

Bewegungssteuerung
bei abrupten Veränderungen
dynamischer Transformationen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Philosophie

vorgelegt dem Rat der
Fakultät für Humanwissenschaften und Theologie der
Technischen Universität Dortmund

von
Katrín Miriam Rapp
aus Schorndorf

Dortmund, im März 2010

1. Gutachter: Prof. Dr. H. Heuer
2. Gutachter: Prof. Dr. W. Kunde

Inhaltsverzeichnis

1	Bewegungssteuerung	1
1.1	Fragestellung	2
1.2	Stoppen	5
1.2.1	Die Psychologische Refraktärzeit	5
1.2.2	Der Umkehrgrenzpunkt	7
1.2.3	Unterdrücken versus Beenden einer Bewegung	9
1.3	Dynamische Transformationen	9
1.3.1	Mechanische Eigenschaften	10
1.3.2	Der Dehnungsreflex und seine Komponenten	12
1.3.3	Der Entlastungsreflex	15
1.3.4	Impedanzkontrolle und innere Modelle	16
1.4	Antizipation	19
1.4.1	Antizipation bei selbstbestimmter Bewegungsauslösung	20
1.4.2	Antizipation bei fremdbestimmter Bewegungsauslösung	22
1.5	Ziele	25
2	Experiment 1	27
2.1	Fragestellung	27
2.2	Methode	28
2.2.1	Versuchspersonen	28
2.2.2	Apparatur	28
2.2.3	Aufgabe	30
2.2.4	Design und Ablauf	30
2.2.5	Interaktion biologischer Bewegungen und technischer Systeme	32
2.2.6	Datenanalyse	38
2.3	Ergebnisse	40
2.3.1	Bewegungsmuster	40

2.3.2	Stoppen	41
2.3.3	Zentrale Modulation der Stoppbewegung	46
2.4	Diskussion	49
3	Experiment 2	52
3.1	Fragestellung	52
3.2	Methode	52
3.2.1	Versuchspersonen	52
3.2.2	Design und Ablauf	53
3.2.3	Datenanalyse	53
3.3	Ergebnisse	53
3.3.1	Bewegungsmuster	54
3.3.2	Stoppen	54
3.3.3	Zentrale Modulation der Stoppbewegung	57
3.4	Diskussion	59
4	Experiment 3	64
4.1	Fragestellung	64
4.2	Methode	65
4.2.1	Versuchspersonen	65
4.2.2	Apparatur und Aufgabe	65
4.2.3	Design und Ablauf	65
4.2.4	Datenanalyse	67
4.3	Ergebnisse	67
4.3.1	Bewegungsmuster	67
4.3.2	Stoppen	70
4.3.3	Zentrale Modulation der Stoppbewegung	72
4.4	Diskussion	73
5	Experiment 4	77
5.1	Fragestellung	77
5.2	Methode	78
5.2.1	Versuchspersonen	78
5.2.2	Apparatur und Aufgabe	79

5.2.3	Design und Ablauf	79
5.2.4	Datenanalyse	80
5.3	Ergebnisse	80
5.3.1	Bewegungsmuster	80
5.3.2	Stoppen	82
5.3.3	Zentrale Modulation der Stoppbewegung	86
5.4	Diskussion	86
6	Von neuen Antworten und neuen Fragen	92
6.1	Rückblick	92
6.1.1	Die Rolle der Aufgabe	92
6.1.2	Die Rolle der dynamischen Eigenschaften der Situation	94
6.1.3	Die Rolle von Antizipation – innere Modelle und Strategien	96
6.2	Ausblick...	99
6.2.1	... auf die Forschung	99
6.2.2	... auf die Praxis	100
6.3	Der Forscher und die Welt	101
	Literaturverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	116

1 Bewegungssteuerung

„Ich täusche mich nicht, der menschliche Körper ist
eine Uhr...“

*Julien Offray de La Mettrie,
Der Mensch eine Maschine*

Eine Mischung aus Faszination für den menschlichen Körper und Faszination für die komplexesten Maschinen seiner Zeit, mechanische Uhrwerke, ließ de La Mettrie (1748) ein wunderbar provokantes Werk schreiben. Eines, das während der Aufklärung enorme Sprengkraft besaß, und bei dessen Lektüre man sich auch heute noch verwundert die Augen reibt. Wie jede Analogie bricht letztendlich auch diejenige de La Mettries zusammen, aber die ihm wichtigen Teilaspekte der Teilautonomie und der Modularität des menschlichen Körpers trifft sie in gewissen Maßen recht gut.

Hauptgegenstand des Interesses heutiger Kognitionswissenschaftler¹ ist das Geschehen zwischen Wahrnehmen und Handeln. Wie überdauern die Informationen eines Menschen über sich selbst und seine Umwelt? Wie nutzen Menschen diese Informationen? Wie wirken sich informationsverarbeitende Prozesse auf das Verhalten von Menschen aus? Die Beschreibung dieser Prozesse und Zustände wird dabei mehr oder minder von der Analogie zur digitalen Rechenmaschine, dem technischen Meisterwerk unserer Zeit, geprägt. Auch diese Analogie muss jedoch letztendlich zusammenbrechen (Searle, 1987, 1990, 1992), was letztendlich zu Bemühungen führte, eine ökologischeren Sichtweise auf Wahrnehmen und Handeln zu entwickeln. Dabei haben Ansätze, die auf der dynamischen

¹Die deutsche Sprache bietet leider keine einfache Möglichkeit, die Gleichstellung von Mann und Frau auszudrücken. Auf Grund der besseren Lesbarkeit wird im Rahmen dieser Dissertation auf die Verwendung von Doppelformen verzichtet. Die männliche Form von Substantiven oder Personalpronomen bezieht sich ohne gesonderten Hinweis somit im Folgenden gleichzeitig auf Frauen und Männer.

Systemtheorie gründen, in den letzten Jahren einige Fortschritte erzielt (siehe etwa Carson, 1993; Keijzer, 2002; Kelso, 1995; Schöner & Kelso, 1988) und für einen wachsenden Diskussionsbedarf gesorgt. Aus Sicht der dynamischen Systemtheorie macht etwa die Frage nach der zentralnervösen Steuerung von Bewegungen keinen Sinn. Es wird vielmehr angenommen, dass Verhalten sich via Selbstorganisation aus dem System heraus in Interaktion mit den jeweiligen gültigen Randbedingungen ergibt (Kelso, 1995; Turvey, 2007). Welche Rolle dann allerdings der Wille spielt (weiter siehe etwa Deecke, 1996; Libet, 1999; Stapp, 1999), ist eine der entscheidenden offenen Fragen an die Vertreter der dynamischen Systemtheorie (Keijzer, 2002).

Die vorliegende Arbeit basiert in vielen ihrer Annahmen und Fragen auf den Vorstellungen und Erkenntnissen über den Menschen als informationsverarbeitendes System. Diese Tatsache beeinflusst die Formulierung der Fragen und die Interpretation der Ergebnisse – die Ergebnisse selbst jedoch existieren letztendlich unabhängig von der Theorie. Letzteres ist einer der Gründe, warum es sich heute noch lohnt, de la Mettrie zu lesen.

1.1 Fragestellung

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit ist die nach der zentralen Modulierbarkeit der Bewegungssteuerung unter abrupten dynamischen Transformationen² und wurde aus einem Problem der Anwendung heraus entwickelt.

Für Patienten bringt die minimalinvasive Chirurgie vor allem eine Reduktion der Belastung mit sich; die Operationsdauer sowie der Klinikaufenthalt werden verkürzt und Schmerzen verringert (MacFarlane, Rosen, Hannaford, Pellegrini & Sinanan, 1999). An die Chirurgen stellt sie jedoch neue Anforderungen – sowohl visuelle als auch haptische Rückmeldung sind gegenüber offenen Operationsmethoden stark eingeschränkt oder verfälscht³. Hauptverantwortlich für die Verzerrung der haptischen Informationen sind ne-

²„Dynamisch“ bezieht sich hier auf die physikalische Teildisziplin, die sich mit der Wirkung von Kräften befasst, die Dynamik. Eine dynamische Transformation beschreibt damit allgemein eine Veränderung der auftretenden Kräfte.

