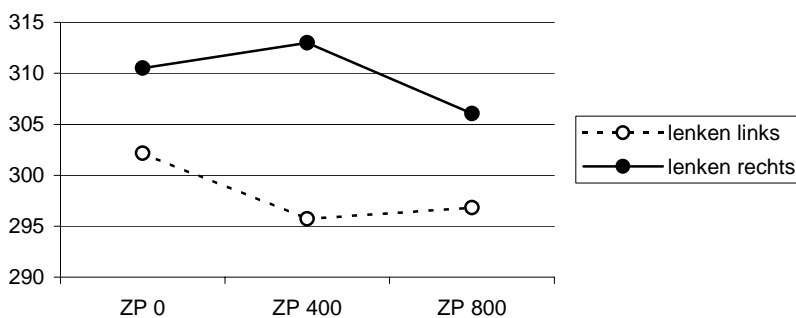


Abb. 3.8 Bewegungsdauern in msec.

Parallel zur Bewegungsdauer, war aber auch der Unterschied in den Weiten zwischen Lenkbewegungen nach links und nach rechts 400 msec nach Bewegungsende des Kopfes am größten.

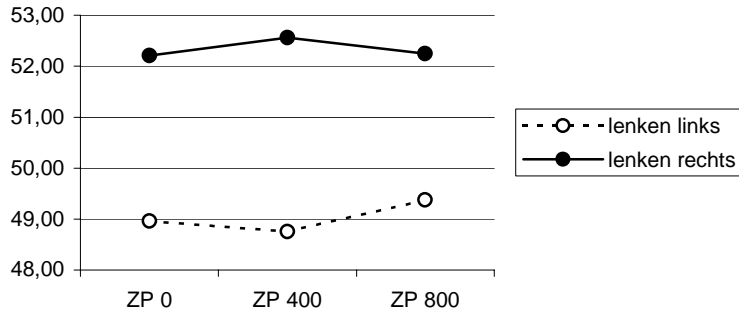


Abb. 3.9 Bewegungsweiten der Lenkbewegungen in °

Es gab also zwei Effekte des Zeitpunktes. Der erste war ein Unterschied zwischen dem Zeitpunkt von 400 msec und den beiden anderen. Zu diesem Zeitpunkt war der Unterschied zwischen Lenkbewegungen nach links und Lenkbewegungen nach rechts größer als zu den beiden anderen Zeitpunkten. Das galt für die Bewegungsweite und für die Bewegungsdauer. Der zweite Effekt war eine Verringerung der Bewegungsdauer bei späterem Zeitpunkt. Dieser Effekt galt für die Bewegungsweite nicht. Ablenkung wirkte sich auf keinen dieser Effekte aus.

3.4 Diskussion

3.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit und verkürzte die Bewegungsdauer, hatte aber keine Auswirkung auf die Weiten der Bewegungen. Die Weiten der Bewegung waren von der Kopfposition abhängig, gleichsinnige Bewegungen waren weiter als gegensinnige. Auf diesen Effekt hatte Ablenkung keinen Einfluss. Exzentrische Kopfhaltung beeinflusste auch die Reaktionszeit und verursachte kürzere Reaktionszeiten im gegensinnigen Bewegungsmuster. Auch dieser Effekt wurde durch Ablenkung nicht verändert. Einfluss der zeitlichen Position des Reizes nach Ende der Kopfdrehung zeigte sich in einer Verringerung der Bewegungsdauern bei späterem Zeitpunkt und einem größeren Unterschied zwischen Lenkbewegungen nach links und Lenkbewegungen nach rechts bei einem Zeitpunkt von 400 msec. Wie auf die beiden vorhin genannten, hatte Ablenkung auch auf diese beiden Effekte keinen Einfluss.

Eine wichtige Fragestellung dieses Experimentes war, ob sich Einflüsse von Ablenkung und von exzentrischer Kopfhaltung schon auf Vorbereitungsebene nachweisen lassen. In diesem Experiment war ganz einfach zwischen Vorbereitung und Durchführung zu unterscheiden. Einflüsse auf Vorbereitungsebene sollten sich bei der Reaktionszeit zeigen, Einflüsse auf Durchführungsebene bei Bewegungsweite und Bewegungsdauer.

3.4.2 Durch Ablenkung verlängerte Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist die Zeit zwischen dem Reiz und dem Beginn der Reaktion. In dieser Zeit muss der Reiz spezifiziert, eine Entscheidung für die richtige Bewegung getroffen und diese fertig vorbereitet worden sein. Auf welchen oder auf welche dieser Anteile sich die Ablenkung bzw. die exzentrische Kopfposition auswirkte, geht aus den Daten allerdings nicht hervor. Es ist nicht ganz auszuschließen, dass die kürzeren Reaktionen allein aufgrund bestimmter Auswirkungen von Bewegung auf die Reizidentifikation erklärt werden kann. Der folgende Abschnitt dient einer Überprüfung dieser Frage.

3.4.2.1 Erklärung durch bewegungsbedingte Wahrnehmungsbeeinträchtigung

Befunde, die für eine Beeinträchtigung der Reizspezifizierung durch gleichzeitig ausgeführte Bewegungen sprechen, stammen aus Experimenten, in denen ein Signal während der Ausführung einer Bewegung entdeckt werden musste (z.B. Müsseler, Steininger & Würh 2001).

Als Cue diente ein weißes oder schwarzes Kästchen am Bildschirm. Die Probanden bereiteten daraufhin zwei Bewegungen vor. In jedem Fall eine Reaktion mit beiden Händen gleichzeitig (Doppeldruck) und so schnell wie möglich darauf folgend eine Reaktion mit jener Hand, die dem vorangegangenen Cue entsprach. Während der Ausführung des Doppeldrucks erschien für eine Dauer von ca. 25 msec ein Pfeil nach links oder nach rechts. Unmittelbar nach dem Tastendruck der einzelnen Hand wurde der Abfragebildschirm dargeboten. Die Probanden hatten da die Aufgabe, mit der Maus jenen Pfeil anzuklicken, den sie vorher gesehen hatten. Die Fehlerrate der kompatiblen Reize war höher als jene der inkompatiblen. Kompatibel heißt in diesem Zusammenhang, dass der Pfeil nach rechts zeigte, wenn die der Doppelbewegung folgende Einzelreaktion auch nach rechts ausgeführt wurde.

Bei dieser Versuchsanordnung ist allerdings nicht unterscheidbar, ob die Vorbereitung oder die Ausführung einer Bewegung die Wahrnehmung in die gleiche Seite hemmte. Eine Wahrnehmungshemmung auf Vorbereitungsebene wäre nur dann anzunehmen, wenn die

zweite Bewegung als eigenständige Bewegung, getrennt von der ersten angesehen wird. Aufgrund des relativ kurzen Abstandes zwischen dem Doppeldruck und dem Einzeldruck von ca. 180 msec scheint es aber eher so zu sein, dass beide Bewegungen vorbereitet und dann möglichst schnell hintereinander ausgeführt werden. Es dürfte sich also eher um Auswirkungen während der Durchführung einer Bewegung handeln. Während der Ausführung einer Bewegung nach rechts scheint demnach die Wahrnehmung eines nach rechts deutenden Pfeils beeinträchtigt zu sein.

Zwei Annahmen müssten zutreffen, um dieses Ergebnis auf unser Experiment anwenden zu können und damit kürzere Reaktionszeiten des gegensinnigen Bewegungsmusters zu erklären. Erstens müsste die Wahrnehmung eines Tones im rechten bzw. linken Ohr ähnlich gehemmt sein, wie die Wahrnehmung eines Pfeils, der nach rechts oder links zeigt. Und zweitens müsste eine exzentrische Kopfposition gleiche Auswirkung auf die Wahrnehmung haben wie ein schneller Tastendruck mit einem Finger. Wie wahrscheinlich ein Zutreffen dieser beiden Annahmen ist, ist derzeit nicht klar. Es scheint aber eher unwahrscheinlich, dass die Verkürzung der Reaktionszeit allein auf diesen Effekt zurückgeführt werden kann. Auch dass dieser Effekt durch Ablenkung nicht verändert wurde spricht eher für die schon bei der Darstellung der Ergebnisse beschriebene Interpretation durch Beteiligung des Reflexes im Sinne einer Voraktivierung oder parametrischer Kopplung der Lenkbewegung mit der Rückkehrbewegung des Kopfes.

3.4.2.2 Interpretation im Sinne von Voraktivierung

Die in der Einleitung dieses Experimentes vorgestellten Ergebnisse von Voraktivierung auf Reaktionszeit und –kraft lassen konkrete Hypothesen zu den gemessenen Variablen zu. Das Grundprinzip ist kürzere Reaktionszeit und kleinerer Krafteinsatz bei höherer Voraktivierung. Wenn der tonische Halsreflex bei exzentrischer Kopfposition Voraktivierung auslöst, sollte sich das in kürzeren Reaktionszeiten, kleineren Amplituden und/oder längeren Bewegungsdauern im gegensinnigen Bewegungsmuster zeigen.

Von den drei erwarteten Ergebnissen traf nur eines zu, nämlich die kürzere Reaktionszeit. Die Bewegungsdauern waren zwar grundsätzlich bei exzentrischer Kopfposition länger als bei gerade gehaltenem Kopf, dieser Effekt war aber nicht richtungsabhängig. Die Bewegungsweiten waren im gegensinnigen Bewegungsmuster genau so weit wie bei gerade gehaltenem Kopf, hingegen im gleichsinnigen Bewegungsmuster weiter. Eine Interpretation aus der Sicht des von Mattes, Ulrich & Miller (1997) abgewandelten motor readiness models (Näätänen, 1971) galt in unserem Experiment nur für die Reaktionszeit, also für die Vorbereitung der Lenkbewegungen. Um die längeren Bewegungsdauern bei exzentrischer Kopfposition mit dem Modell erklären zu können, müsste eine richtungs-unspezifische Voraktivierung angenommen werden. Aus unserem Wissen ist das mit dem Reflex aber nicht vereinbar. Die weiteren Amplituden im gleichsinnigen Bewegungsmuster sind mit dem Reflex definitiv nicht erklärbar.

3.4.3 Durch Ablenkung verkürzte Bewegungszeiten

Wenn man kürzere Bewegungszeit bei gleichen Bewegungsweiten als Maß für höheren Krafteinsatz gelten lässt, lassen sich die durch Ablenkung verkürzten Bewegungsdauern aber im Sinne der Erweiterung des Näätänen'schen „motor readiness“ von Mattes, Ulrich & Miller (1997) interpretieren: Durch Ablenkung könnte die Vorbereitung der Bewegung auf niedrigerem Grundniveau gehalten werden. Die zur Bewegungsauslösung dann noch nötige Zusatzaktivierung müsste entsprechend höher sein und könnte zu dem größeren Überschießen geführt haben, wie es auch in den Experimenten von Mattes, Ulrich & Miller (1997) der Fall war. Dass grundsätzlich eine Richtungs-unspezifische Voraktivierung vorhanden war lässt sich nur vermuten. Es ist aber insofern naheliegend, als die Probanden ja wussten, dass eine

Lenkbewegung folgen würde. Sie wussten nur noch nicht, in welche Richtung und zu welchem genauen Zeitpunkt. Dieses Erklärungsmuster erklärt sowohl die längeren Reaktionszeiten als auch die kürzeren Bewegungszeiten. Die Bewegungszeiten sind aber an sich ein sehr unsicheres Maß für die eingesetzte Kraft. Daher ist dieses Erklärungsmuster nur als Idee und nicht als Beweis zu bewerten.

Die gleiche Veränderung der Bewegungszeit müsste dann aber, entsprechend diesem Modell, auch durch die unterschiedlichen Kopfpositionen bewirkt werden. Die Reaktionszeiten waren ja kürzer, wenn die Lenkbewegung in die der Kopfposition entgegengesetzten Richtung ausgeführt worden waren. Die Bewegungszeiten waren aber nicht länger sondern völlig unabhängig von der Kopfposition. Aber die Bewegungsweiten waren im gegensinnigen Bewegungsmuster kürzer. Kürzere Bewegungsweite bei gleicher Bewegungsdauer könnte aber ebenso als Beleg für niedrigere Kraft angesehen werden wie kürzere längere Bewegungsdauer bei gleich weiter Bewegung. Dies könnte als weiterer Beleg dafür dienen, dass es sich bei den verkürzten Reaktionszeiten bei gegensinnigem Bewegungsmuster tatsächlich um ein Phänomen der Voraktivierung gehandelt hat.

3.4.4 Fehlende Interaktionen

Außer dem deutlichen Haupteffekt auf Reaktionszeit und Bewegungsdauer hatte Ablenkung in diesem Experiment relativ wenig Einfluss. Keine einzige Interaktion mit Ablenkung wurde signifikant. Dies kann verschiedene Gründe haben. Zum einen könnte das an der Art der Ablenkungsaufgabe gelegen haben. Möglicherweise gelang es den Probanden, die Rechenaufgabe kurzfristig zu unterbrechen, wenn sie die Lenkbewegungen ausführten. Dann veränderten Sie die Zweitaufgabe von einer aktiven Rechenaufgabe zu einer passiven Speicheraufgabe und hatten so die Möglichkeit, rechnen und lenken abwechselnd anstatt gleichzeitig durchzuführen. Das war zwar aus der Sichtweise des Experimentators unbeabsichtigt und unerfreulich, aber aus der Sichtweise der Probanden durchaus zielführend. Trotz dieser aufgabenerleichternden Strategie verblieb ein Rest an Aufmerksamkeitsbedarf für das Merken der Zahl der sich ja in der grundsätzlichen Verlängerung der Reaktionszeit zeigte. Die Ablenkungsaufgabe wurde dadurch aber vielleicht soweit vereinfacht, dass sich Auswirkungen auf tiefere Steueranteile nicht mehr zeigte.