³Klatzky und Lederman (2002) untergliedern den Tastsinn in kutane, kinästhetische und haptische Sinneseindrücke. Dabei spricht das kutane System auf die Stimulation von Mechanorezeptoren in der Haut an und das kinästhetische auf Stimulationen der Mechanorezeptoren in Muskeln, Sehnen

ben der Länge der Instrumente die Kräfte, die an der Eintrittsstelle der Instrumente, dem Trokar, wirken (Zhou, Perreault, Schwaitzberg & Cao, 2008). Sind die Kräfte, welche am Operationsort selbst wirken, relativ dazu sehr klein, kann das zu Problemen führen. So kommt es etwa vermehrt zum Reißen des Fadens beim Verknoten von Nähten (Okamura, 2008). Auch diagnostische Aufgaben wie das Ertasten von Entzündungen oder verhärtetem Gewebe werden ohne haptische Rückmeldung erschwert (MacFarlane et al., 1999). Ähnliches gilt für Biopsien und die Periduralanästhesie, bei der sich der Chirurg mit Hilfe der haptischen Rückmeldung orientiert (Magill, Anderson, Anderson, Hess & Pratt, 2004).

Robotersysteme können eingesetzt werden, um die Kräfte, welche am Operationsort wirken, ohne störende Einflüsse an den Chirurgen zu übermitteln. Diese Technik lässt jedoch eine noch weitreichendere Unterstützung zu. So können mittlerweile auch Kräfte, die unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen, messtechnisch erfasst werden (Peirs et al., 2004; Pillarisetti, Anjum, Desai, Friedman & Brooks, 2005). Werden sie im Anschluss skaliert, so dass sie wahrnehmbar werden, können damit etwa die Erfolgsraten intrazytoplasmatischer Spermieninjektionen erhöht werden (Pillarisetti et al., 2005). Wagner und Howe (2005) konnten weiter zeigen, dass eine künstliche haptische Rückmeldung auch der passiven Führung dienen kann. Damit wird Fehlern entgegengewirkt, ehe sie überhaupt wahrgenommen und korrigiert werden können. So kann etwa beim Freilegen von Arterien der mechanische Kontrast zwischen Arterie und umgebendem Gewebe als Führung dienen und das Risiko der Beschädigung der Arterie reduzieren (Wagner, Stylopoulos, Jackson & Howe, 2007). Darüber hinaus ist es auch denkbar, Kräfte zu generieren, die über kein Pendant zur Wirklichkeit verfügen, gewissermaßen „virtuelle Lineale“ oder „Schutzwälle“, welche als physikalische Barrieren dienen und Fehler reduzieren, ohne die Aufmerksamkeitsressourcen stark zu belasten.

Während manche dieser Ideen bereits von den Ingenieurwissenschaften umgesetzt und untersucht werden, mangelt es dabei aus dem Blickwinkel der Psychologie an einem systematischen Vorgehen bei der Entwicklung und Evaluation dieser Mensch-Maschine-Systeme. Es gibt nur wenige Arbeiten, die versuchen, die theoretische Fundierung die-

und Gelenken. Von Haptik sprechen sie, wenn Rezeptoren beider Systeme auf eine mechanische Stimulation ansprechen. Haptische Informationen betreffen also die Wahrnehmung von Kräften.

ser Entwicklungsarbeit voranzutreiben (Arnold & Farrell, 2002; Wagner & Howe, 2007; Wagner et al., 2007), damit steht aber mehr das Lernen als die Bewegungssteuerung im Vordergrund. Von psychologischer Seite aus ist die Rolle der künstlichen haptischen Rückmeldung im Rahmen von Aufgaben, wie sie die minimalinvasive Chirurgie stellt, noch weitgehend unerforscht. Allerdings werden künstliche haptische Rückmeldungen in der Grundlagenforschung zur Bewegungssteuerung standardmäßig eingesetzt (Franklin, Osu, Burdet, Kawato & Milner, 2003; Lai, Hodgson & Milner, 2003; Liu & Reinkensmeyer, 2007; Takahashi, Scheidt & Reinkensmeyer, 2001). An der Diskrepanz zwischen ingenieurwissenschaftlichem und psychologischem Einsatz der haptischen Rückmeldung setzt die vorliegende Arbeit an. Sie verknüpft beide Zugänge, indem sie den Umgang mit haptischer Rückmeldung wie sie in der minimalinvasiven Chirurgie vorkommen kann aus der Perspektive der psychologischen Grundlagenforschung betrachtet.

Als Vorlage für die experimentelle Aufgabe dienen chirurgische Aufgaben, die eine mehr oder weniger abrupte dynamische Transformation umfassen. Solche Aufgaben finden sich bei der Periduralanästhesie, bei der intrazytoplasmatischen Spermieninjektion sowie bei Biopsien (Magill et al., 2004; Pillarisetti et al., 2005). Gemeinsam ist diesen Aufgaben dass es beim Austritt aus einer Gewebeschicht zu einer abrupten dynamischen Transformation kommt, wobei die den Eingriff durchführende Person sofort ihre Bewegung abbremsen muss, um den Patienten, beziehungsweise die Zellmembran der Eizelle nicht zu schädigen. Zur Umsetzung dynamischer Transformationen werden dabei positionsabhängige Kraftfelder⁴ eingesetzt. Die Eigenschaften der Kraftfelder und die Vorhersagbarkeit der dynamischen Transformation werden variiert, um die Frage nach den Randbedingungen, welche die Leistung in solchen chirurgischen Aufgaben modulieren, zu beantworten.

Drei Teilbereiche der psychologischen Forschung zur Bewegungssteuerung lassen sich auf das für diese Arbeit entwickelte Paradigma anwenden. Das ist zum einen die Forschung zum Stoppen (siehe Abschnitt 1.2) von Bewegungen. Dabei liegt der Fokus allerdings meist auf der Unterdrückung von geplanten Reaktionen und weniger auf dem

⁴Unter einem Kraftfeld wird in Bezug auf die in Kapitel 2 – 5 beschriebenen Experimente eine Kraft verstanden, die in Abhängigkeit der Position der Hand auf- oder abgeschaltet wird. In den letzten beiden Experimenten wird das Abschalten dieses Feldes von einer zeitlichen Größe geregelt.

Beenden von laufenden Bewegungen. Es gibt allerdings neuere Arbeiten, die sich sowohl mit dem Beenden von Bewegungen beschäftigen als auch mit dem Verhältnis zwischen Unterdrücken und Beenden von Bewegungen. Zweitens gibt es in der psychologischen Forschung auch einen großen Teilbereich, der sich mit den physiologischen und mechanischen Randbedingungen der Bewegungsforschung beschäftigt (siehe Abschnitt 1.3). Als dritten wichtigen Teilaspekt sollen hier kognitive Randbedingungen behandelt werden (siehe Abschnitt 1.4). Sie bedingen zusammen mit den physiologischen und mechanischen Randbedingungen letztendlich das Ausmaß der willkürlichen Beeinflussbarkeit und der Lernbarkeit von Bewegungen. Im Rahmen des entwickelten Paradigmas wird insbesondere die Rolle der zeitlichen, im Gegensatz zur ereignisbezogenen, Vorhersagbarkeit untersucht.

1.2 Stoppen

Aus psychologischer Sicht ist Stoppen eine kognitive Funktion (Aron, 2009) und letztendlich Kern jeglicher Art kognitiver Kontrolle (Logan, 1994). Neben dem Beenden von laufenden Bewegungen ist das Unterdrücken geplanter Bewegungen eine wichtige Kontrollfunktion, die bei bestimmten psychopathologischen Erkrankungen, etwa dem Aufmerksamkeitsdefizit-Syndrom eingeschränkt ist (Nigg, 2000). Stoppen als kognitive Kontrollfunktion beinhaltet also zwei Aspekte: zum einen die Inhibition einer geplanten Bewegung, zum anderen das Beenden einer bereits laufenden Bewegung (Sosnik, Shemesh & Abeles, 2007). Der zeitlichen Kontrollierbarkeit motorischer Reaktionen sind allerdings Grenzen gesetzt, was vor allem zwei wichtige theoretische Konzepte aufzeigen: zum einen die psychologische Refraktärzeit, zum anderen der Umkehrgrenzpunkt⁵.

1.2.1 Die Psychologische Refraktärzeit

In nicht hinreichender Analogie zur physiologischen Refraktärzeit wird mit der psychologischen Refraktärzeit die Beobachtung bezeichnet, dass sich die Reaktion auf den späteren zweier in kurzer Folge dargebotenen Reize verzögert (Pashler, 1994; Vince, 1948; Welford, 1952; Williams, 1971, 1074). Sie ist als Variante der Doppelaufgaben-Interferenz auffassbar (Horstmann, 2003). Erklärt wird dieser Effekt mit der Annahme, dass Teile der

⁵Hierbei handelt es sich um die Übersetzung des geläufigeren englischen Begriffs *point of no return*.

Informationsverarbeitung auf einem einzelnen Kanal stattfinden, so dass einkommende Signale seriell abgearbeitet werden müssen (Pashler, 1994; Welford, 1952). Wo sich genau dieser „Flaschenhals“ befindet, wird dabei allerdings noch diskutiert (Hommel, 1998; Horstmann, 2003; Logan, 1994). Der Effekt der psychologischen Refraktärzeit tritt ein, wenn der zeitliche Abstand zweier Reize, der Interstimulus-Intervall (ISI)⁶ so kurz wird, dass sich die Reaktion auf den zweiten Reiz verzögert: erfolgt der zweite Reiz zu einem Zeitpunkt, an dem der erste noch abgearbeitet wird, gerät er quasi in eine Warteschleife.

War zunächst die Initialisierung von Bewegungen Gegenstand des Interesses, untersuchten Vince und Welford (1967) auch das Inhibieren und Ändern einer geplanten Bewegung. Auf einem sich drehenden Kymographen präsentierten sie ihren Versuchspersonen blaue Linien, welche diese langsam und gleichmäßig nachzeichnen sollten. Hin und wieder tauchten rote Linien auf, je nach Bedingung sollten diese mit maximaler Geschwindigkeit oder gar nicht gezeichnet werden. Eine weitere Experimentalgruppe zeichnete die blauen Linien so schnell als möglich und die roten langsam und gleichmäßig. Der Abstand der Linien und damit der Interstimulus-Intervall wurde variiert. Während sich für das Stoppen und die Verlangsamung der Bewegung eine Verlängerung der Reaktionszeit auf den zweiten Reiz ergab, war das für die Beschleunigung nicht der Fall. Im Unterschied zu den ersten beiden Bedingungen mussten für die Beschleunigung keine antagonistischen Muskelgruppen aktiviert werden (zur Änderung von Bewegungen siehe auch Brebner, 1968).

Henry und Harrison (1961) ließen ihre Versuchspersonen schnelle Armschwünge ausführen und kamen ebenfalls zum Ergebnis, dass das Stoppen dieser Bewegung einer Refraktärzeit unterlag, was Williams (1971) replizieren konnte. Solche Bewegungen sind allerdings per se schlecht kontrollierbar und konnten nicht gestoppt werden. So wurde für die Auswertung der Zeitpunkt herangezogen, an dem die Beschleunigung negativ wurde. Ob sich anhand solcher Bewegungen insgesamt ein realistisches Bild des Stoppens von

⁶In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff synonym zur Reizbeginnasynchronie verwendet (englisch: *stimulus onset asynchrony*). Streng genommen bezeichnet der Interstimulus-Intervall jedoch die Zeit zwischen Ende des ersten und Beginn des zweiten Reizes, während die Reizbeginnasynchronie sich auf die Zeit zwischen Beginn des ersten und Beginn des zweiten Reizes bezieht.

Bewegungen ergibt, ist fraglich. Kürzlich wies allerdings Horstmann (2003) mit deutlich weniger ballistischen Tippbewegungen ebenfalls eine Refraktärzeit nach, die sich für das Fortführen einer Bewegung nicht fand (vergleichbar dazu siehe Vince & Welford, 1967).

Logan und Burkell (1986) zweifeln daran, dass Bewegungsausführung und Bewegungsabbruch, das heißt das Beenden einer laufenden Bewegung, tatsächlich vergleichbare Reaktionen sind. Sie finden für die Unterdrückung von Reaktionen keine Refraktärzeit (siehe auch Logan, 1994; Logan & Cowan, 1984).

1.2.2 Der Umkehrgrenzpunkt

Beobachtungen zur Inhibition von Bewegungen, welche die typische Doppelaufgaben-Interferenz nicht zeigten (Horstmann, 2003), brachten Logan und Kollegen dazu, ein Wettlaufmodell zu entwickeln, das für kurze Interstimulus-Intervalle eine erfolgreiche Inhibition vorhersagt, nicht jedoch für lange (Boucher, Palmer, Logan & Schall, 2007; Logan, 1994; Logan & Cowan, 1984).

Logan und Kollegen nehmen an, dass die Kontrolle Zeit braucht und entwickeln ein Modell, welches unter bestimmten Annahmen erlaubt, die Latenzzeit nicht-beobachtbarer Kontrollhandlungen, wie es das Unterdrücken einer Bewegung darstellt, zu schätzen. Das Modell nimmt an, dass bei kurzem Aufeinanderfolgen zweier Signale, wobei das zweite Signal nur gelegentlich auftritt und die Unterdrückung der Reaktion auf das erste Signal anweist, die beiden Reaktionen um die Wette laufen. Kann der Prozess der Inhibition den der Reaktion auf das erste Signal noch einholen, kann eine Bewegung erfolgreich unterdrückt werden; andernfalls kommt sie zur Ausführung. Die imaginäre Ziellinie dieses Wettlaufs ist der Umkehrgrenzpunkt, der Punkt also, an dem eine Handlung nicht mehr zurückgehalten werden kann.

Zur Messung der Latenzzeit der Inhibition, die per definitionem nicht beobachtbar ist, entwickelten Logan und Kollegen (siehe etwa Boucher et al., 2007; Logan, 1994; Logan & Cowan, 1984) das Stoppsignal-Paradigma, bei dem den Versuchspersonen zunächst ein Startsignal dargeboten wird, auf das sie, meist mit einem Tastendruck, reagieren müssen. Bestenfalls in etwa 25 % der Durchgänge (zur Diskussion der Häufigkeit von Stoppsignalen siehe zum Beispiel Logan, 1994) wird den Versuchspersonen ein zweites

Signal präsentiert, ein Stoppsignal, das sie anweist, die Bewegung zurückzuhalten. Über die Variation der Verzögerung des Stoppsignals relativ zum Startsignal und den Prozentsatz erfolgreich inhibierter Reaktionen, wird auf die zugrunde liegenden Prozesse, konkret auf die Zeit, welche der Prozess der Inhibition benötigt, zurückgeschlossen.

Dabei gilt dasselbe wie bei der Diskussion um den „Flaschenhals“: der genaue Ort des Umkehrgrenzpunktes ist umstritten (Band & van Boxtel, 1999; De Jong, Coles, Logan & Gratton, 1990; McGarry & Franks, 2000). Auch der Vorschlag De Jong, Coles und Logan (1995), dass es sowohl einen zentralen als auch einen peripheren Mechanismus zur Inhibition gebe, ist nicht unumstritten. So halten Band und van Boxtel (1999) diese Annahme nach der Untersuchung der physiologischen Möglichkeiten zur peripheren Inhibition für vorschnell und plädieren für einen zentralen Mechanismus.

Einen anderen Weg, um die Latenz der Unterdrückung einer Bewegung zu untersuchen, sind Walsh und Haggard (2007) gegangen. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, auf ein Startsignal mit einer Handbewegung zu reagieren und diese alternativ auf ein Stoppsignal hin zu unterlassen. Diese Aufgabe kann dabei als ein Sonderfall des Stoppsignal-Paradigmas angesehen werden, bei dem der Interstimulus-Intervall stets null ist. Um hier die Latenz von Inhibition aufzudecken, brauchen Walsh und Haggard kein mathematisches Modell wie Logan und Kollegen. Sie machen sich den Effekt der sensorischen Unterdrückung zunutze und nehmen an dass es nach der Initialisierung einer Bewegung zu einer Abnahme der sensorischen Empfindlichkeit kommt. Da sie auch in Durchgängen mit erfolgreicher Inhibition eine sensorische Unterdrückung finden, nehmen sie an, dass diese mit durch die Bewegungsvorbereitung verursacht werden kann. Die Dauer der reduzierten sensorischen Empfindlichkeit bei erfolgreicher Unterdrückung der Reaktion kann danach ihrerseits dazu verwendet werden, die Zeit zu schätzen, die benötigt wird, um eine geplante Bewegung vollständig abubrechen. Als Reiz verwenden die Autoren milde Elektroschocks, deren An- beziehungsweise Abwesenheit die Versuchspersonen rückmelden müssen. Wird ein Elektroschock nicht entdeckt, spricht das dafür, dass der Prozess der Inhibition noch im Gange ist.