Zum anderen könnten die fehlenden Interaktionen mit Ablenkung aber auch daher rühren, dass bei der Vorbereitung und Durchführung von diskreten Lenkbewegungen in der untersuchten Situation tatsächlich von Ablenkung weitgehend unabhängige Steuermechanismen tätig waren. Dies würde die schon aufgrund der Ergebnisse des ersten Experimentes formulierte Vermutung, dass an der Steuerung von willkürlichen Bewegungen von Ablenkung abhängige und von Ablenkung nicht abhängige Mechanismen weitgehend unabhängig nebeneinander wirkten, erhärten.

3.5 Zusammenfassung

Die grundsätzliche Frage des zweiten Experimentes, ob sich exzentrische Kopfhaltungen auf bestimmte Parameter der Vorbereitung kurzer, schneller Lenkbewegungen auswirken, kann mit „Ja“ beantwortet werden. Die Reaktionszeit war im gegensinnigen Bewegungsmuster kürzer. Diese Verkürzung kann auf zweierlei Art erklärt werden. Entweder war dafür parametrische Kopplung mit der Vorbereitung der Rückkehrbewegung des Kopfes verantwortlich oder eine Voraktivierung durch Einflüsse des tonischen Halsreflexes.

Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit und verkürzte die Bewegungsdauer, was mit dem durch Mattes, Ulrich & Miller (1997) erweiterten „motor readiness modell“ (Näätänen, 1971; Niemi & Näätänen, 1981) in Einklang steht.

Ablenkung veränderte aber den Einfluss der Kopfposition nicht. Das erhärtet die Idee von nach dem Grad der Abhängigkeit von Ablenkung unterscheidbaren Funktionseinheiten bei der Steuerung von Bewegung.

4 Zweihandkoordination

4.1 Einleitung

Ein nicht unbeträchtlicher Anteil psychologischer Forschung zur Steuerung von Bewegung bezieht sich auf die Koordination der beiden Hände (Überblick z.B. bei Swinnen, Heuer, Massion & Casaer, 1994; Heuer, 1995). So liegen in diesem Bereich der Koordination einige über Jahre hinweg gesammelte und in vielen Experimenten bestätigte Ergebnisse vor. Ein solches Ergebnis ist die homologe Kopplung der beiden Hände. Bewegungen sind einfacher durchzuführen, wenn bei beiden Händen die gleichen Muskeln in die gleiche Richtung gleichzeitig aktiv sind. Als Rechtshänder mit der linken Hand seinen eigenen Namen in Spiegelschrift zu schreiben ist an sich eine sehr schwierige Aufgabe. Sie gelingt jedoch spielend leicht, wenn man gleichzeitig mit der rechten in normaler Schrift schreibt (vgl. Jung & Fach, 1984).

Diese homologe Kopplung der beiden Hände betrifft sowohl räumliche als auch zeitliche Merkmale der Bewegungssteuerung und wurde bei periodischen und bei diskreten Bewegungen vielfach untersucht (z.B. Kelso, Putnam & Goodman, 1983, Viviani et al, 1998, Heuer et al 1998, Heuer et al 2000). Die Mehrzahl der Experimente untersuchte periodische Bewegungen. Das lag daran, dass sie durch den theoretischen Rahmen der dynamischen Modelle angeregt worden waren. Aber in einigen Experimenten wurde homologe Kopplung auch in Wahlreaktionsaufgaben untersucht (Heuer et al 1998, Spijkers et al (2000). Die Effekte der Vorbereitung unterschiedlich weiter Bewegungen auf Reaktionszeit, Bewegungsweite und Fehlerhäufigkeit können durch das Modell der parametrischen Kopplung (Heuer, 1993) erklärt werden.

Bei diskreten Bewegungen, wie sie in Wahlreaktionsaufgaben untersucht werden, lässt sich gut zwischen Vorbereitung und Durchführung der Bewegung unterscheiden. Die homologe Kopplung scheint auf beiden Ebenen stattzufinden. Auf Vorbereitungsebene konnte sie noch weiter zeitlich eingegrenzt und als Hypothese der transienten Kopplung formuliert werden (Heuer, 1986, Heuer, 1993, Spijkers et al, 2000). Darunter ist ein transients, wechselseitiger Einfluss der Programmierung der einen Handbewegung auf die Programmierung der anderen Handbewegung zu verstehen. Wenn genügend Zeit zur Vorbereitung vorhanden ist, besteht bis zu einem gewissen Grad die Möglichkeit, die beiden Bewegungen zu entkoppeln. Die Hypothese der transienten Kopplung wird im nächsten Abschnitt noch näher erläutert.

Die Idee des dritten Experimentes dieser Arbeit war, diese Entkopplung durch Ablenkung zu erschweren. Mit kognitiver Zusatztätigkeit sollte es gelingen, den Zeitpunkt der Entkopplung hinauszuzögern. Die Probanden führten mit beiden Händen gleichzeitig kurze, schnelle Umkehrbewegungen in horizontaler Ebene aus. Die Bewegungsweiten konnten kurz oder weit sein, woraus sich für beide Hände zusammen die vier Kombinationen kurz-kurz, kurz-weit, weit-kurz und weit-weit ergaben. Diese Weiten wurden als verschieden große Balken am Bildschirm vor der Bewegungsausführung dargeboten. Die Bewegungen wurden aber erst auf ein akustisches GO - Signal hin ausgeführt. Die Zeit zwischen der Darbietung der Balken und dem GO - Signal variierte zwischen 250 und 1250 msec. Gemessen wurde die Reaktionszeit als Vorbereitungsparameter sowie Bewegungsdauer und Bewegungsweite als Durchführungsparameter.

Die Ablenkaufgabe war eine Merkaufgabe in zwei unterschiedlichen Schwierigkeitsstufen (vgl. Sternberg, 1978, 1979). Vor der Darbietung der Balken wurden eine oder fünf Ziffern dargeboten. Nach der Handbewegung mussten die Probanden entscheiden, ob eine einzeln dargebotene Ziffer eine der bzw. der einen, vor der Bewegung dargebotenen, Ziffern entsprach oder nicht.

Vor der Beschreibung der Versuchsdurchführung im Einzelnen wird aber nun die Hypothese der transienten Kopplung erklärt.

4.1.1 Die Hypothese der transienten Kopplung

Werden mit den beiden Händen unterschiedlich weite Bewegungen ausgeführt, passen sich die Bewegungsweiten der beiden Bewegungen aneinander an. Ebenso wird, wenn es sich um eine Wahlreaktionsaufgabe handelt, die Reaktionszeit länger, wenn zwei unterschiedlich weite Bewegungen ausgeführt werden müssen als bei zwei gleich weiten. Wenn aber zwischen Darbietung des Stimulus und einem Go-Signal genügend Zeit eingeräumt wird, um die unterschiedlichen Bewegungsweiten vorzubereiten, verschwindet der Weiteneffekt vollständig und der Reaktionszeiteffekt nahezu. Dieser Effekt wird als transiente Kopplung bezeichnet (Spijkers et al., 1997, Heuer et al. 1998). Darunter ist ein vorübergehender Kopplungseffekt während der Vorbereitung der Bewegungen zu verstehen. Genauer besagt diese Hypothese, „dass es nicht der Status der Programmierung der einen Bewegung ist, der die Programmierung der anderen Bewegung beeinflusst, sondern die Veränderung des Status. Dadurch lässt sich Kopplung nur solange beobachten, solange sich die Bewegungen in Vorbereitung befinden. Sobald die Programmierung abgeschlossen ist, verschwindet auch das Überspiel von einer zur anderen Hand. Kopplung auf motorischer Ebene wird als wechselseitiger, hemmender Einfluss des Spezifizierungsprozesses der einen Hand auf den Spezifizierungsprozess der anderen Hand gesehen. Diese hemmenden, aber zeitlich begrenzten, wechselseitigen Einflüsse verlangsamen die Spezifizierungsprozesse jeder Hand und führen so bei unterschiedlichen Bewegungen zu längeren Reaktionszeiten als bei gleichen Bewegungen der Hände“ (Spijkers et al., 1997 s.209, Übersetzung vom Verfasser).

Diese Hypothese wurde in verschiedenen experimentellen Anordnungen zu bimanueller Koordination überprüft und bestätigt. In einem timed –response Paradigma konnte die Auswirkung transienter Kopplung auf unterschiedliche Bewegungsweiten nachgewiesen werden (Heuer et al. 1998). Vier Töne wurden mit je 500 msec. Abstand dargeboten. Jeder Ton war 20 msec lang und, beginnend bei 1000 Hz, um 333 Hz höher als der vorhergehende. Gleichzeitig mit dem vierten Ton, sollte mit beiden Händen gleichzeitig eine schnelle Handbewegung in unterschiedlicher Weite ausgeführt werden. Die Probanden waren angewiesen, solange mittelweite Bewegungen vorzubereiten, bis die tatsächlich auszuführende Weite der Bewegung jeder Hand mittels unterschiedlich langer Balken am Bildschirm angezeigt wurde. Die Zeit zwischen Darbietung der Balken und dem vierten Ton variierte zwischen 0 und 1000 msec.

Mit diesem Paradigma konnte einerseits gezeigt werden, dass die Spezifizierung von Bewegungsweiten ein kontinuierlicher Prozess ist, der je nach Bewegungsweite zwischen 125 und 325 msec dauert und andererseits, dass bei kurzen SOAs von 0 bis 250 msec ein Überspiel von einer Hand zur anderen die Bewegungsweiten beeinflusste, das bei längeren SOAs nicht mehr auftrat. Dieses Überspiel zeigte sich in einer Anpassung der Bewegungsweiten. Es war allerdings insofern asymmetrisch, als dass eine Verkürzung der langen Bewegungen bei gleichzeitig ausgeführter kurzer Bewegung nur bei den kurzen SOAs bis 250 msec. auftrat, eine Verlängerung der kurzen Bewegungen bei gleichzeitiger Ausführung einer langen Bewegung aber auch bei längeren SOAs.

Die Hypothese der transienten Kopplung lässt sich auch mit Reaktionszeitexperimenten überprüfen. In einer overlapping-Task, bei der die Probanden die Bewegungen beider Hände kurz hintereinander ausführten, konnten Spijkers et al (2000) zeigen, dass die Reaktionszeit der zweiten Hand bei gleich weiten Bewegungen der beiden Hände kürzer als bei unterschiedlich weiten war. Dieser Effekt verschwand bei genügend langer Vorbereitungszeit.

Dieser Befund stimmt mit den Ergebnissen eines früheren Experimentes überein (Spijkers et al, 1997, 2. Experiment). Da dieses Experiment die Grundlage meines dritten Experimentes war wird es im folgenden etwas ausführlicher beschrieben.

Nach einem Warn-Ton wurden auf dem Bildschirm zwei horizontal angeordnete Balken dargeboten. Diese waren kurz oder lang. Ausgelöst durch einen akustischen Startreiz sollten die Vpn mit beiden Händen gleichzeitig der Länge der Balken entsprechende kurze oder weite Handbewegungen ausführen. Bei unterschiedlicher Kombination der Hände ergaben sich so die vier Möglichkeiten kurz-kurz, kurz-lang, lang-kurz und lang-lang. Die Handbewegungen wurden mit je einer Maus auf Grafiktablets von innen nach außen durchgeführt (siehe Abb. 0.1). Der zeitliche Abstand zwischen Darbietung der Balken und dem Start-Ton variierte in sieben Abstufungen zwischen 0 und 1000 msec.

Längere SOAs gingen mit einer Verkürzung der Reaktionszeit einher. Bei längeren SOAs war zudem der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen kleiner, ohne jedoch ganz zu verschwinden. Bei den Amplituden der Bewegungen trat die übliche Asymmetrie auf: Die kürzeren Bewegungen waren tendenziell von den weiten eher beeinflusst als die weiten von den kurzen. Die kurzen Bewegungen wurden weiter, wenn gleichzeitig mit der anderen Hand weite Bewegungen durchgeführt wurden. Die weiten Bewegungen wurden jedoch nicht kürzer, wenn gleichzeitig kurze Bewegungen ausgeführt wurden. Allerdings zeigte sich diese Asymmetrie nur in durchschnittlich weiteren Amplituden bei ungleichen Bewegungsweiten. Die entsprechende Interaktion wurde im Gegensatz zum ersten Experiment der selben Studie (Spijkers et al, 1997, 1. Experiment) nicht signifikant. Die Bewegungszeiten waren bei kurzen Bewegungen kürzer als bei langen. Bei unterschiedlich weiten Bewegungen passten sich die Bewegungszeiten aneinander an, waren aber insgesamt länger als bei gleich weiten Bewegungen.

Aus den bisher berichteten Experimenten zu transienten Aspekten parametrischer Kopplung bei bimanuellen Bewegungen lassen sich einige mehrfach eingetroffene Ergebnisse festhalten. Erstens gibt es Kopplung auf Vorbereitungsebene was sich in längeren Reaktionszeiten bei unterschiedlich weiten Bewegungen zeigt. Zweitens gibt es transiente Anteile, die sich in einer Verringerung der Unterschiede zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen widerspiegeln. Und drittens scheint es aber auch nicht-transiente Anteile zu geben, die für einen verbleibenden Rest an Unterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen auch bei längeren SOAs verantwortlich gemacht werden können.