Mit dieser Methode geschätzte Latenzzeiten für die Inhibition einer Bewegung bestätigen die mit dem Stoppsignal-Paradigma gewonnen Ergebnisse, ohne jedoch die theo-

retischen Annahmen des Wettlaufmodells vorauszusetzen. Das Stoppen einer geplanten Bewegung benötigt also an sich Zeit. Nach Logan (1994) schließt sich daran allerdings keine Refraktärzeit an.

1.2.3 Unterdrücken versus Beenden einer Bewegung

Während also angenommen werden kann, dass das Initialisieren von Bewegungen und das Stoppen offener Bewegungen der Refraktärzeit unterliegt, scheint das für die Unterdrückung geplanter Bewegungen, sowie für die Neuorganisation von Bewegungen, sofern die gleichen Muskelgruppen involviert sind, nicht zu gelten. Das Unterdrücken einer Bewegung scheint damit anderen Gesetzmäßigkeiten zu unterliegen, als das Stoppen laufender Bewegungen (siehe jedoch Morein-Zamir, Chua, Franks, Nagelkerke & Kingstone, 2006, 2007; Morein-Zamir, Nagelkerke, Chua, Franks & Kingstone, 2004).

Ungeachtet der Frage danach, wann man genau vom Beginn einer Bewegung sprechen sollte (Kornhuber & Deecke, 1965; Libet, 2006; Requin, Brener & Ring, 1991), lassen sich die unterschiedlichen theoretischen Konstrukte zu Unterdrücken und Beenden von Bewegungen gut in eine gemeinsame Vorstellung integrieren (Horstmann, 2003). Darin bildet der Umkehrgrenzpunkt gewissermaßen die Demarkationslinie zwischen interferenzfreier Unterdrückung einerseits und dem durch Interferenz beeinflussten Beenden einer Bewegung andererseits.

1.3 Dynamische Transformationen

In der Mechanik beschreibt die Kinematik die Bewegung eines Körpers und die diese Bewegung verursachenden Kräfte. So unterliegt das Gehen an Land anderen dynamischen Bedingungen als das Waten im Wasser. Dynamische Transformationen sind Veränderungen der Kräfte, welche eine Bewegung mit formen und lassen sich künstlich generieren. Dabei greifen die Versuchspersonen im Allgemeinen einen Roboterarm, der an Servomotoren angeschlossen ist und die aufgeschalteten Kräfte auf die Finger, die Hand oder auch auf den Arm der Versuchsperson überträgt. Kraftfelder sind die so entstehenden dynamischen Umgebungen (siehe auch Seite 4 oder zum Beispiel Liu & Reinkensmeyer, 2007).

Kraftfelder werden häufig eingesetzt, um die Bedingungen des Bewegungslernens zu untersuchen (zum Beispiel Flash & Mussa-Ivaldi, 1990; Scheidt, Dingwell & Mussa-Ivaldi, 2001). Die hohe Flexibilität der Programmierung von Kraftfeldern macht eine klare Klassifizierung verwendeter Kraftfelder wenig sinnvoll; grob lassen sich jedoch geschwindigkeitsabhängige Kraftfelder, bei denen die Eigenschaften des Kraftfeldes von der Geschwindigkeit der Bewegung der Versuchsperson abhängt (Liu & Reinkensmeyer, 2007; Milner & Franklin, 2005), von positionsabhängigen Kraftfeldern unterscheiden. Bei letzteren sind die Eigenschaften der Kraftfelder, wie ihre Stärke und Richtung, von der Position im Kraftfeld abhängig. So wird etwa bei divergierenden Kraftfeldern die Hand der Versuchsperson von der optimalen Linie abgetrieben, sobald sie diese verlässt (zum Beispiel Franklin et al., 2003; Hinder & Milner, 2005).

Kraftfelder werden darüber hinaus aber auch dazu eingesetzt, um die mechanischen Eigenschaften des menschlichen Bewegungsapparates in vivo zu messen (Burdet et al., 2000; Flash & Mussa-Ivaldi, 1990). Denn Bewegung ist letztendlich kein rein kognitiver Prozess. Pflanzen etwa verfügen nicht über ein Nervensystem und dennoch bewegen sie sich aktiv auf ganz unterschiedliche Art und Weise (zum Blattschluss siehe etwa Kato, Nagano, Yamamura & Ueda, 2003). Beim Menschen spielen mechanische Eigenschaften der Effektoren, hier im Besonderen des Armes, über das zentrale und periphere Nervensystem hinaus eine wichtige Rolle bei der Bewegungsausformung; das gilt im Besonderen für die Masse und die Steifigkeit.

1.3.1 Mechanische Eigenschaften

Wird ein Arm durch eine kurze Störung von außen aus seiner Ruhelage oder seiner Bewegungsbahn gebracht, tendiert er dazu, wieder in seine Ausgangslage zurückzukehren. Wie weit der Arm von seiner Ausgangslage abgelenkt wird, hängt dabei unter anderem von der Masse des Armes, der Haltung des Armes und auch der Richtung der Störkraft ab⁷. Die Tatsache, dass der Arm in Richtung seiner Ruheposition zurückkehrt, hängt mit dem Aufbau der Muskeln und Sehnen zusammen. Muskeln bestehen aus seriell und parallel angeordneten elastischen Elementen, die der Verlängerung des Muskels entgegen wirken. Dadurch verhalten sich Muskeln unter Dehnung physikalisch gesehen wie eine Feder. Diese Eigenschaft übt einen großen Einfluss auf Bewegungen aus und führte zur

⁷Weitere Einflussgrößen sind etwa Reibung und Gravitation.

Formulierung einer Reihe von Masse-Feder-Modellen, wobei vor allem das α -Modell eine zentrale Rolle für die mechanischen Muskeleigenschaften annimmt (McIntyre & Bizzi, 1993; Nichols, 1985).

Da der Trägheitswiderstand, die Kraft also welche ein Körper in Folge seiner Trägheit einer beschleunigenden Kraft entgegengesetzt, richtungsabhängig ist, hängt die Weite der Auslenkung, die eine Störung bewirkt, von der Richtung ab, aus der die Störkraft kommt (Flanagan & Lolley, 2001; Gordon, Ghilardi, Cooper & Ghez, 1994). Zur Trägheitsanisotropie kommt es also, weil sich die zu beschleunigende Masse des Armes relativ zum Winkel, aus dem die Kraft kommt, ändert. Wirkt die Kraft orthogonal zum Arm, so fällt die Auslenkung deutlich größer aus als wenn die Kraft entlang des Armes wirkt.

Die mechanische Impedanz⁸ beschreibt im Besonderen den Widerstand, der einer Schwingungsausbreitung entgegengesetzt wird (Aldien, Marcotte, Rakheja & Boileau, 2005; Kuhn, 1953), allgemeiner den Widerstand der einer Bewegung entgegen gesetzt wird. Die Impedanz hängt von mehreren Faktoren ab, darunter die Masse, die Dämpfungseigenschaften, die Reibung, die Elastizität der Muskeln (De Serres & Milner, 1991), die Armstellung (Milner, 2002b; Zago, McIntyre, Senot & Lacquaniti, 2009) und die Steifigkeit des Armes (Lacquaniti, Licata & Soechting, 1982). Die Steifigkeit hängt ihrerseits vom Muskeltonus (Fisk, Lackner & DiZio, 1993), von den Gelenkwinkeln, der Winkelgeschwindigkeit, sowie der Höhe des Störimpulses ab (Burdet et al., 2000). Sie ist darüber hinaus im hohen Maße willentlich beeinflussbar.

Normalerweise führt die reziproke Innervation dazu, dass der Antagonist entspannt wird, was den Vorteil hat, dass die Geschwindigkeit und Effizienz der Bewegungen gesteigert werden kann, weil der Agonist nicht gegen den Antagonist anarbeiten muss (Pearson & Gordon, 2000b). Die gleichzeitige Aktivierung von Agonist und Antagonist führt allerdings zur Versteifung des Hand-Arm-Systems, was einer Erhöhung der Impedanz gleichkommt. Das ist zwar nicht energieeffizient, führt allerdings zu einer geringeren Anfälligkeit gegenüber Störungen von außen. Bei der Anpassung an neue dynamische Situationen, beziehungsweise an Kraftfelder, spielt deshalb die Kontrolle der Impedanz per Kokontraktion eine wichtige Rolle. Hauptsächlich in schlecht vorhersagbaren oder

⁸Im Folgenden steht dafür kurz Impedanz.

instabilen Kraftfeldern greift das zentrale Nervensystem auf die Impedanzkontrolle per Kokontraktion zurück (De Serres & Milner, 1991; Lai et al., 2003; Milner, 2002a, 2004; Milner & Cloutier, 1993). Unter instabilen Bedingungen dient sie dazu die Hand- beziehungsweise Armhaltung zu stabilisieren und vor Störungen zu „schützen“ (zu Umständen unter denen eine hohe Steifigkeit destabilisierend wirken kann, siehe Davidson & Wolpert, 2003). Die Steifigkeit kann dabei in Abhängigkeit von der Richtung, aus der eine Störung erwartet wird, moduliert werden (Franklin et al., 2007).

Auch der Dehnungsreflex wirkt einer Störung von außen entgegen; dass er zur Kompensation größerer Störungen in der Lage ist, gilt jedoch als ausgeschlossen (De Serres & Milner, 1991; Pearson & Gordon, 2000b). Allerdings verstärkt der Dehnungsreflex die Federeigenschaften der Muskeln (Pearson & Gordon, 2000b), was zusätzlich zu seiner Modulierbarkeit dazu geführt hat, dass ihm im Rahmen des λ -Modells (verwandt mit dem α -Modell, vergleiche Seite 11) eine zentrale Rolle bei der Steuerung von Bewegungen zugeschrieben wird. Dabei gehen die Vertreter des Modells davon aus, dass das zentrale Nervensystem Bewegungen über die Regulation der Aktivierungsschwellen der Reflexe steuert (Archambault, Mihaltchev, Levin & Feldman, 2005; Gribble & Ostry, 2000). Die Masse-Feder-Modelle sind jedoch nicht sehr erfolgreich beim Erklären komplexerer Bewegungen, also solchen, die mehr als ein Gelenk umfassen. Darüber hinaus werden auch einige ihrer Grundannahmen, wie etwa dass die Trägheit über weite Strecken einer Bewegung konstant bleibt, in Frage gestellt (Kalenscher, Kalveram & Konczak, 2003). Die Bedeutung des Dehnungsreflexes für die Bewegungssteuerung ist allerdings auch außerhalb der Diskussion um die Masse-Feder-Modelle von Bedeutung und seine zentrale Modulierbarkeit ist mit ein Grund dafür.

1.3.2 Der Dehnungsreflex und seine Komponenten

Reflexe sind keine starre, immer gleiche Reaktionen auf einen Reiz; Intensität und sogar Richtung eines Reflexes sind beeinflussbar (zur Reflexumkehr bei der Lokomotion siehe zum Beispiel Pearson & Gordon, 2000a). Auch der Dehnungsreflex weist komplexe Wirkmechanismen auf, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Wird ein Muskel gedehnt, führt das in Länge und Stärke entsprechend zunächst zur Entstehung von Aktionspotentialen in sensorischen Neuronen; wird die Aktivierungs-

schwelle überschritten, so werden diese an Motoneuronen weiter gegeben. Wird auch deren Aktivierungsschwelle überschritten, kommt es zu einer Kontraktion des Muskels, der der Dehnung entgegen wirkt. Es kommt zum Reflex. Anzahl und Dauer der Aktionspotentiale bedingen dabei letztendlich die Stärke des Reflexes.

Für den Dehnungsreflex werden im Elektromyogramm (EMG) zwei Komponenten identifiziert. Sie werden als kurze beziehungsweise lange Komponente des Dehnungsreflexes bezeichnet. Die dritte Spitze im EMG, M3, gilt im Allgemeinen als Beginn der Reaktionszeit, so genannte getriggerte Reaktionen tauchen jedoch noch früher im EMG auf (siehe Abschnitt 1.3.2).

M1

Die erste im EMG sichtbare Komponente, auch M1 genannt, taucht nach 25 – 50 ms auf (Gielen, Ramaekers & van Zuylen, 1988). Sie wird durch die monosynaptische Verschaltung von Muskelspindelafferenzen zu Motoneuronen im Rückenmark hervorgerufen (Pearson & Gordon, 2000b) und nimmt mit dem Alter ab (Corden, Lippold, Buchanan & Morington, 2000), was vermutlich auf den abnehmenden Muskeltonus zurückzuführen ist. Sie gilt als stereotyp (Al-Falahe & Vallbo, 1988; Newell & Houk, 1983) und nicht veränderbar (siehe jedoch Mutha, Boulinguez & Sainburg, 2008).

M2

Auch die zweite EMG-Komponente, die nach etwa 50 – 75 ms auftaucht, liegt vor der willkürlichen Reaktionsschwelle und gilt damit als Reflex. Sie unterscheidet sich, wie Corden et al. (2000) experimentell zeigen konnten, nicht nur in ihrer Latenz, sondern auch in ihrer Variabilität (dazu vergleiche auch Newell & Houk, 1983) und ihrem Ursprung von der M1-Komponente. Corden et al. (2000) fanden heraus, dass die M1-Komponente verschwand, sobald sie einen Reflex auslösten aber den Finger fixierten, so dass es zu keiner Dehnung des Muskels kommen konnte. Indem sie dabei den Reflex nicht über den Muskel auslösten, sondern an der Sehne, konnten sie die M2-Komponente ausschalten, wobei die M1-Komponente erhalten blieb. Während letztere durch Dehnungsrezeptoren im Muskel ausgelöst wird, vermuten sie den Ursprung der M2-Komponente in subkutanen Nervenendigungen oder solchen in der Haut.

Die Flexibilität der M2-Komponente ist dabei deutlich höher als die der monosynaptisch verschalteten M1-Komponente. So konnten Gielen et al. (1988) zeigen, dass die M2-Komponente ein mit willkürlichen Bewegungen vergleichbares, koordinatives Aktivierungsmuster aufweist. Ihre Versuchspersonen sollten Störkräfte kompensieren, die an ihrem Handgelenk wirkten. In Ausgangsstellung befand sich das Handgelenk in einer neutralen Position zwischen Pronation und Supination; Unterarm und Oberarm befanden sich im rechten Winkel, wobei der Oberarm einen Winkel von 25° zur frontalen Ebene aufwies. Über Elektromotoren wurde eine Hintergrundkraft entweder in Richtung Extension-Flexion oder Pronation-Supination aufgeschaltet, wobei die Versuchspersonen die neutrale Stellung ihrer Hand halten sollten. Zu dieser Hintergrundkraft wurden in zufälligen Abständen für 200 ms Störkräfte aufgeschaltet, die entweder in Richtung der Hintergrundkraft oder in eine andere Richtung wirkten. Mit dieser Methode fanden sie Reflexantworten, die unabhängig von der Dehnung, beziehungsweise der Verkürzung des Muskels auftraten: wurde eine Störkraft in Richtung Pronation vor dem Hintergrund einer Kraft in Richtung Extension aufgeschaltet, nahm die Aktivität im *M.brachialis* ab, ohne dass eine Verkürzung des Muskels auftrat. Für den *M.triceps* fanden sie darüber hinaus eine erhöhte Aktivität, wenn eine Störkraft in Richtung Pronation auf eine Hintergrundkraft in Richtung Flexion oder Pronation aufgeschaltet wurde. Das entspricht einer Situation, in welcher der Muskel nicht gedehnt wurde, konsistenterweise trat die M1-Komponente dabei nicht auf. Auch Nakazawa, Yamamoto und Yano (1997) fanden eine aufgabenabhängige Variation dieser EMG-Komponente.

Der genaue Reflexweg ist allerdings nicht unumstritten, wenn sich auch die Hinweise auf eine Beteiligung des Motorkortex' verdichten (vergleiche jedoch Angel & Weinrich, 1986). So kann eine Dehnung der Muskeln in einer Hand auch eine M2-Komponente gleicher Latenz in der anderen Hand auslösen (Pearson & Gordon, 2000b), was für einen transkortikal verlaufenden Reflexweg spricht. In dieses Bild passt weiter der Befund, dass unter vorhersagbaren Bedingungen die M2-Komponente an Stärke dazu gewinnt (Al-Falahe & Vallbo, 1988) und an Variabilität abnimmt (Crago, Houk & Hasan, 1976). Dabei bezog sich die Vorhersagbarkeit bei Crago et al. (1976) zum Beispiel auf die Richtung aus der eine Störkraft kam. Letztendlich sprechen auch Veränderungen in den Reflexantworten bei Erkrankungen des zentralen Nervensystems für einen transkortikalen Reflexweg (Pearson & Gordon, 2000b).