4.1.2 Fragestellung: Die Hypothese der verzögerten Entkopplung

Die Idee dieses Experimentes war, die Zeit der Vorbereitung einer bimanuellen Bewegung durch eine Zweitaufgabe zusätzlich zu belasten und dadurch den Zeitpunkt der vollständigen Entkopplung zu verzögern. Ob das so eintreten würde, war allerdings nach den Ergebnissen der ersten beiden Experimente fraglich. Diese deuteten eher darauf hin, dass parametrische Kopplung von Ablenkung weitgehend unabhängig zu sein scheint.

4.2 Versuchsdarstellung

4.2.1 Versuchspersonen

An dem Experiment nahmen 7 weibliche und 5 männliche Probanden im Alter von 18 bis 28 Jahren teil (Durchschnitt: 23.3 J.). Alle Probanden waren rechtshändig (Eigenauskunft) und bekamen 40.- DM für die Teilnahme am Experiment.

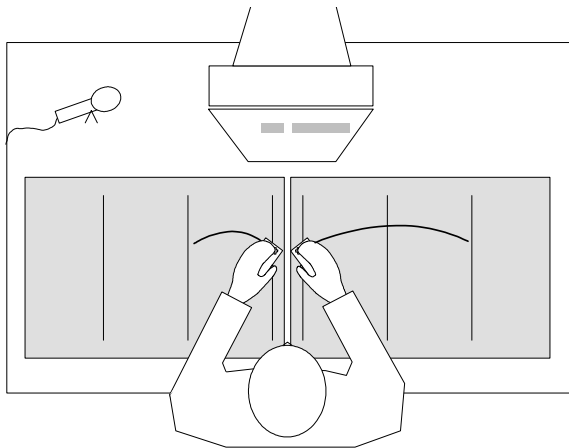


Abb. 4.1 Versuchsanordnung. Die gebogenen Linien entsprechen der Bewegungsbahn. In dem skizzierten Durchgang ist eine kurz-lang Bewegung auszuführen.

4.2.2 Versuchsaufbau und Aufgabe

Die Erstaufgabe war eine bimanuelle Wahlreaktionsaufgabe. Mit beiden Händen mussten gleichzeitig kleine (10 cm) oder große (20 cm) horizontale Bewegungen mit einer Maus auf zwei Grafiktablets ausgeführt werden. Die Bewegungen konnten gleich (klein-klein, groß-groß) oder unterschiedlich (klein-groß, groß-klein) weit sein. Als Hinweisreiz dienten für jede Hand ein Balken am Bildschirm (60*7 mm für die langen und 30*7 mm für die kurzen Bewegungen). Die Balken waren gelb auf blauem Hintergrund. Die Ausgangsposition sowie die beiden Zielpositionen waren als senkrechte Striche auf den Grafiktablets markiert. Der Auslösereiz war ein Ton (1333 Hz, 100 ms Dauer), der 250, 500, 750, 1000 oder 1250 msec, nach Erscheinen der Balken erklang. Die Probanden wurden instruiert, die Bewegungen nach diesem Ton möglichst schnell und nur ungefähr bis zum entsprechenden Strich auszuführen.

Zur Ablenkung wurde in diesem Experiment eine Merkaufgabe durchgeführt (vgl. Sternberg, 1975). Vor jeder Bewegungsaufgabe wurden eine oder fünf Ziffern nebeneinander für die Dauer von 500 msec. dargeboten. Die Probanden waren instruiert, sich die dargebotenen Ziffern möglichst gut zu merken. Nach der Bewegungsaufgabe wurde eine einzelne Ziffer dargeboten. Die Probanden sollten möglichst schnell mit „ja“ antworten, wenn sie meinten, diese Zahl wäre bei den erst dargebotenen dabei gewesen bzw. es wäre die einzeln vor der Bewegungsaufgabe gezeigte gewesen und mit „nein“, wenn sie meinten, das wäre nicht der Fall gewesen. Die Reaktionszeit der Sternbergaufgabe wurde anhand eines geräuschempfindlichen Schalters gemessen. Die von den Probanden laut ausgesprochene Antwort wurde mit einem automatischen Spracherkennungssystem (Dragon Dictate) identifiziert.

Nach Erkennung der Antwort durch das Spracherkennungssystem wurde die Richtigkeit der Antwort („Ja ist richtig“, ...) sowie die Reaktionszeit der Bewegungen für jede Hand in Form von Balken rückgemeldet. Je länger der Balken war, desto länger war die Reaktionszeit gewesen. Der nächste Versuchsdurchgang begann, wenn die beiden Hände wieder in der Ausgangsposition waren.

4.2.3 Zeitablauf eines Versuchsdurchganges

Der Zeitablauf eines Versuchsdurchganges ist in Abb. 4.2 schematisch dargestellt. Jeder Versuchsdurchgang begann mit der Darstellung der Ziffern-Vorgabe am Bildschirm. Diese wurde nach 500 msec. wieder ausgeblendet. Nach einer kurzen Pause von 300 msec. erschienen als Precue die Balken, die am Bildschirm bis zum Beginn der Reaktion sichtbar

blieben. Von Beginn der Darstellung der Balken bis zum Ertönen des Reaktionssignals dauerte es zwischen 250 und 1250 msec (=SOA). Darauf hin sollten die Probanden möglichst schnell die weiter oben schon beschriebene Bewegungsaufgabe durchführen. 800 msec. nach Bewegungsbeginn wurde die Sternbergabfrage eingeblendet, die bis zur Sternbergantwort sichtbar blieb. Ca. 500 msec nach erfolgter Antwort (dieser Zeitabstand war manchmal durch Verzögerte Erkennungsleistung des Spracherkennungssystems etwas verlängert) wurden die Richtigkeit der Sternbergantwort sowie die Reaktionszeit der Bewegungen rückgemeldet. Die Pause bis zum nächsten Versuchsdurchgang war nicht fest vorgegeben. Um den nächsten Durchgang zu beginnen, mussten die Probanden die beiden Mäuse auf der Startlinie platzieren. Sobald dies erreicht war, dauerte es noch eine Sekunde bevor der nächste Durchgang mit der Darbietung der Sternbergaufgabe begann.

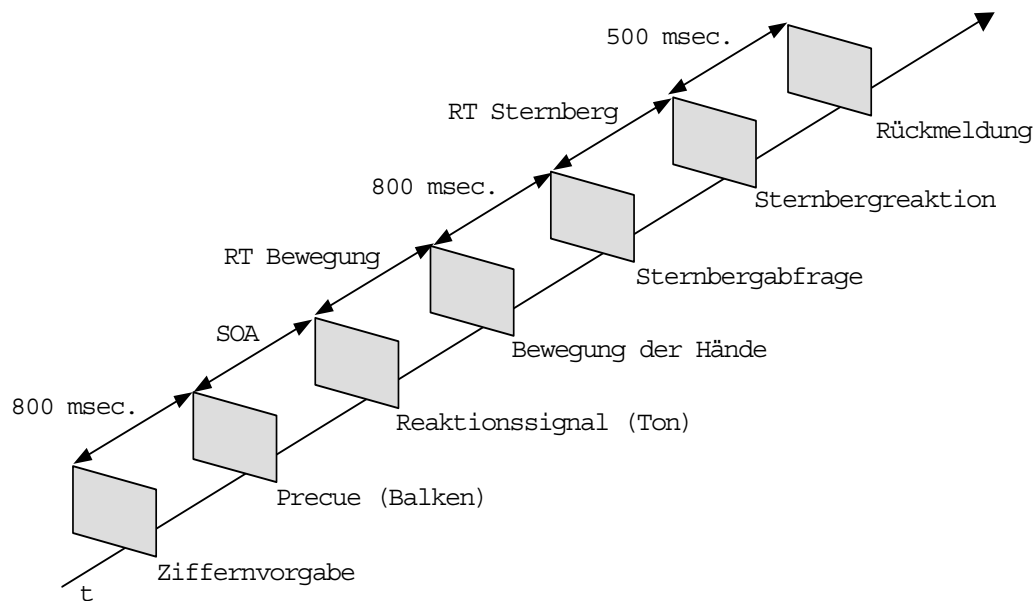


Abb. 4.2 Schematische Darstellung des Ablaufs eines Versuchsdurchganges

4.2.4 Reihenfolge der Blöcke

Zum Kennenlernen der Bewegungsaufgabe wurde ein erster Block mit 20 Durchgängen durchgeführt. Die Ablenkaufgabe konnte in einem weiteren Übungsblock kennen gelernt werden. Von den zwölf zur Auswertung herangezogenen Blöcken waren der erste und der letzte jeweils ein Block ohne Ablenkaufgabe mit 20 Durchgängen. In jedem der zehn Versuchsblöcke wurden 64 Einzelbewegungen durchgeführt. Die Abfolge aller Bedingungen war zufällig über alle Versuchsblöcke verteilt.

4.2.5 Messung

Die Handbewegungen wurden mit Grafiktablets (Summasketch II, 46*31 cm) aufgezeichnet. Die räumliche Auflösung war 0.454 mm, die Samplingfrequenz ca. 115 Hz. In die Berechnung der Bewegungsweiten wurden nur die x-Koordinaten einbezogen. Die Bewegungssignale wurden tiefpassgefiltert (Butterworth, 4. Ordnung, 10 Hz Grenzfrequenz). Da die Samplingfrequenzen der Grafiktablets zwischen 100 und 130 Hz schwankten, wurden die Signale in einem zweiten Schritt linear interpoliert und auf eine gleichmäßige Samplingfrequenz von 125 Hz approximiert.

Bewegungen mit Reaktionszeiten unter 80 ms wurden nicht aufgezeichnet und zu einem zufälligen späteren Zeitpunkt wiederholt. Bewegungen mit einer Reaktionszeit über 1200 ms wurden ebenfalls nicht in die Datenanalyse einbezogen.

Die Antwortzeiten der Merkaufgabe wurden mit einem sprachgesteuerten Schalter erfasst (Eigenanfertigung des IfADo). Die Richtigkeit der Antwort wurde mit dem Spracherkennungssystem Dragon-Dictate xc11 überprüft. Da dieses System die Antwort nicht immer richtig identifizierte, konnte der Versuchsleiter im Zweifelsfalle „ja“ oder „nein“ per Tastatur eingeben. Dies war aber im Verlauf des gesamten Experimentes nur drei mal nötig. In diesen Fällen hatte das Spracherkennungssystem die Antwort nicht identifiziert.

4.2.6 Kennwerte

Der Bewegungsbeginn war als der erste von vier direkt aufeinander folgenden Datenpunkten mit steigender Amplitude definiert. Das Bewegungsende war gegeben, wenn die Steigung der Geraden durch den aktuellen Punkt und den um 10 Datenpunkte davor liegenden weniger als 5° betrug.

Der Kennwert Reaktionszeit war die Zeit von Beginn des Reaktionssignals bis zum Bewegungsbeginn, der Kennwert Bewegungsdauer die Zeit von Bewegungsbeginn bis zum Umkehrpunkt. Die Bewegungsdauer war also nicht die gesamte Hin- und Rückbewegung sondern nur die Bewegung bis zum Umkehrpunkt. Die Bewegungsweite war der absolute Unterschied zwischen Bewegungsbeginn und Bewegungsende auf der X-Achse (seitliche Richtung). Krümmungen der Bewegungsbahn sowie Abweichungen auf der Y-Koordinate (Vor- bzw. Rück-Bewegungen) gingen nicht in die Berechnung ein.

4.2.7 Design

Die Kennwerte Reaktionszeit, Bewegungsweite und Bewegungszeit wurden wie bei Experiment zwei aus den gemessenen Datenpunkten berechnet und mit einer $5 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ Varianzanalyse mit Messwiederholung ausgewertet. Von den fünf Faktoren war nur der Faktor „SOA“ mit den Stufen „SOA 250“, „SOA 500“, „SOA 750“, „SOA 1000“ und „SOA 1250“ msec. fünfstufig. Alle anderen Faktoren waren zweistufig. Der Faktor „Bewegungsweite“ hatte die beiden Stufen „kurz“ und „lang“, das „Bewegungsmuster“ „gleich lang“ und „ungleich lang“, die „Ablenkung“ „ohne“ und „mit“ und die „Hand“ „links“ und „rechts“. Zur Analyse der Reaktionszeit der Sternbergaufgabe wurde statt des Faktors „Hand“ der zweistufige Faktor „Antwort“ mit den Ausprägungen „ja“ und „nein“ berechnet, wobei nur richtige Antworten in die Messung eingingen.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Sternbergaufgabe

Die Antwortzeit war bei fünf dargebotenen Ziffern länger als bei einer $F(1,11)=43.35$ $p<.01$, was als Nachweis für die unterschiedliche Schwierigkeit der beiden Bedingungen angesehen werden kann. Ein Nachweis für höhere kognitive Belastung während der Bewegungsdurchführung war damit aber noch nicht erbracht, denn die längere Antwortzeit könnte allein mit einem aufwendigeren Abrufprozess zum Zeitpunkt der Antwort erklärt werden. Ob es tatsächlich mehr kognitiven Aufwand bedurfte, fünf Ziffern im Gedächtnis zu behalten als nur eine, konnte nur indirekt über Veränderungen der Bewegungsmerkmale festgestellt werden.

Die Antwortzeit war bei Ja-Antworten um 43.54 msec. kürzer als bei Nein-Antworten $F(1,11)=5.84$; $p<.034$, was bei dieser Art von Aufgaben üblich ist (Sternberg, 1978, 1979). Dieser Unterschied kann auf unterschiedliche kognitive Vorgänge beim Abrufen der gemerkten Ziffern zurückgeführt werden. Da die Probanden zum Zeitpunkt der Bewegungsausführung die Antwort noch nicht kannten, sollte deren Ausprägung sowie Richtigkeit keine Auswirkung auf die Bewegungsaufgabe haben. Die Ablenkungsaufgabe bestand darin, sich die vorgegebenen Ziffern zu merken. Daher schien es nicht sinnvoll, die

unterschiedlichen Antworten bei der Analyse der Kennwerte der Bewegungsaufgabe zu berücksichtigen.