M3

Willkürliche Reaktionen tauchen nach etwa 120 – 180 ms als dritte Spitze im EMG auf. Es lässt sich jedoch nach 80 – 120 ms noch eine weitere Komponente identifizieren, die jedoch in ihrer Latenz deutlich variabler ist als die beiden früheren Komponenten M1 und M2. Diese Komponente, die sogenannte getriggerte Reaktion, kann durch Instruktion beeinflusst werden, ist willkürlich unterdrückbar (Crago et al., 1976) und wird als eine Art schnelle Reaktionszeit verstanden, bei der bestimmte, noch nicht identifizierte Schritte der kortikalen Verarbeitung umgangen werden (Mutha et al., 2008; Schmidt & Lee, 1999). Es wird angenommen, dass getriggerte Reaktionen in subkortikalen Strukturen abgespeichert werden und durch einen peripheren Reiz, den Trigger, ausgelöst werden. Dieser Reiz dient lediglich der Auslösung der Reaktion und seine Qualität sollte keinen Einfluss auf die Reaktion haben.

1.3.3 Der Entlastungsreflex

Der Entlastungsreflex kann als Inverse des eben beschriebenen Dehnungsreflexes aufgefasst werden (Latash, 2008). Wird ein willkürlich innervierter Muskel abrupt entlastet, tritt nach einer Latenz, die mit der Latenz des Dehnungsreflexes vergleichbar ist, eine Innervationsstille auf. Diese Innervationsstille kann bis hin zur vollständigen Inaktivität des Muskels führen (Latash, 2008; Struppler, Landau & Mehls, 1969). Darauf folgt als zweite Komponente des Entlastungsreflex ein Erregungsrückschlag (Struppler et al., 1969).

Die Innervationsstille, die auf eine abrupte Entlastung eines Muskels folgt, kann dabei nicht mit der reziproken Inhibition erklärt werden. Zwar kommt es bei der Aktivierung des Antagonisten durch den Dehnungsreflex theoretisch zur Inhibition des Agonisten, allerdings widerspricht das dem Befund, dass die Innervationsstille meist zeitlich vor dem Dehnungsreflex auftritt (Angel, Eppler & Iannone, 1965; Struppler et al., 1969). Struppler et al. (1969) halten eine zusätzliche, auf den Entlastungsreflex folgende reziproke Inhibition für unwahrscheinlich, können Sie jedoch nicht ausschließen.

Neben der Tatsache, dass die Paradigmen zur Untersuchung des Entlastungsreflexes denen zum Dehnungsreflex entsprechen, finden sich auch vergleichbare Befunde. Wird

eine Verkürzung des Agonisten verhindert, zeigt sich – übereinstimmend mit dem Fehlen des Dehnungsreflexes bei ausbleibender Dehnung des Muskels – auch keine Innervationsstille (Angel et al., 1965). Mit einem Paradigma ähnlich dem von Gielen et al. (1988), siehe auch Seite 14, konnten Evarts (1976) ebenfalls eine Abhängigkeit des Entlastungsreflexes von der Aufgabe nachweisen (siehe auch Angel & Weinrich, 1986). Diese willkürliche Beeinflussbarkeit spricht wiederum für eine supraspinale Modulation des Entlastungsreflexes. Gleiches gilt für Veränderungen von Stärke und Latenz des Entlastungsreflexes bei Erkrankungen oder Verletzungen des Zentralen Nervensystems (Angel & Goldstein, 1983; Angel & Lewitt, 1978; Struppler et al., 1969), so findet sich zum Beispiel bei Ataxien ein verspätetes Einsetzen der Innervationsstille und bei Parkinson-Patienten eine Verstärkung des Erregungsrückschlags. Allerdings sollte erwähnt werden, und das gilt auch für den Dehnungsreflex, dass der zentralnervösen Modulation Grenzen gesetzt sind (zum Beispiel Angel & Weinrich, 1986). Meist findet sich lediglich eine Änderung der in Latenz oder Stärke des Reflexes, beziehungsweise seiner Komponenten.

1.3.4 Impedanzkontrolle und innere Modelle

Das Zusammenspiel von Dehnungs- und Entlastungsreflex beeinflusst die Steifigkeit der Effektoren (Houk, 1979) und wirkt dämpfend gegenüber Störungen von außen. Reflexe werden jedoch per definitionem von einem Reiz ausgelöst, hier der Störung selbst, so dass der Störung erst nach ihrem Eintritt entgegen gewirkt werden kann. Auf eine Möglichkeit, ungewünschten Bewegungen schon vor einer Störung entgegen zu wirken, wurde bereits hingewiesen (siehe Seite 11). Die Impedanzkontrolle bringt allerdings wie erwähnt einige Nachteile mit sich, unter anderem die hohen Energiekosten und die reduzierte Sensibilität gegenüber äußeren Reizen (Wise, Gregory & Proske, 1998). Ist man einem Störreiz mehrfach ausgesetzt und ist er regelhaft genug, dass man ihn bezüglich seiner Qualität, etwa seines Zeitpunktes, seiner Dauer, seiner Intensität oder seiner Richtung vorhersagen kann, ist man in der Lage ein inneres Modell der dynamischen Transformation zu bilden.

Unter einem inneren Modell verstehen Wolpert und Kawato (1998) ein System, welches das Verhalten eines natürlichen Prozesses nachbildet. Das Problem der menschlichen Bewegungssteuerung formulieren sie folgendermaßen: gesucht wird der Bewegungsbefehl, also die Eingangsgröße, welche die gewünschte Bewegung erzielt, also die gewünschte sensorische Rückmeldung hervorruft. Ausgehend davon unterscheiden sie zwei Arten

innerer Modelle: inverse Modelle und Vorwärtsmodelle. Inverse Modelle liefern den Bewegungsbefehl. Sie invertieren unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften des Bewegungsapparates und der dynamischen Randbedingungen aus der Umwelt das System und sind so in der Lage, denjenigen Bewegungsbefehl vorherzusagen, der den gewünschten Effekt bewirkt (Wolpert & Kawato, 1998). Vorwärtsmodelle sind dagegen in der Lage, die sensorische Information, die eine Bewegung verursachen wird, vorherzusagen und so die Verzögerung, mit der die tatsächliche sensorische Information eintrifft, zu kompensieren (Andani, Bahrami & Jabejdar-Maralani, 2009). Damit können Vorwärtsmodelle der Fehlerkorrektur dienen: stimmen tatsächliche sensorische Information und vorhergesagte sensorische Information nicht überein, kann an Hand dieser Diskrepanz der Bewegungsfehler korrigiert werden (Desmurget & Grafton, 2003). Ähnliche Definitionen finden sich auch bei anderen Autoren (siehe Desmurget & Grafton, 2000; Lai et al., 2003; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Thoroughman & Shadmehr, 1999).

Wenn im Folgenden von inneren Modellen die Rede ist, sind damit inverse dynamische Modelle gemeint, also solche, welche unter Berücksichtigung der dynamischen Transformation die Eingangsgröße für eine Bewegung liefern. Wird eine dynamische Transformation erfolgreich gelernt, ist das innere Modell also korrekt, kann einer Störung schon vor ihrem Auftreten gezielt entgegen gewirkt werden.

Für das Ausbilden innerer Modelle sind allerdings stabile, vorhersagbare Randbedingungen erforderlich und auch dann kostet das Lernen innerer Modelle Zeit. In nicht vorhersagbaren, instabilen oder neuen Situationen greift das zentrale Nervensystem auf die Impedanzkontrolle durch Kokontraktion zurück (Hinder & Milner, 2005); dabei werden Agonist und Antagonist gleichzeitig aktiviert, was zu einer Versteifung des Gelenkes führt und damit zu einer geringeren Anfälligkeit gegenüber Störungen von außen. Im Extremfall schützt die Kokontraktion vor mechanischen und neurologischen Schäden in den Gelenken (Flanders & Soechting, 1990). Neben der eben angesprochenen Stabilisierung gegen Störungen von außen, wird sie bei schnellen Zielbewegungen dazu eingesetzt, die Endposition der Hand zu stabilisieren (Milner, 2002a).