4.3.2 Allgemeine Beschreibung der Daten

Zu kurze oder zu lange Reaktionszeiten oder falsche Reaktionen wurden während der Durchführung wiederholt. Von 15360 theoretisch durchzuführenden Einzelbewegungen wurden dennoch 8.3%, das waren 1285 Bewegungen von weiterer Berechnung ausgeschlossen. Dieser Ausfall erklärt sich durch Datenverlust ganzer Blöcke einiger Probanden. Da die ausgefallenen Blöcke aber insgesamt über die Versuchsbedingungen balanciert waren und auch nie alle Blöcke eines Probanden einer Bedingung ausfielen, wurden die verbliebenen Blöcke des betreffenden Probanden dennoch mit in die Berechnung aufgenommen.

4.3.3 Reaktionszeit

Nach der Hypothese der verzögerten Entkopplung sollte der Reaktionszeitunterschied zwischen den gleich weiten und den ungleich weiten Bewegungen mit Ablenkung erst bei längeren SOAs kleiner werden als ohne Ablenkung. Dies sollte sich in einer dreifachen Interaktion von SOA, Ablenkung und Bewegungsmuster widerspiegeln. Statistisch verfehlte diese Interaktion die Signifikanzgrenze $F(4,8) = 1.75$ $p < .231$. Die Hypothese der verzögerten Entkopplung konnte nicht bestätigt werden.

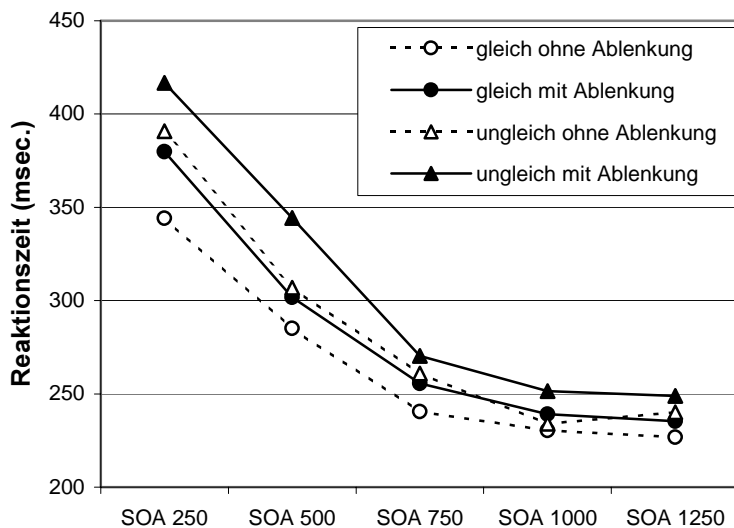


Abb. 4.3 Ohne Ablenkung ist der Unterschied bei 500 msec. SOA schon deutlich kleiner, mit Ablenkung aber erst bei 750 msec SOA.

Aus Abb. 4.3 geht aber hervor, dass die Vorhersage einer verzögerten Entkopplung nicht ganz unbegründet war. Ohne Ablenkung war der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und ungleich weiten Bewegungen bei einem SOA von 500 msec schon deutlich kleiner als bei einem SOA von 250 msec. Mit Ablenkung trat diese Verkleinerung des Reaktionszeitunterschiedes erst bei einem SOA von 750 msec auf (siehe dazu Tab. 1). Aber auch eine post Hoc Analyse der einzelnen SOAs konnte dieses Ergebnis nicht absichern sondern nur tendenziell bestätigen. Bei 500 msec SOA verfehlte die Interaktion von Bewegungsmuster und Ablenkung die Signifikanzgrenze mit $F(1,11) = 4.16$ $p < .066$ nur knapp, bei den beiden anderen SOAs aber ganz deutlich $F < 1$. Tabelle 1 zeigt die Reaktionsunterschiede zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen. Bei

einem SOA von 500 msec. ist der Unterschied zwischen Durchgängen mit und ohne Ablenkung am größten.

SOA	250	500	750	1000	1250
ohne Ablenkung	47	22	20	4	13
mit Ablenkung	37	43	15	12	14

Tab. 1 Reaktionszeitunterschiede zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen in msec.

Die weiteren Ergebnisse des Kennwertes Reaktionszeit entsprachen den Erwartungen aus der Literatur (Spijkers et al, 1997). Bei gleich weiten Bewegungen war die Reaktionszeit um 30.5 msec. kürzer als bei unterschiedlich weiten $F(1,11)= 25.823$ $p<.001$. Bei kleine Bewegungen war die Reaktionszeit länger als bei großen $F(1,11) = 25.518$ $p<.001$. Mit zunehmendem SOA wurde die Reaktionszeit kürzer $F(4,8)= 178.02$ $p<.001$. Der Unterschied zwischen gleich weiten und ungleich weiten Bewegungen war insgesamt vom SOA abhängig $F(4,8)= 4.150$ $p<.078$ womit die Hypothese der transienten Kopplung tendenziell bestätigt werden konnte. Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit um 23.4 msec. $F(1,11)= 5.826$ $p<.034$. Die schwierigere Ablenkungsaufgabe hatte demnach, wie erwartet, höheren kognitiven Bedarf als die leichtere.

Die Auswirkung von Ablenkung war von der Weite der Bewegung und vom Bewegungsmuster abhängig $F(1,11)= 6.969$ $p<.023$. Bei den weiten Bewegungen wurde der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedliche weiten Bewegungen durch Ablenkung vergrößert, bei den kurzen nicht.

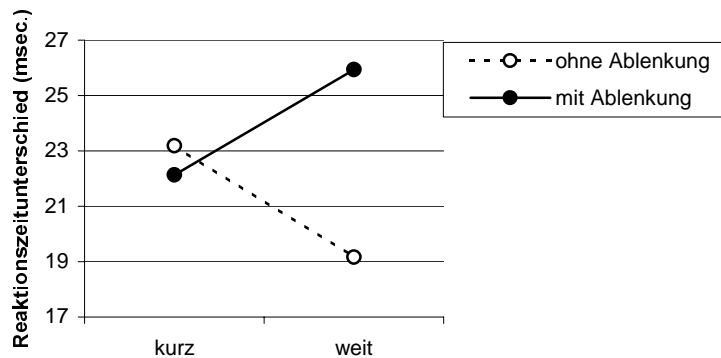


Abb. 4.4 Der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen wurde nur bei den weiten Bewegungen durch Ablenkung vergrößert.

4.3.4 Bewegungsweiten

Die Bewegungsweiten entsprachen grundsätzlich der Anweisung, indem die weiten Bewegungen tatsächlich weiter waren als die kurzen $F(1,11)= 226.958$ $p<.001$. Die Bewegungsweite war vom SOA abhängig $F(4,8)= 6.439$ $p<.013$. Bei einem SOA von 1000 msec waren die Bewegungen im Schnitt weiter als bei den anderen SOAs $F(1,11)= 5.072$ $p<.046$. Warum allerdings die Bewegungen gerade bei einem SOA von 1000 msec um ca. 2° weiter waren als bei den anderen SOAs bleibt ungeklärt.

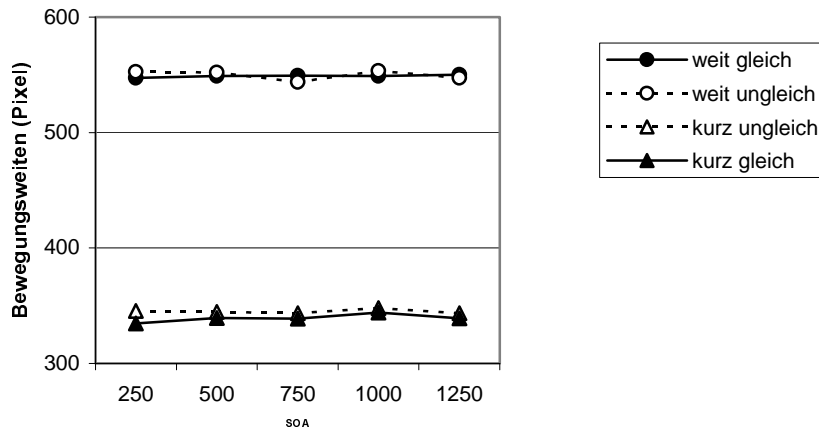


Abb. 4.5 Bewegungsweiten in Pixel.

Weder Ablenkung noch SOA wirkten sich auf die Bewegungsweiten aus. Eine in früheren Experimenten berichtete Asymmetrie war tendenziell zu bemerken: Kurze Bewegungen wurden weiter, wenn gleichzeitig weite Bewegungen durchgeführt wurden. Diese Anpassung der Weiten zeigte sich jedoch bei den weiten Bewegungen nicht.

4.3.5 Bewegungsdauer

Die Bewegungsdauer der weiten Bewegungen war erwartungsgemäß länger als jene der kurzen $F(1,11)= 97.079$ $p<.001$, Ablenkung änderte dies nicht ($F<1$). Ungleich weite Bewegungen dauerten im Schnitt länger als gleich weite $F(1,11)= 59.9$ $p<.001$, dies lag aber allein daran, dass die kurzen Bewegung länger dauerten, wenn gleichzeitig weite Bewegungen ausgeführt wurden wohingegen die Bewegungsdauer der weiten Bewegungen durch gleichzeitiges Ausführen von kurzen Bewegungen nicht kürzer wurde $F(1,11)= 60.57$ $p<.001$. Dieses Ergebnis entsprach dem früherer Experimente. Ablenkung hatte keine Auswirkung auf die Bewegungsdauer.

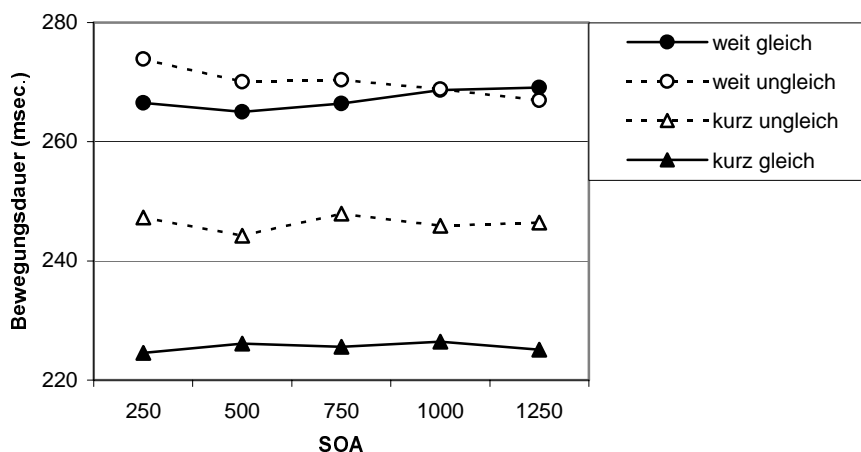


Abb. 4.6 Die Bewegungsdauer der kurzen Bewegungen wurden länger, wenn gleichzeitig eine weite Bewegung ausgeführt wurde.

4.3.6 Seiteneffekte

Bei allen drei Kennwerten, Reaktionszeit, Bewegungsweite und Bewegungszeit gab es signifikante Unterschiede zwischen den Händen, die nun gemeinsam dargestellt werden sollen. Die Reaktionszeiten der linken Hand waren im Schnitt um 6 msec kürzer als jene der rechten Hand, $F(1,11)= 4.846$ $p<.05$. Bei allen SOAs außer bei SOA 1000 betrug der

Reaktionszeitunterschied zwischen Bewegungen nach links und nach rechts bei gleichem Bewegungsmuster 5 msec und bei ungleichem 7 msec. Bei einem SOA von 1000 msec war der Unterschied zwischen gleichen und ungleichen Bewegungen insgesamt geringer, die dreifache Interaktion von SOA, Bewegungsmuster und Hand wurde signifikant $(4,8) = 4.256$ $p < .039$.

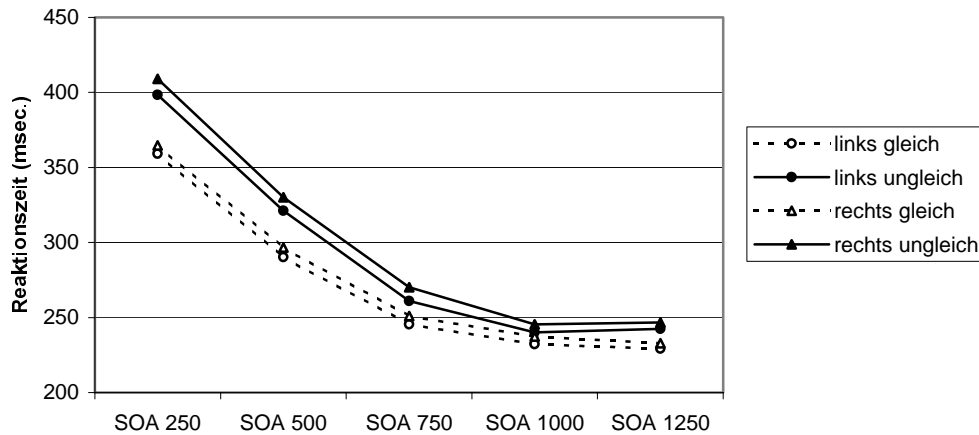


Abb. 4.7 Unterschiedliche Reaktionszeiten der Hände in msec.