Durch die Kokontraktion von Agonisten und Antagonisten bleibt Spielraum für eine Modulation der Impedanzkontrolle, dennoch ist sie hinsichtlich mehrerer Aspekte

zentralnervös modulierbar. Liu und Reinkensmeyer (2007) wiesen eine Modulation in Abhängigkeit des Vorhandenseins einer Hintergrundkraft nach. Daneben fand Milner (2002a) eine Anpassung der Intensität der Impedanzkontrolle an die Stabilität der Aufgabe. Franklin et al. (2007) fanden schließlich sogar eine Richtungsabhängigkeit der Impedanzkontrolle. Die Impedanz wurde dabei selektiv in die Richtung erhöht, in welcher die Instabilität auftrat.

Das Erlernen innerer Modelle ist die flexibelste Form der Anpassung an dynamische Randbedingungen der Umwelt, allerdings benötigt sie Zeit. Am Anfang des Lernprozesses dominiert noch die Impedanzkontrolle (Liu & Reinkensmeyer, 2007). Milner und Franklin (2005) ließen ihre Versuchspersonen Bewegungen in einem geschwindigkeitsabhängigen Kraftfeld machen und beobachteten ab dem zweiten Durchgang eine antizipatorische Kokontraktion aller Muskeln. Die dadurch erhöhte Stabilität des Effektors begünstigt den Erwerb des inneren Modells. In der Folge, mit fortschreitendem Lernen wird dann in der Regel eine Abnahme der Kokontraktion beobachtet (Franklin et al., 2003; Gribble, Mullin, Cothros & Mattar, 2003; Thoroughman & Shadmehr, 1999). Takahashi et al. (2001) betonen, dass die Impedanzkontrolle auch nach dem Erwerb eines inneren Modells ein wichtiger Bestandteil der Bewegungssteuerung bleibt und beide Formen der Bewegungssteuerung koexistieren können (siehe auch Bays & Wolpert, 2007; Hinder & Milner, 2005).

Innere Modelle sind anders als die Kokontraktion nicht im EMG nachweisbar, sondern werden indirekt über Generalisierung und Nacheffekte aufgedeckt (Davidson & Wolpert, 2003; Lai et al., 2003; Osu, Hirai, Yoshioka & Kawato, 2004; Schabowsky, Hidler & Lum, 2007). Generalisierung meint die Übertragbarkeit des gelernten Modells auf andere Bewegungen, meist Zielbewegungen zu anderen, nicht gelernten Zielen. Wurde ein inneres Modell gebildet, ist die Leistung für nicht gelernte Ziele besser als wenn zuvor kein inneres Modell gebildet wurde. Neben der Generalisierung im Arbeitsraum wird häufig auch die Generalisierung zwischen der linken und rechten Hand untersucht (Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994). Anhand der Generalisierung zeigt sich deutlich die Flexibilität innerer Modelle. Einmal gelernt sind sie über die gelernte Situation hinaus anwendbar. Darüber hinaus können sie sehr stabil sein – Brashers-Krug, Shadmehr und Bizzi (1996) haben Nacheffekte innerer Modelle noch nach mehreren Monaten nachgewiesen. Nach-

effekte zeigen sich, nachdem eine dynamische Transformation gelernt wurde, sie aber nicht mehr wirksam ist. Bevor eine dynamische Transformation erlernt wird, etwa eine Störkraft von der Seite, werden die Bewegungen systematisch von dieser Störkraft verformt. Nach dem Lernen wird die Störkraft so kompensiert, dass die Bewegungen sich nicht mehr von Bewegungen ohne Störung unterscheiden. Nimmt man dann die Störung jedoch wieder weg, kommt es zum Nacheffekt: die Bewegungen sind noch an die nun nicht mehr vorliegende Störung angepasst, wodurch sich Bewegungen ergeben, die spiegelsymmetrisch zu den anfänglich unter der Störkraft durchgeführten Bewegungen sind (Lai et al., 2003).

Der Ausbildung von inneren Modellen sind trotz erstaunlicher Ergebnisse (Osu et al., 2004) Grenzen gesetzt. Werden diese Grenzen überschritten und kann kein inneres Modell aufgebaut werden, wird die Impedanzkontrolle zum wichtigsten Mittel der Bewegungssteuerung (Milner, 2004). Ob Reflexe, Impedanzkontrolle oder innere Modelle die Bewegungssteuerung dominieren, hängt letztendlich von den Randbedingungen ab. Je besser ein Ereignis vorhergesagt werden kann, desto vollständiger kann die Bewegungssteuerung daran anpasst werden, Reflexe und Impedanzkontrolle moduliert beziehungsweise das passende innere Modell abgerufen werden. Bezieht sich die Vorhersagbarkeit auf das Eintreten des Ereignisses selbst, spricht man von ereignisbezogener oder räumlicher (Requin, 1978) Antizipation, bezieht sie sich dagegen auf den Zeitpunkt, zu dem ein Ereignis erwartet wird, spricht man von zeitlicher Antizipation (Schmidt & Lee, 1999). Schon die Vorhersagbarkeit eines dieser beiden Aspekte bewirkt eine Beschleunigung der Reaktion auf ein Ereignis. Dabei beruht Antizipation letztendlich auf inneren Modellen und weist indirekt deren Existenz nach – zum jetzigen Zeitpunkt jedenfalls sind innere Modelle die beste Erklärung für antizipatives Verhalten (Pezzulo, 2008).

1.4 Antizipation

Der Mensch führt keine zwei Bewegungen auf exakt die gleiche Art und Weise aus; dennoch lassen sich alle Bewegungen letztendlich zwei Kategorien zuführen (Deecke, 1996). Zum einen selbstinitiierte, willkürliche Bewegungen, *Aktionen*, zum anderen Bewegungen, die eine Antwort auf ein äußeres Ereignis darstellen, *Reaktionen*. Einer der Pioniere auf dem Gebiet der Erforschung von Aktion versus Reaktion, prädiktiver versus reaktiver

Bewegungssteuerung war Paillard⁹ (1948). Er stellte als einer der ersten fest, dass das synchrone Ausführen zweier Bewegungen stark davon abhängt, ob sie selbstbestimmt ausgelöst oder extern veranlasst, also fremdbestimmt ausgelöst werden (siehe Seite 22).

1.4.1 Antizipation bei selbstbestimmter Bewegungsauslösung

Für viele Handlungen können keine externen Auslöser benannt werden, so entstehen etwa beim Schreiben eines Briefes die einzelnen Buchstaben letztendlich nicht auf einen externen Reiz hin. Ihre genaue Gestalt und die Geschwindigkeit, mit der sie geschrieben werden, hängt vielmehr von der Interaktion zwischen den einzelnen Teilbewegungen ab. In dieser Interaktion wird Antizipation deutlich. Orliaguet, Kandel und Boe (1997) präsentierten ihren Versuchspersonen handgeschriebene „l“s, auf die je nach Bedingung entweder ein „l“, ein „e“ oder ein „n“ folgte. Die Versuchspersonen sollten anhand von Form und Kinematik des präsentierten „l“s den nachfolgenden Buchstaben erraten. Besonders die kinematischen Eigenschaften des initialen „l“s waren für die Versuchspersonen ein valider Hinweis auf den nachfolgenden Buchstaben – von „l“ über „e“ zu „n“ wurde die zweite Hälfte des ersten „l“s langsamer gezeichnet. Damit wird die Gestalt des nächsten Buchstabens also mindestens schon zum Zeitpunkt der Hälfte des ersten Buchstabens bei der Bewegungsplanung beziehungsweise -ausführung mit berücksichtigt.

Auch bei der gesprochenen Sprache finden sich antizipative Adaptationen in der Produktion von Phonemen. Die Stellung der Artikulatoren (etwa Lippen und Zunge) hängt bei der Bildung eines Lautes vom nachfolgenden ab (Kent & Minifie, 1977), wobei die Koartikulation bidirektional ist, die Bildung eines Phonems also sowohl vom vorausgehenden als auch vom nachfolgenden Phonem abhängt.

Beim Greifen finden sich ebenfalls antizipative Aspekte. Wird nach einem Objekt gegriffen, passt sich die Hand schon früh in der Greifbewegung an Form, Größe und Position des Objektes an (Requin et al., 1991). Des weiteren wurde auch beobachtet,

⁹Er unterscheidet zwischen der *exécution volontaire libre* und der *exécution commandée*, also der willkürlichen Ausführung und der „angewiesenen“ Ausführung.

dass Menschen bei einer Doppelschritt-Aufgabe, in der sie zwei Ziele nacheinander ansteuern müssen, auch profitieren, wenn sie das zweite Ziel kennen, das erste jedoch noch nicht. Hier werden also späte Bewegungsabschnitte geplant noch ehe die frühen feststehen (Herbort & Butz, 2009).