Die Bewegungszeit der Bewegungen der linken Hand war um ca. 12 msec größer als jene der rechten Hand $F(1,11) = 9.52$ $p < .01$, der Unterschied zwischen den Bewegungszeiten von gleichen und ungleichen Weiten war bei der linken Hand etwas größer $(1,11) = 5.949$ $p < .033$.

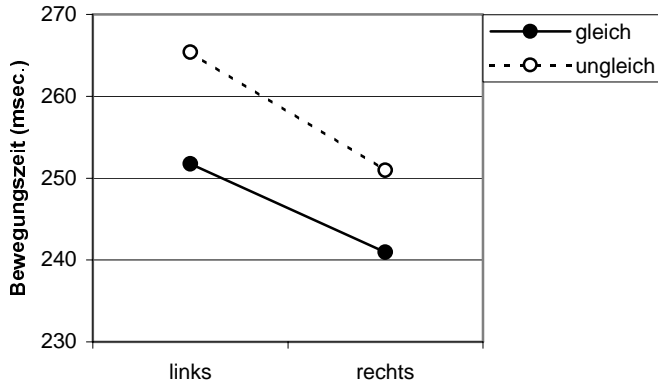


Abb. 4.8 Die Bewegungszeiten der linken Hand waren länger als jene der rechten.

Ablenkung verlängerte grundsätzlich die Bewegungsdauer, wirkte sich aber bei den Bewegungen der linken Hand mehr auf die kurzen Bewegungen aus und bei den Bewegungen der rechten Hand mehr auf die weiten $F(1,11) = 5,624$ $p < .037$. Bei den Bewegungsweiten war dies genau umgekehrt $F(1,11) = 15.746$ $p < .002$. Ablenkung wirkte sich bei der linken Hand mehr auf die weiten Bewegungen aus und bei der rechten Hand mehr auf die kurzen. In Abb. 4.9 auf der nächsten Seite sind sich die unterschiedlichen Ablenkungseffekte auf Bewegungsdauern und -weiten gegenübergestellt. Alle Werte liegen im positiven Bereich, weil Ablenkung die Bewegungsdauern und -weiten immer verlängerte.

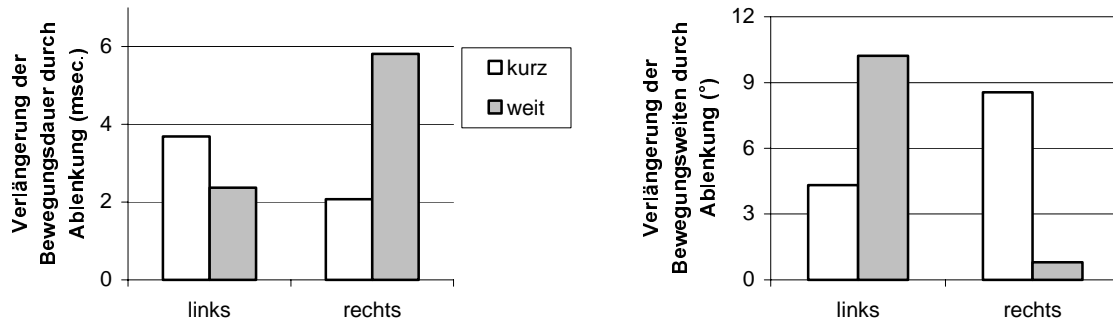


Abb. 4.9 Die Auswirkungen von Ablenkung auf Bewegungsdauer und -weite ist bei den beiden Händen unterschiedlich.

Auf eine Interpretation dieser Seitenunterschiede wird aus mehreren Gründen verzichtet. Einerseits liegt keine schlüssige Theorie oder Hypothese zur Erklärung derart unterschiedlicher Auswirkung von Ablenkung auf Seiteneffekte vor. Andererseits war das Experiment nicht zur Untersuchung dieser Zusammenhänge konstruiert. Es sei an dieser Stelle nur festgehalten, dass Bewegungen der linken und rechten Hand zum Teil unterschiedlich gesteuert zu werden scheinen. Dieses Ergebnis fand sich nicht nur in den beiden ersten Experimenten dieser Arbeit, sondern auch in anderen Experimenten zu bimanueller Koordination (z.B. Spijkers et al, 1997, Spijkers et al 2000). Dieser Unterschied spiegelt sich auch in unterschiedlicher Abhängigkeit von Ablenkung wider.

4.4 Diskussion

4.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen nahm mit längerem SOA ab. Die Hypothese der transienten Kopplung konnte tendenziell bestätigt werden, die entsprechende Interaktion wurde allerdings nicht signifikant. Dass Ablenkung die Entkopplung verzögert, konnte nicht bestätigt werden.

Bei gleich weiten Bewegungen war die Reaktionszeit kürzer als bei unterschiedlich weiten. Bei kleinen Bewegungen war die Reaktionszeit länger als bei großen. Mit zunehmendem SOA wurde die Reaktionszeit kürzer. Ablenkung verlängerte die Reaktionszeit. Bei den weiten Bewegungen wurde der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedliche weiten Bewegungen durch Ablenkung vergrößert, bei den kurzen nicht.

4.4.2 Verzögerte Entkopplung

Die Annahme der verzögerten Entkopplung findet wenig Unterstützung durch die Ergebnisse. Der transiente Aspekt von parametrischer Kopplung scheint von Ablenkung unabhängig zu sein. Dass parametrische Kopplung von Ablenkung unabhängig war, zeigte sich auch in den beiden ersten Experimenten dieser Untersuchung. Von daher ist es auch nicht weiter erstaunlich, dass für den transienten Aspekt parametrischer Kopplung gleiches gilt.

In den beiden ersten Experimenten waren die höheren Steuerfunktionen in von Ablenkung abhängige und von Ablenkung unabhängige Anteile unterteilt worden. Der Gedanke bietet sich an, dass auch in diesem dritten Experiment von parametrischer Kopplung aufgrund höherer Abhängigkeit von Ablenkung unterscheidbare Anteile an der Steuerung der Bewegungen beteiligt waren.

Einige Einzelergebnisse dieses Experimentes ließen sich durch die Annahme derartiger ablenkbarer, „noch höherer“ Steuerfunktionen erklären. Einmal wäre das jene, in allen Experimenten stabil gefundene grundsätzliche Reaktionszeitverlängerung durch Ablenkung.

Dieses Ergebnis ist einerseits so selbstverständlich, dass es fast nicht erwähnt werden müsste. Andererseits ist eine Erklärung, was genau zu diesem bekannten Phänomen führt, bis heute nicht widerspruchsfrei gefunden worden.

Zum anderen könnten derartige Strukturen vielleicht jenen Rest der Kopplung, der durch die Entkopplung nicht ganz aufgelöst wird, erklären. Daten aus einem dieser Untersuchung sehr ähnlichen Experiment (Spijkers et al. 1997) zeigten, dass es den Zeitpunkt der vollständigen Entkopplung nicht wirklich gibt. Reaktionszeitunterschiede zwischen gleich weiten und ungleich weiten Bewegungen wurden zwar mit länger werdendem SOA grundsätzlich geringer, sie blieben aber bis zu einem SOA von 1000 msec vorhanden. Durch die jetzt vorliegenden Daten kann der Zeitpunkt auf 1250 msec ausgedehnt werden. Es scheint unwahrscheinlich, dass dieser Unterschied auch bei noch längeren SOAs ganz verschwindet.

4.4.3 Weiterführende Gedanken

Parametrische Kopplung scheint durch Ablenkung nicht beeinträchtigt zu sein. Ebenso scheint der Vorgang der Entkopplung durch Ablenkung nicht gebremst zu werden. Das ist keineswegs trivial, heißt das doch, in Alltagssprache formuliert, dass sowohl Kopplung als auch Entkopplung ohne aktives Zutun, also gewissermaßen automatisch abzulaufen scheinen.

Der Gedanke könnte in kritischen Situationen wichtig sein, in denen Kopplung zu unerwünschten Bewegungen führt. In derartigen Situationen würde es sich danach nämlich empfehlen, einfach abzuwarten, bis sich die Kopplung ganz von allein aufgelöst hat. Möglicherweise entsprechen die in Fahrsituation unter Ermüdung gefundenen Bewegungsblockaden einer derartigen, allerdings biologisch bedingten, „Verzögerungstaktik“.

5 Allgemeine Diskussion

Ziel der ersten beiden Experimente war gewesen, höhere Steuerfunktionen durch Ablenkung zu beeinträchtigen, um es Einflüssen des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes leichter zu ermöglichen, direkten Anteil an der Bewegungssteuerung zu nehmen. Das ist nicht gelungen. Jene Bewegungsparameter, die vielleicht mit dem Reflex in Verbindung gebracht werden können, schienen sich unter Einfluss von Ablenkung nicht zu verändern. Aber auch andere Parameter, die nicht mit dem Reflex in Verbindung gebracht werden können, waren von Ablenkung nicht abhängig, während Ablenkung sehr wohl Einfluss auf eine dritte Gruppe von Parametern hatte. Im dritten Experiment schlug der Versuch fehl, die Zeit der Entkopplung einer bimanuellen, koordinierten Bewegung durch Ablenkung zu verlängern. Die transienten Aspekte der homologen Kopplung erwiesen sich als von Ablenkung unabhängig.

Die nun folgende Diskussion besteht aus vier Teilen. Zunächst werden die Ergebnisse der drei Experimente zusammenfassend dargestellt. Dabei werden sie in zwei Gruppen unterteilt. Jene Parameter, die von Ablenkung beeinflusst worden waren, werden von jenen unterschieden, bei denen das nicht so war.

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit Daten aus neurophysiologischen Untersuchungen führt zu einem einfachen, neurophysiologisch orientierten Modell menschlicher Bewegungssteuerung, das im Anschluss vorgestellt wird.

Wie die Ergebnisse der Experimente dieser und anderer Untersuchungen im Rahmen dieses Modells erklärt werden können, wird in dem darauf folgenden Abschnitt beschrieben. Zum Abschluss wird dieses Modell mit den im Theorieteil dieser Arbeit beschriebenen psychologischen Theorien in Beziehung setzt. Zunächst folgt aber eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse.

5.1.1 Überblick über die Ergebnisse

5.1.1.1 Einflüsse von Ablenkung

Unter Ablenkung vergrößerte sich die Phasenverschiebung bei den periodischen Kopf- und Armbewegungen des ersten Experiments. Bei den diskreten Lenkbewegungen des zweiten Experiments und den beidhändigen Bewegungen des dritten verlängerte sich die Reaktionszeit. Die Weiten der Kopfbewegungen im ersten Experiment wurden durch Ablenkung verkleinert, die Bewegungsdauern im zweiten verkürzt. Auf Bewegungsdauern und –weiten hatte Ablenkung im dritten Experiment keinen Einfluss.

Im ersten Experiment veränderte Ablenkung den Einfluss des Bewegungsmusters bei den verschiedenen Kopfbedingungen unterschiedlich. Das betraf die Phasenverschiebung sowie die Periodenvariabilität. Die Phasenverschiebung wurde in der Bedingung ohne Blickrichtungswechsel im gegensinnigen Bewegungsmuster durch Ablenkung nicht, wie in allen anderen Bedingungen, größer, sondern kleiner. In allen drei Experimenten fanden sich Seitenasymmetrien unterschiedlichster Ausprägung, die sich durch Ablenkung veränderten.

Die erwarteten Interaktionen von Ablenkung mit dem Bewegungsmuster im ersten und zweiten Experiment und mit der Länge des SOA im dritten wurde in keinem der erhobenen Kennwerte signifikant.

5.1.1.2 Nicht von Ablenkung beeinflusst

Eine ganze Reihe von signifikanten Ergebnissen zeigte den Unterschied zwischen den verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich der erhobenen Kennwerte auf. Davon sollen nur jene erwähnt werden, die mit der Fragestellung in direktem Zusammenhang stehen.

Die Phasenvariabilität der periodischen Bewegungen im ersten Experiment war beim gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner. Die Lenkbewegungen des ersten Experiments waren im gegensinnigen Bewegungsmuster weiter als im gleichsinnigen. Die diskreten Lenkbewegungen des zweiten Experiments waren jedoch im gleichsinnigen Bewegungsmuster weiter. Die exzentrische Kopfhaltung beeinflusste im zweiten Experiment auch die Reaktionszeit und verursachte kürzere Reaktionszeiten im gegensinnigen Bewegungsmuster.

Die Hypothese der transienten Kopplung bei konkreten Bewegungen mit Zweihand-Koordination konnte tendenziell bestätigt werden. Der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen nahm mit längerem SOA ab. Die Hypothese der verzögerten Entkopplung durch Ablenkung konnte jedoch nicht bestätigt werden. Ablenkung verlangsamte den Vorgang des Entkoppelns nicht.

Weder Ablenkung noch SOA wirkten sich auf die Bewegungsweiten aus. Die Bewegungsdauer der weiten Bewegungen war länger als jene der kurzen. Die kurzen Bewegungen dauerten länger wenn gleichzeitig weite Bewegungen ausgeführt wurden. Ablenkung und SOA hatten keine Auswirkung auf die Bewegungsdauer.

5.1.2 Ordnung der Ergebnisse

Die Ergebnisse belegen, dass bestimmte Bewegungsparameter von Ablenkung abhängig waren und andere nicht. Das Hauptziel dieser Arbeit war gewesen, Kopplung durch das Fenster „Ablenkung“ zu betrachten. Die Kopplung verändernde Einflüsse von Ablenkung hätten sich statistisch in Interaktionen der Faktoren Ablenkung und Bewegungsmuster zeigen müssen. Allein, keine einzige derartige Interaktion wurde signifikant. Dadurch geriet der Faktor Bewegungsmuster bei der Interpretation der Ergebnisse richtiggehend in die Rolle eines Gegenspielers von Ablenkung. Ablenkung hatte verschiedene Einflüsse auf die Bewegungssteuerung, das Bewegungsmuster hatte verschiedene Einflüsse, aber Ablenkung veränderte die Einflüsse des Bewegungsmusters nicht, und umgekehrt. Eine Ordnung der Ergebnisse nach dem Grad der Abhängigkeit von Ablenkung bedeutet daher gleichzeitig eine Ordnung nach dem Grad der Abhängigkeit vom Bewegungsmuster. Oder, etwas deutlicher ausgedrückt: im Folgenden wird der Versuch unternommen, die Ergebnisse dahingehend zu ordnen, welche Parameter der Bewegung eher von Ablenkung und welche eher vom Bewegungsmuster abhängig waren.

Im ersten Experiment war die Phasenverschiebung von Ablenkung abhängig, die Phasenvariabilität nicht. Wie aus den Experimenten mit Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Bewegung zu sehen war (Baldissera et al., 1991; Baldissera, Borroni & Cavallari, 2000) konnten Veränderungen der Phasenverschiebung in engem Zusammenhang mit unterschiedlichen, verwendeten Strategien gesehen werden. Ein Teil der Unterschiede zwischen den verschiedenen Strategien beruhte dabei auf unterschiedlich starker Verwertung von propriozeptiven Rückmeldungen, also von Sinneseindrücken.

Dass Ablenkung dann unterschiedlichen Einfluss auf die Bewegungssteuerung hatte, wenn Sinneseindrücke unterschiedlich verarbeitet wurden, geht auch daraus hervor, dass Ablenkung die Phasenverschiebung im ersten Experiment bei den verschiedenen Blickbedingungen unterschiedlich veränderte. Ablenkung hatte unterschiedliche Auswirkung auf die Phasenverschiebung, je nach dem, ob der Blick mit dem Kopf periodisch mitbewegt oder starr zur Mitte des Bildschirms gehalten wurde.

Vom Bewegungsmuster war hingegen die Phasenvariabilität im ersten Experiment abhängig und zwar war sie beim gleichsinnigen Bewegungsmuster kleiner. Die Bewegungsweiten der Lenkbewegungen des ersten Experiments waren im gegensinnigen Bewegungsmuster weiter als im gleichsinnigen. Die diskreten Lenkbewegungen des zweiten Experiments waren jedoch im gleichsinnigen Bewegungsmuster weiter. Die exzentrische Kopfhaltung beeinflusste im

zweiten Experiment auch die Reaktionszeit und verursachte kürzere Reaktionszeiten im gegensinnigen Bewegungsmuster. Die Hypothese der transienten Kopplung bei konkreten Bewegungen mit Zweihand-Koordination konnte im dritten Experiment tendenziell bestätigt werden. Der Reaktionszeitunterschied zwischen gleich weiten und unterschiedlich weiten Bewegungen nahm mit längerem SOA ab. Die Hypothese der verzögerten Entkopplung durch Ablenkung konnte jedoch nicht bestätigt werden. Ablenkung verlangsamte den Vorgang des Entkoppelns nicht. All diese Befunde deuten darauf hin, dass jene Parameter der Bewegungssteuerung, die etwas mit dem Bewegungsmuster, also mit der für diese Bewegung spezifischen Kopplung, zu tun haben, von Ablenkung nicht abhängig waren.

Als einzige Ausnahme wurde im ersten Experiment bei der Periodenvariabilität der Lenkbewegungen bei weiten Kopfbewegungen die Interaktion von Ablenkung und Bewegungsmuster signifikant. Die Periodenvariabilität ist aber kein Maß für die Koordination der Bewegung, also für die Kopplung. Die inhaltliche Bedeutung der Periodenvariabilität ist nicht eindeutig geklärt, eventuell kann sie mit Ausgleichsbewegungen in Zusammenhang gebracht worden. Einflüsse von Ablenkung könnten diese Ausgleichsbewegungen betreffen. Damit wäre die Idee weiter unterstützt, die in Zusammenhang mit der Phasenverschiebung formuliert wurde, dass Ablenkung dann Einfluss auf die Steuerung von Bewegung hat, wenn bestimmte Strategien mit im Spiel sind.

Zusammenfassend schien Ablenkung dann keine Auswirkung zu haben, wenn die veränderten Bewegungsparameter von Einflüssen des Reflexes oder von bestimmten Anteilen parametrischer Kopplung bestimmt waren. Im Gegensatz dazu hatte Ablenkung eher dann Einfluss wenn übergeordnete Handlungsplanung oder -überwachung, wie zum Beispiel bei der Koordination mit der Blickrichtung oder bei Anwendung von Kompensationsstrategien, erforderlich war. Neurophysiologische Befunde legen die Vermutung nahe, dass diese unterschiedliche Auswirkung von Ablenkung etwas mit der Beteiligung unterschiedlicher neuronaler Schaltkreise zu tun haben könnte. Dies soll im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

5.1.3 Neurophysiologische Befunde

Sowohl anatomisch als auch funktionell lassen sich neuronale Kreise über das Cerebellum von Kreisen unterscheiden, an denen die Basalganglien beteiligt sind (Brunia, 1999). Die cerebellaren Kreise verlaufen von der kortikalen Region M1 über die Pons zum Kleinhirn und von da über den Thalamus zurück zu M1. Ein Teil der Projektionen endet auch im prämotorischen Kortex.

Die Basalganglienkreise sind komplizierter. Eine motorische Schleife, ausgehend von den sensomotorischen Regionen M1, S1 bzw. SMA über das Putamen, das Pallidum und den Thalamus zurück zu M1 bzw. SMA unterscheidet sich von einer Assoziationsschleife. Projektionen vom dorsolateralen, prefrontalen Kortex enden im Nucleus Caudatus, der zum Pallidum und zur Substantia nigra projiziert. Diese beiden Regionen projizieren in den Thalamus, dessen Projektionen den Kreis zum dorsolateralen prefrontalen Kortex wieder schließen.

Alexander, DeLong und Strick (1986) haben fünf verschiedene kortiko-basale Kreise beschrieben. Die Funktionsweise ist bei allen gleich: Von den kortikalen Zentren gehen exzitatorische, glutamaterge Fasern zum Nucleus caudatus, Putamen und zum ventralen Striatum. Dieser Input aktiviert hemmende GABA Zellen im Pallidum die eine tonisch inhibitorische Wirkung auf den Thalamus ausüben. Diese generelle Hemmung kann durch zwei Kreisläufe beeinträchtigt werden. Die direkte Verbindung enthemmt den Thalamus direkt wohingegen die indirekte Verbindung die hemmenden Einflüsse des Pallidums hemmen.

Insgesamt scheint die genaue Funktion dieser beiden hemmenden Kreisläufe noch nicht eindeutig geklärt zu sein. Eine mögliche funktionelle Erklärung ist, dass die direkte Verbindung durch Enthemmung ein neues Bewegungsprogramm auslöst, die indirekte Hemmung der Hemmung dagegen das Ende einer Bewegung bewirkt (Alexander, Crutcher & DeLong, 1990). Eine andere Erklärung der indirekten Hemmung wäre im Sinne einer Selektion die Hemmung anderer Bewegungsmuster (Brunia, 1999).

Für einige der beschriebenen fünf koriko-basalen Kreise liegen aber klärende experimentelle Daten vor. In einer Übersichtsarbeit über mehrere fMRI-Studien verglichen Jueptner und Weiler (1998) die Aufgaben von Basalganglien und Kleinhirn bei der Steuerung verschiedener Bewegungen. Die Ergebnisse dieser Studien zeigten deutlich, dass das Kleinhirn dann beteiligt war, wenn es galt, sensorische Information zu verarbeiten, wie zum Beispiel beim Nachzeichnen von Linien. An derartigen Aufgaben waren die Basalganglien nicht beteiligt.

Gleiches zeigte sich auch bei passiven Bewegungen. Während im Cerebellum die Aktivierung kaum von der einer aktiven Vergleichsaufgabe abwich, zeigte sich in den Basalganglien keine Aktivierung. Wenn allerdings konkrete Entscheidungen zu treffen waren wie sie in Sequenzlern-Aufgaben vorkommen, waren die Basalganglien deutlich mehr beteiligt als das Cerebellum.

Ein deutlicher Wechsel der Aktivierung unterschiedlicher Schleifen zeigte sich beim Lernen von Sequenzen. Beim Lernen einer neuern Sequenz waren präfrontale Regionen wesentlich mehr beteiligt, als bei der Wiedergabe schon gelernter Sequenzen. „Our data show that once a motor task has become automatic, the prefrontal loop of the motor system is no longer engaged; the executive parts of the motor system (motor loop) take over and allow the prefrontal cortex to be engaged in another task.” (Jueptner und Weiler, 1998, s. 1445). Interessanterweise wurde diese präfrontale Schleife wieder aktiv, wenn die Probanden der Aufgabe erneut Aufmerksamkeit zuwendeten.

Eine mögliche Erklärung des unterschiedlichen Einflusses von Ablenkung in den Ergebnisse der hier vorgestellten Experimente ist, dass Ablenkung eher auf jene Anteile der Bewegungssteuerung wirkt, die in der präfrontalen Schleife oder in Schaltkreisen mit Beteiligung des Kleinhirns grundgelegt sind. Die Funktion der motorischen Schleife könnte hingegen von Ablenkung unabhängig sein. Möglicherweise sind also jene Anteile der Bewegungssteuerung, die durch Ablenkung nicht verändert werden, in der motorischen Schleife grundgelegt. Eine Interpretation unserer Ergebnisse, sowie derer aus anderen Experimenten, aus der Sicht dieses einfachen, neurophysiologisch orientierten Modells wird im nächsten Abschnitt unternommen.

5.1.4 Interpretation der Ergebnisse nach diesem Modell

Die Phasenvariabilität im ersten Experiment war vom Bewegungsmuster abhängig, nicht jedoch von Ablenkung. Nach dem vorgestellten Modell deutet das darauf hin, dass eher die motorische Schleife am Zustandekommen der Phasenvariabilität beteiligt ist. Die Phasenvariabilität war auch bei anderen Aufgaben von Ablenkung unabhängig gewesen (Summers et al, 1998; Pellechia & Turvey, 2001). Dass dies nicht uneingeschränkt gilt, zeigen aber Daten, in denen es den Probanden gelang, die Phasenvariabilität durch Zuwenden der Aufmerksamkeit zu verkleinern (Swinnen, Jardin & Meulenbroek 1996; Amazeen et al 1997). Da in diesen Aufgaben jedoch keine Zusatzaufgabe zu bewältigen war, lässt sich die verringerte Phasenvariabilität durch Aufmerksamkeitszuwendung mit einem Gating-Effekt erklären, der nicht mit dem Modell in Widerspruch steht. Darunter ist ein Einfluss der präfrontalen Schleife zu verstehen, der über den Thalamus die Grundaktivität der motorischen Schleife erhöht, ohne deren grundsätzliche Funktionsweise zu verändern.

Dass Aufmerksamkeitszuwendung aber beim gegensinnigen Bewegungsmuster mehr Einfluss auf die Phasenvariabilität hatte (Temprado et al., 1999) als beim gleichsinnigen erhöhte die Plausibilität des Modells. Wie aus den Experimenten mit Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Bewegung zu sehen war (Baldissera et al., 1991; Baldissera, Borroni & Cavallari, 2000), geht das gegenphasige Bewegungsmuster mit höherer Beteiligung von sensorischem Feedback einher. Die Schaltkreise mit Beteiligung des Kleinhirns und die präfrontale Schleife könnten am gegensinnigen Bewegungsmuster mehr beteiligt sein. Diese sind ja gegenüber Aufmerksamkeitsveränderungen empfänglich.

Im Gegensatz zur Phasenvariabilität war die Phasenverschiebung durch Ablenkung größer geworden. Sie war auch in der gegensinnigen Phasenlage größer als in der gleichsinnigen. Ablenkung veränderte aber den Unterschied zwischen den Phasenlagen nicht. Sowohl die motorische als auch die präfrontale Schleife dürften also an der Phasenverschiebung beteiligt sein. Vor allem durch die Experimente mit Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Bewegung (Baldissera, Borroni & Cavallari, 2000) wurde ersichtlich, dass die Größe der Phasenverschiebung etwas mit verwendeten Strategien und mit Kompensationsversuchen zu tun hat, die den physikalischen Unterschied der bewegten Körperteile ausgleichen. Dass daran die präfrontale Schleife beteiligt ist, scheint nahe zu liegen, weshalb auch die Möglichkeit der Veränderung dieses Kennwertes durch Ablenkung (Summers et al. 1998, Pellechia & Turvey, 2001, eigene Daten) möglich ist.

Im zweiten Experiment war die Reaktionszeit im gleichsinnigen Bewegungsmuster länger als im gegensinnigen. Die Reaktionszeit wurde durch Ablenkung auch insgesamt länger. Ablenkung veränderte den Unterschied zwischen den Bewegungsmustern jedoch nicht. Es waren also sowohl von Ablenkung abhängige, als auch von Ablenkung nicht abhängige Anteile vorhanden, und diese beiden Anteile waren voneinander unabhängig. Das hieße nach dem neurophysiologisch orientierten Modell, dass sowohl die motorische als auch die präfrontale Schleife bzw. Regelkreise mit Beteiligung des Kleinhirns am Zustandekommen der Reaktionszeit beteiligt waren.

Das Bewegungsmuster war in den ersten beiden Experimenten vielleicht vom asymmetrischen, tonischen Halsreflex und auf jeden Fall von parametrischer Kopplung bestimmt gewesen. Beide Einflussgrößen waren aber von Ablenkung unabhängig. Das neurophysiologisch orientierte Modell bietet auch eine Erklärung, warum die Idee der Untersuchung, den Reflex durch Ablenken der höheren Steueranteile hervortreten zu lassen, nicht geklappt hat. Nach diesem Modell ist der Reflex zwar schon von höheren Schichten überlagert, diese Schichten sind aber doch nicht hoch genug, um durch Ablenkung beeinträchtigt zu werden. Das könnte daran liegen, dass sich die entsprechenden Anteile parametrischer Kopplung in der motorischen Schleife befinden, auf die Ablenkung keinen Einfluss ausübt.

5.1.5 Psychologische Modelle

Ob es am Wesen der Naturerscheinungen oder am Wesen der menschlichen Modellierungsfähigkeit liegt, ist ungewiss. Tatsache ist, dass mit einer gewissen Hartnäckigkeit immer neue Versuche unternommen werden, menschliche Bewegungssteuerung in Zweikomponenten Modelle zu zerlegen. Angefangen von der Beharrungstendenz und dem Magneteffekt bei von Holst (1939), der Unterscheidung zwischen open- und closed Loops (Adams, 1976) oder zwischen Programmen und Parametern im Konzept des generalisierten motorischen Programms (Keele, 1968), bis hin zu den beiden gekoppelten Oszillatoren der dynamischen Modelle oder des Modells der parametrischen Kopplung, immer ging es darum, das Zusammenwirken von zwei getrennten Anteilen zu beschreiben und zu erklären. Von daher reiht sich das in dieser Arbeit zur Erklärung der

unterschiedlichen Auswirkung von Ablenkung herangezogene neurophysiologische Modell in eine ganze Reihe ehrenvoller Vorgänger.

Die wesentliche Grundaussage dieser Arbeit ist, dass anscheinend bestimmte Anteile der Bewegungssteuerung von Ablenkung deshalb nicht verändert werden weil sie in anderen neuronalen Kreisen ablaufen als jene Anteile, die von Ablenkung abhängig sind. In gewissem Sinne lassen sich die verschiedenen neuronalen Schaltkreise auch als verschiedene Ressourcen bezeichnen. Es wird aber die ursprüngliche Verwendung des Begriffes Ressourcen, als eine begrenzt zur Verfügung stehende Menge an „Informationsverarbeitungsmöglichkeit“ aufgegeben. Statt dessen werden diese Ressourcen als getrennt funktionierende Einheiten im Sinne von Modulen oder Prozessoren verstanden, deren Auswirkungen sich in der Bewegung als strukturelle Randbedingungen messen lassen.

5.1.6 Zusammenfassung

Die ersten beiden Experimente dienten der Frage, ob es möglich ist, Einflüsse des asymmetrischen, tonischen Halsreflexes hervortreten zu lassen, indem die den Reflex überlagerten höheren Steuerfunktionen durch Ablenkung beeinträchtigt werden. Dies scheint nicht so zu sein. Ablenkung hatte zwar deutliche Einflüsse auf bestimmte Parameter der Bewegungssteuerung, auf andere jedoch nicht. Jene Einflüsse, die mit dem Reflex in Verbindung gebracht werden können, waren von Ablenkung immer unabhängig. Es fanden sich jedoch auch Belege dafür, dass andere Einflüsse als der tonische Halsreflex nicht durch Ablenkung verändert wurden. Das spricht dafür, dass zumindest einige Anteile der parametrischen Kopplung von Ablenkung unabhängig verlaufen. Ein Vergleich mit neurophysiologischen Befunden legt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um neuronale Regelkreise mit Beteiligung von Basalganglien, Thalamus, M1, SMA und PMC handelt. Ablenkung wirkt sich hingegen auf Schaltkreise aus, in denen zusätzlich präfrontale oder occipitale Regionen bzw. das Kleinhirn beteiligt sind.

Literatur

- ABEELE, S.V., DELREUX, V., CROMMELINCK, M. & ROUCOUX, A. (1993). Role of Eye and Hand Initial Position in the Directional Coding of Reaching. *Journal of Motor Behavior*, **25**, 280-287
- ALEXANDER, G.E., CRUTCHER, M.D. & DELONG, M.R. (1990). Basal ganglia-thalamocortical circuits: parallel substrates for motor, oculomotor, 'prefrontal' and 'limbic' functions . *Progress in Brain Research*, **85**, 119-46
- BALDISSERA, F. & CAVALLARI, P. (2000). Neural compensation for mechanical loading of the hand during coupled oscillations of the hand and foot. *Experimental Brain Research*, **133**, 2, 165-177
- BALDISSERA, F., CAVALLARI, P., MARINI, G. & TASSONE, G. (1991). Differential control of in-phase and anti-phase coupling of rhythmic movements of ipsilateral hand and foot. *Experimental Brain Research*, **83**, 375-380
- BALDISSERA, F., CAVALLARI, P. & LEOCANI, L. (1998). Cyclic modulation of the H-reflex in a wrist flexor during rhythmic flexion-extension movements of the ipsilateral foot. *Experimental Brain Research*, **118**, 427-430
- BALDISSERA, F., BORONNI, P. & CAVALLARI, P. (2001). Neural compensation for mechanical differences between hand and foot during coupled oscillations of the two segments. *Experimental Brain Research*, **139**, 1, 18-29
- BERTHOZ, A. & POZZO, T. (1994). Head and Body Coordination during Locomotion and Complex Movements. In Swinnen, S., Heuer, H., Massion, J. & Casear, P. (Hrsg.), *Interlimb Coordination*. San Diego New York Boston London Sydney Tokyo Toronto: Academic Press
- BIERBAUMER, N. & SCHMIDT R.F. (1996). *Biologische Psychologie*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag
- BIGUER, B., DONALDSON, I.M.L., HEIN, A. & JEANNEROD, M. (1988). Neck Muscle vibration modifies the Representation of visual Motion and Direction in Man. *Brain*, **111**, 1405-1424
- BRUNIA, C.H.M. (1999). Neural Aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, **101**, 213-242
- BRUNIA, C.H.M. (1993). Waiting in readiness: Gating in attention and motor preparation. *Psychophysiology*, **30**, 327-339
- BYERS, R.K. (1938). Tonic Neck Reflexes in children, considered from a prognostic standpoint. *American Journal of Disabled Children*, **55**, 696

- CARSON, R.G., CHUA, R., BYBLOW, W.D., POON, P. & SMETHURST, C.J. (1999). Changes in posture alter the attentional demands of voluntary movement. *Proc R Soc B Biol Sci*, **266**, 853-857
- CHANG, P. & HAMMOND, G.R. (1987). Mutual Interactions between speech and finger movements. *Journal of Motor Behavior*, **19**, 265-274
- COHEN, L. (1971). Synchronous Bimanual Movements performed by homologous and Non-homologous Muscles. *Perceptual and Motor Skills*, **32**, 639-644
- DE JONG, B.M., WILLEMSSEN, A.T.M. & PAANS, A.M.J. (1999). Brain Activation Related to the Change between Bimanual Motor Programs. *NeuroImage*, **39**, 290-297
- DELREUX, V., ABEELE, S.V., LEVEFRE, P. & ROUCOUX, A. (1991). Eye-head coordination: influence of eye position on the control of head movement amplitude. In Paillard, J. (Hrsg.), *Brain and Space*. (s. 39-48) Oxford New York Tokyo: Oxford University Press
- FUKUDA (1961). Studies on Human Dynamic Postures from the Viewpoint of Postural Reflexes. *Acta oto-laryngologica*, **161**, 1-52
- GROSSBERG, S., PRIBIC, C. & COHEN, M.A. (1997). Neural control of interlimb oscillations. *Biological Cybernetics*, **77**, 131-140
- HAJOS, A. & FEY, D.A. (1982). Lernprozesse des okulomotorischen Systems. *Psychologische Beiträge*, **24**, 135-158
- HAKEN, H., KELSO, J.A.S. & BUNZ, H. (1985). A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movement. *Biological Cybernetics*, **51**, 347-356
- HELLEBRANDT, F.A., HOUTZ, S.J., PARTRIDGE, M.J. & WALTERS, C.E. (1956). Tonic neck reflexes in exercise of stress in man. *American Journal of Physical Medicine*, **35**, 144-159
- HEUER, H. (1978). Über Bewegungsprogramme bei willkürlichen Bewegungen. Marburg/Lahn: Dissertation der Philips Universität
- HEUER, H. (1986). Über die Annahme relations-abhängiger Vorprogrammierung bei der Interpretation von Reaktionszeitexperimenten zur motorischen Vorbereitung. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*, **XXXIII**, 4, 563-586
- HEUER, H. (1993). Structural constraint on bimanual movements. *Psychological Research*, **55**, 83-98
- HEUER, H. (1994). Koordination. In Heuer, H. & Keele, S.W. (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie: Themenbereich C; Serie II; Band 3; Psychomotorik*. (s. 147-222) Göttingen Bern Toronto Seattle: Hogrefe Verlag
- HEUER, H. (1995). Modelle motorischer Koordination. *Psychologische Beiträge*, **37**, 396-452

- HEUER, H. (1996). Doppeltätigkeiten. In Birbaumer, N., Frey, D., Kuhl, J., Prinz W. & Weinert, F.E. (Hrsg.), *Aufmerksamkeit. Enzyklopädie der Psychologie*. (s. 164-218) Göttingen Bern Toronto Seattle: Hogrefe Verlag für Psychologie
- HEUER, H. (1997). Multiple Task Interactions. In (Hrsg.), *Encyclopedia of Human Biology*. (s. 811-822) London: Academic Press
- HEUER, H. & KEELE, S.W. (1994). Enzyklopädie der Psychologie Psychomotorik. Göttingen Bern Toronto Seattle: Hogrefe
- HEUER, H. & KLEIN, W. (1999). Involuntary Rotations of a Steering Device Induced by Voluntary Rotations of the Head and Maintained Eccentric Head Positions. *Journal of Motor Behavior*, **31**, 3, 248-264
- HEUER, H. & KLEIN, W. (1999). Structural Constraint on the Coordination of Concurrent Rotations of the Head and a Steering Device. *Motor Control*, **3**, 36-66
- HEUER, H. & KLEIN, W. (2001). Eccentric head position bias random generation of leftward and rightward handle-bar rotations. *Acta Psychologica*, **106**, 49, 23-49
- HEUER, H. & SANGALS, J. (1998). Task dependent mixtures of coordinate systems in visuomotor transformations. *Experimental Brain Research*, **119**, 224-236
- HEUER, H. & WING, A.M. (1984). Doing Two Things at Once: Process Limitations and Interactions. *The Psychology of human Movement*. Academic Press
- HEUER, H., SPIJKERS, W., KLEINSORGE, T. & STEGLICH, C. (2000). Parametrische Kopplung bei Folgen beidhändiger Umkehrbewegungen mit gleichen und unterschiedlichen Weiten. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*, **47**, 1, 34-49
- HOLST, E.V. (1939). Die relative Koordination als Phänomen und als Methode zentralnervöser Funktionsanalyse. *Ergebnisse der Physiologie*, **42**, 228-306
- HUNTER, L.A.J.&I.W. (1985). Effect of muscle tendon vibration on the perception of force. *Experimental Neurology*, **87**, 35-45
- IKAI, M.M. (1950). Tonic Neck Reflex in normal persons. *Japanese Journal of Physiology*, **1**, 118-124
- ILLERT, M. (1992). Kontrolle der Haltung. In Deetjen, P. & Speckmann, E.J. (Hrsg.), *Physiologie*. (s. 188-192) München Wien Baltimore: Urban & Schwarzenberg
- JIRSA, V.K., FRIEDRICH, R., HAKEN, H. & KELSO, J.A.S. (1994). A theoretical model of Phase transitions in the human Brain. *Biological Cybernetics*, **71**, 27-35
- JOHNSON, K.A., BENNET, J.E., GEORGIU, N., BRADSHAW, J.L., CHIU, E., CUNNINGTON, R. & IANSEK, R. (2000). Bimanual co-ordination in Huntington's disease. *Experimental Brain Research*, **134**, 4, 483-498

- JUEPTNER, J. & WEILLER, C. (1998). A review of differences between basal ganglia and cerebellar control of movements as revealed by functional imaging studies. *Brain*, **121**, 1437-1449
- JUNG, R. & FACH, C. (1984). Spiegelschrift und Umkeherschrift bei Linkshändern und Rechtshändern: ein Beitrag zum Balkentransfer und Umkehrlernen . In Spillmann, L. & Wooten, B.R. (Hrsg.), *Sensory experience, adaptation and perception*. (s. 377-399) Hillsdale: Erlbaum
- KELSO, J.A.S., PUTNAM, C.A. & GOODMAN, D. (1983). On the space-time structure of human interlimb coordination . *Quarterly Journal of experimental Psychology*, **35A**, 347-370
- KETELAARS, M.A.C., KHAN, M.A. & FRANKS, I.M. (1999). Dual Task Interference as an Indicator of Online Programming in Simple Movement Sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 5, 1302-1315
- KINSBOURNE, M. & HICKS, R.E. (1978). Functional Cerebral Space: a Model for Overflow, Transfer and Interference Effects in Human Performance: A Tutorial Review. In Requin, J. (Hrsg.), *Attention and Performance VII*. (s. 345-362) Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates
- KLAPP, S.T., KELLY, P.A. & NETICK, A. (1987). Hesitations in Continuous tracking Induced by a Concurrent Discrete Task. *Human Factors*, **29**, 327-337
- KLEIN, W. & HEUER, H. (1999). The effects of eccentric head positions on leftward and rightward turns of a handle-bar. *Acta Psychologica*, **103**, 311-329
- KOHL, K. (1956). Zum Problem der Sensusmotorik. Frankfurt: Verlag Dr. Waldemar Kramer
- KRISTEVA-FEIGE, R., ROSSI S., PIZELLA V., LOPEZ, L., ERNE, S.N., EDRICH J. & ROSSINI, P.M. (1996). A neuromagnetic study of movement-related somatosensory gating in the human brain. *Experimental Brain Research*, **107**, 504-514
- LACQUANTI, F., TERZUOLO, C.C. & VIVIANI, P. (1983). The LAW realting kinematic and figural aspects of drawing movements . *Acta Psychologica*, **54**, 115-130
- LAGASSE, P.P. & HAYES, K.C. (1973). Premotor and motor reaction time as a function of movement extent. *Journal of Motor Behavior*, **5**, 25-32
- LINDSAY, K.W., ROBERTS, T.D.M. & ROSENBERG, J.R. (1976). Asymmetric Tonic Labyrinth Reflexes and their Interaction with Neck Reflexes in Decerebrated Cats. *Journal of Physiology*, **261**, 583-601
- MAGNUS, R. (1924). Körperstellung. Berlin: Springer Verlag
- MALMO, R.B. (1995). Activation: a Neuropsychological Dimension. *Psyc. Rev.*, **66**, 6, 367-386

- MARTENIUK, R.G., MACKENZIE, C.L. & BABA, D.M. (1984). Bimanual movement control: Information processing and interaction effects. *Quart. J. Exp. Ps.*, **36A**, 335-365
- MCCOUCH, G.P., DEERING, I.D. & LING, T.H. (1951). Location of Receptors for Tonic Neck Reflexes. *J. Phys.*, **14**, 191-195
- MONNO, A., CHARDENON, A., TEMPRADO, J.J. & ZANONE, P.G., L.M. (2000). Effects of attention on phase transitions between bimanual coordination patterns: a behavioral and cost analysis in humans. *Neuroscience Letters*, **283**, 93-96
- MÜSSLER, J., STEININGER, S. & WÜHR, P. (2001). Can actions affect perceptual processing?. *Quart. J. Exp. Ps.*, **54A**, 1, 137-154
- NÄÄTÄNEN, R. (1971). Non-Aging Fore-Periods and simple Reaction Time. *Acta Psychologica*, **35**, 316-327
- NAVON, D. & GOPHER D. (1979). On the Economy of the Human-Processing System. *Psychological Review*, **86**, 3, 215-255
- NETICK, A. & KLAPP, S.T. (1994). Hesitations in Manual Tracking: A Single-Channel Limit in Response Programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **20**, 766-782
- NEUMANN, O. (1992). Theorien der Aufmerksamkeit: von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau*, **43**, 83-101
- NIEMI, P. & NÄÄTÄNEN, R. (1981). Foreperiod and Simple Reaction Time. *Psychological Bulletin*, **89**, 1, 133-162
- PASHLER, H. & O'BRIAN S. (1993). Dual-Task Interference and the Cerebral Hemispheres. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 2, 315-330
- PELLECHIA, G.L. & TURVEY, M.T. (2001). Cognitive Activity Shifts the Attractors of Bimanual Rhythmic Coordination. *Journal of Motor Behavior*, **33**, 1, 9-15
- ROBERTSON, S.D., ZELAZNIK, H.N., LANTERO, D.A., BOJCZYK, K.G., SPENCER, R., DOFFIN, J.G. & SCHNEIDT, T. (1999). Correlations for Timing Consistency Among Tapping and Drawing Tasks: Evidence Against a Single Timing Process for Motor Control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 5, 1316-1330
- ROGOSKY, B.J. & ROSENBAUM, D.A. (2000). Frames of Reference for Human Perceptual-Motor Coordination: Space-Based Versus Joint-Based Adaption. *Journal of Motor Behavior*, **32**, 3, 297-304
- ROLL, R., VELAY, J.L. & ROLL, J.P. (1991). Eye and Neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually orientated activities. *Experimental Brain Research*, **85**, 423-431

- ROUCOUX, A., CROMMELINCK, M. & BOREL, L. (1992). Eye-Head Coordination in Oblique Gaze Shifts in Cats. In Berthoz, A., Gref, W. & Vidal, P.P. (Hrsg.), *The Head-Neck Sensory Motor System*. (s. 526-530) New York Oxford: Oxford University Press
- ROUCOUX, A. (1992). Eye-head Coordination. In Stelmach, G.E. & Requin, J. (Hrsg.), *Tutorials in Motor Behavior II*. (s. 901-913) : Elsevier Publishers B.V.
- SALTZMAN, E. & KELSO, J.A.S. (1987). Skilled Actions: A Task-Dynamic Approach. *Psychological Review*, **94**, 84-106
- SANDERS, A.F. (1980). Some Effects of instructed Muscle Tension on Choice Reaction Time and Movement Time. In Nickerson, R.S. (Hrsg.), *Attention and Performance VIII*. (s. 59-74) Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates
- SANDERS, A.F. (1983). Towards a Model of Stress and Human Performance. *Acta Psychologica*, **53**, 61-97
- SCHMIDT, R.A. (1975). A schema theory for discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82**, 225-260
- SCHMIDT, R.A. (1982). The Schema Concept. In Kelso, J.A.S. (Hrsg.), *Human Motor Behavior*. (s. 219-238) Hillsdale: L. Erlbaum Associates
- SCHMIDT, R.A. (1985). The search for invariance in skilled movement behavior. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **56**, 188-200
- SCHMIDT, R.A., HEUER, H., GHODSIAN, D. & YOUNG, D.E. (1998). Generalized Motor Programs and Units of Action in Bimanual Coordination. In Latash, M.L. (Hrsg.), *Progress in Motor Control*. (s. 329-360) Champaign: Human Kinetics
- SCHÖNER, G. & KELSO, J.A.S. (1988). A Synergetic Theory of Environmentally-Specified and Learned Patterns of Movement Coordination
1. Relative Phase Dynamics. *Biological Cybernetics*, **58**, 71-80
- SHEA, C.H. & SHEBILSKE, W.L. (1991). After-Contraction Phenomenon: Influences on Performance and Learning. *Journal of Motor Behavior*, **23**, 51-62
- SHEA, C.H., GUADAGNOLI, M.A. & DEAN, M. (1995). Response Biases: Tonic Neck Response and Aftercontraction Phenomenon. *Journal of Motor Behavior*, **27**, 41-51
- SKINNER, J.E. & YINGLING, C.D. (1977). Central Gating Mechanisms that regulate event-related potentials and behavior . In Desmedt, J.E. (Hrsg.), *Attention, voluntary contraction and slow potential shifts* . (s. 30-69) Basel: Karger
- SPIJKERS, W. & HEUER, H. (1995). Structural Constraints on the Performance of Symmetrical Bimanual Movements with Different Amplitudes. *Quart. J. of Exp. Ps.*, **48A**, 3, 716-740

- SPIJKERS, W., HEUER, H., KLEINSORGE, T. & VAN DER LOO, H. (1997). Preparation of bimanual movements with same and different amplitudes: specification interference as revealed by reaction time. *Acta Psychologica*, **96**, 207-227
- SPIJKERS, W., HEUER, H., STEGLICH, C. & KLEINSORGE, T. (2000). Specification of Movement Amplitudes for the Left and Right Hands: Evidence for Transient Parametric Coupling From Overlapping-Task Performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **26**, 3, 1091-1105
- STERNBERG, J. (1979). The nature of Mental Abilities. *American Psychologist*, **34**, 214-230
- STERNBERG, S. (1975). Memory Scanning: New Findings and current Controversies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **27**, 1-32
- STOET, G. & HOMMEL, B. (1999). Action Planning and the Temporal Binding of Response Codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 6, 1625-1640
- STUCCHI, N. & VIVIANI, P. (1993). Cerebral Dominance and Desynchrony Between Bimanual Two-Dimensional Movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 6, 1200-1220
- STUPHORN, V., BAUSWEIN, E. & HOFFMANN, K. (2000). Neurons in the Primate Superior Colliculus Coding for Arm Movements in Gaze-Related Coordinates. *J Neurophys.*, **83**, 3, 1283-1299
- SUMMERS, J., BYBLOW, W. & BYSOUTH-YOUNG, D.S.A. (1998). Bimanual Circle Drawing During Secondary Task Loading. *Motor Control*, **2**, 106-113
- SUZUKI, I., TIMERICK, S.J. & WILSON, V.J. (1985). Body position with respect to the head or body position in space is coded by lumbar interneurons. *J. Neurophys.*, **54**, 123-133
- SWINNEN, S.P., SERRIEN, D.J., WALTER, C.B. & PHILIPPAERTS, R. (1995). The organization of patterns of multilimb coordination as revealed through reaction time measures. *Experimental Brain Research*, **104**, 153-162
- SWINNEN, S.P., JARDIN, K. & MEULENBROEK, R. (1996). Between-limb asynchronies during bimanual coordination: effects of manual dominance and attentional cueing. *Neuropsychologia*, **34**, 12, 1203-1213
- TEMPRADO, J.J., ZANONE, P.G., MONNO, A. & LAURENT, M. (1999). Attentional Load Associated With Performing and Stabilizing Preferred Bimanual Patterns. *J. Exp. Psy: Hum. Perc Perf.*, **25**, 6, 1579-1594
- TOKIZANE, T., MURAO, M., OGATA, T. & KONDA, T. (1951). Electromyographic studies on tonic neck, lumbar and labyrinthine reflexes in normal persons. *Japanese Journal of Physiology*, **2**,

- ULRICH, R., RINKENAUER G. & MILLER, J. (1998). Effects of stimulus duration and intensity on simple reaction time and response force . *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, 3, 915-928
- VAN DER MOLEN, M.W. (1996). Energetik und der Reaktionsprozeß. In Birbaumer, N., Frey, D., Kuhl, J., Prinz W. & Weinert, F.E. (Hrsg.), *Aufmerksamkeit. Enzyklopädie der Psychologie*. (s. 333-395) Göttingen Bern Toronto Seattle: Hogrefe Verlag für Psychologie
- VEDEL, J.P. & ROLL, J.P. (1982). Kinesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography . *Experimental Brain Research*, **47**, 177-190
- VIVIANI, P. & FLASH, T. (1995). Minimum-Jerk, Two-Thirds Power Law, and Isochrony: Converging Approaches to Movement Planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 1, 32-53
- VIVIANI, P., PERANI, D., GRASSI, F., BETTINARDI, V. & FAZIO, F. (1998). Hemispheric asymmetries and bimanual asynchrony in left- and right-handers. *Experimental Brain Research*, **120**, 531-536
- VORBERG, D. & WING, A. (1994). Modelle für Variabilität und Abhängigkeit bei der zeitlichen Steuerung. In Heuer, H. & Keele, S.W. (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie Themenbereich C Serie II Psychomotorik*. (s. 223-320) Göttingen: Hogrefe Verlag
- WALTER, C.B., SWINNEN, S.P., CORCOS D.M., POLLATOU, E. & PAN, H.Y. (1997). Coping with systematic bias during bilateral movement. *Psychol Res*, **60**, 202-213
- WANN, J., NIMMO-SMITH, I. & WING, A.M. (1988). Relation between velocity and curvature in movement: equivalence and divergence between a power law and a minimum-jerk model . *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE*, **14**, 622-637
- WEHNER, T. (1984). Im Schatten des Fehlers . *Bremer Beiträge zur Psychologie*, **34**, 11,
- WILSON, V.J. & PETERSON, B.W. (1981). Vestibulospinal and reticulospinal systems. In Brokhart, J.M., Maunzcastle, V.B., Brooks, V.B. & Geiger, S.R. (Hrsg.), *Handbook of Physiology. Section 1: The Nervous System*. Bethesda: American Physiological Society
- WILSON, V.J., EZURE, K. & TIMERICK, S.J.B. (1984). Tonic Neck Reflex of the decerebrate cat; response of spinal interneurons to natural stimulation of neck and vestibular receptors. *J. Neurophys.*, **51**, 566-577
- WYRICK, W. (1969). A plausible Solution to the mystery of veering. *Research Quarterly*, **40**, 861-862

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Geb.Dat.: 09.07.1967, Linz
Staatsbürgerschaft: Österreich
Familienstand: ledig



Ausbildung

1973 – 1977 Volksschule Biesenfeld in Linz
1977 – 1981 BRG Auhof in Linz
1981 – 1985 BORG LENTIA in Linz
Matura im Juni 1985 bestanden
1986 - 1993 Psychologiestudium in Salzburg
Diplomarbeit „Fehler und Bewegungssteuerung“

Wissenschaftliche Tätigkeit

1994 - 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Heuer, Dortmund
DFG Projekt „Kopf – Arm – Koordination“
Thema der Doktorarbeit: „Koordination unter Ablenkung“

2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Heuer, Dortmund,
DFG Projekt „Beeinträchtigung exekutiver Funktionen durch
Schlafdeprivation“
Arbeit an der Dissertation

Sonstige berufliche Tätigkeit

1997 - 1999 Trainer für arbeitssuchende Jugendliche am BFI Oberösterreich
2000 Ausbildung zum Klinischen- und Gesundheitspsychologen und
Legasthienetrainer in Österreich