Antizipative Anpassungen finden sich weiter bei der Stützmotorik. Bei der Untersuchung antizipativer Haltungsanpassungen¹⁰ wird zusätzlich zur zeitlichen Abhängigkeit deutlich, wie sehr das Halten des Gleichgewichtes vom Zusammenspiel von Muskeln des ganzen Körpers abhängt. Fängt ein Mensch ein Objekt, so stellt sich nicht nur die Armmuskulatur darauf ein, sondern auch Muskeln in Rücken, Rumpf und Beinen. Diese Haltungsanpassungen sind oft automatischer Natur und treten erst hervor, wenn die Anpassung für eine bestimmte Situation nicht angemessen ist, ein Objekt etwa schwerer oder leichter ist als vorhergesagt. In diesem Falle kommt es zu einer Destabilisierung der Haltung, die allerdings häufig schon beim nächsten Umgang mit dem Objekt verschwindet. Im Normalfall sind antizipative Haltungsanpassungen sehr hilfreich. Sie setzen zeitlich vor einer Störung des Bewegungsapparates ein und kompensieren so die antizipierte Störung (Schmitz, Martin & Assaiante, 2002; Shiratori & Aruin, 2007).

Als sehr viel resistenter gegenüber kognitiver Einflussnahme zeigt sich Lokomotion. Beim Betreten einer stehenden Rolltreppe, erfährt man regelmäßig ein Gefühl der Destabilisierung, selbst wenn man sich der Tatsache, dass sich die Rolltreppe nicht von einer normalen Treppe unterscheiden wird, vollkommen bewusst ist. Reynolds und Bronstein (2003) konnten diesen Effekt experimentell induzieren. Sie ließen ihre Versuchspersonen in einer Laborsituation zunächst über ein stehendes Laufband gehen, dann schalteten sie es an und nach 20 Durchgängen pro Versuchsperson wieder ab. Sie teilten den Versuchspersonen daraufhin ausdrücklich mit, dass sich das Band wie zu Anfangs nun nicht mehr in Bewegung befand. Dennoch zeigten sich die erwarteten starken Nacheffekte, wie sie aus der Realität, aus der Erfahrung mit stehenden Rolltreppen bekannt sind.

Dass die Bewegungssteuerung anderen Regeln folgt, je nachdem ob die Möglichkeit zur prädiktiven Steuerung gegeben ist oder auf Ereignisse erst nach ihrem Auftreten reagiert werden kann, zeigt sich am besten im Vergleich zwischen selbst- und fremdausgelösten

¹⁰Hierbei handelt es sich um die Übersetzung des englischen Begriffs *Anticipatory Postural Adjustments*.

Bewegungen. Kaluzny und Wiesendanger (1992) haben in einem Entlastungsexperiment dann eine höhere Stabilisierung des Fingers gefunden, wenn die Versuchspersonen die Last mit dem anderen Finger selbst lösten, sie nicht vom Versuchsleiter gelöst wurde. Nowak und Hermsdörfer (2006) ließen ihre Versuchspersonen den gerade umgekehrten Fall durchführen, indem sie ihnen entweder ein Gewicht in die Hand fallen ließen, oder die Versuchspersonen anhielten, das Gewicht selbst in ihre andere Hand fallen zu lassen. Paillard(1948) wies seine Versuchspersonen an, zeitgleich mit der Ferse und dem Finger zu tippen. Gesah das auf ein externes Signal hin, wurden beide Bewegungen zeitgleich gestartet, so dass es auf Grund der unterschiedlichen Signallaufzeiten zum Arm und zum Fuß zu einer zeitlichen Asynchronie zwischen Fuß- und Fingertipp kam. Im selbstausgelösten Fall schien es so zu sein, dass die Bewegung hinsichtlich der Afferenz, das heißt der sensorischen Konsequenz der Bewegung, synchronisiert wurde. Daraufhin wurde die Rolle der propriozeptiven Afferenz bei der prädiktiven Handlungssteuerung untersucht. Es zeigte sich in der Tat, dass deafferenzierte Personen auch im selbstbestimmte Fall ein Bewegungsaktivierungsmuster aufwiesen, das mit dem reaktiven Muster der gesunden Versuchspersonen zu vergleichen war (Fleury et al., 1994; LaRue et al., 1995; Stenneken, Prinz, Cole, Paillard & Aschersleben, 2006). Weitere Untersuchungen zur prädiktiven versus reaktiven Bewegungssteuerung bestätigten die gefundenen Unterschiede (Bard et al., 1992; Billon, Bard, Fleury, Blouin & Teasdale, 1996).

1.4.2 Antizipation bei fremdbestimmter Bewegungsauslösung

Wenn eine Bewegung nicht selbstbestimmt ist, sondern eine Reaktion auf ein äußeres Ereignis, einen Reiz darstellen, funktioniert antizipative Bewegungsplanung und -steuerung über den Rückgriff auf innere Modelle (Granit, 1981). Die Fähigkeit zur prädiktiven Steuerung ist umso wichtiger als die Umwandlung sensorischer Information über Bewegungsziel und Körper in eine Bewegung Zeit brauchen (vergleiche Seite 17 zu Vorwärtsmodellen). Diese Zeit kann verkürzt werden, wenn die daran beteiligten Prozesse dem kritischen Ereignis vorgelagert werden, so dass die Reaktionszeit als Intervall zwischen kritischem Ereignis und Bewegungsausführung insgesamt verkürzt werden kann. Das stellt nicht unbedingt eine Verkürzung des Gesamtprozesses dar, sondern lediglich eine zeitliche Verlagerung. Potential für eine solche zeitliche Verlagerung ist gegeben,

nimmt doch das Bereitschaftspotential, das selbstbestimmten, willkürlichen Bewegungen vorausgeht, mit 850 ms deutlich mehr Zeit ein (Deecke, Scheid & Kornhuber, 1969) als normale motorische Reaktionszeiten.

Ist bekannt, was auf einen externen Reiz hin für eine Bewegung zu erfolgen hat, etwa einen Ball nach seinem Auftauchen zu fangen (Savelsbergh, Whiting, Burden & Bartlett, 1992), rückt die zeitliche Antizipation des externen Reizes in den Vordergrund (zur ereignisbezogenen Antizipation siehe etwa Bonnet & MacKay, 1989; Rosenbaum, 1980; Ulrich, Leuthold & Sommer, 1998). Dabei können zwei verschiedene Situationen identifiziert werden. Schmidt (1968) unterscheidet zwischen der *Rezeptor-Antizipation* und der *perzeptueller Antizipation*. Erstere betrifft Situationen, in denen die handelnde Person das Ereignis quasi auf sich zu kommen sieht und den Zeitpunkt ihrer Reaktion anpassen kann, so dass es keine Verzögerung durch die Reaktionszeit gibt (zur Interzeption siehe zum Beispiel Bastin, Calvin & Montagne, 2006). Dabei führt schon ein einzelner, vorgeschalteter Warnhinweis zu einer Verbesserung der Reaktionszeit. Diese Tatsache ist ein deutliches Zeichen für das Vorhandensein von perzeptuellen und/oder motorischen Vorbereitungsprozessen, die der eigentlichen sensomotorischen Aktivität vorausgehen und eine Beschleunigung der Reaktion möglich machen (Durup & Requin, 1970). Kann dagegen die handelnde Person das Ereignis, auf das sie reagieren soll, nicht herannahen sehen, kann sie nach wiederholter Darbietung durch Rückgriff auf gelerntes Wissen, (*perzeptuelle Antizipation*) dennoch die Verzögerung der Reaktion durch die Reaktionszeit vermindern. Aus der Regelmäßigkeit des Auftretens eines externen Reizes läßt sich auch ohne weitere Information sein Auftreten antizipieren und die Reaktionszeit dadurch ebenfalls verbessern.

Vor fast 100 Jahren hat Woodrow (1914) bereits viele der heutigen Erkenntnisse zur zeitlichen Antizipation externer Reize formuliert. Die Reaktionsintervalle, die er verwendete, lagen allerdings im hohen Sekundenbereich, was seinem Ziel, den Mechanismen der Aufmerksamkeit auf den Grund zu kommen, geschuldet war. Vier, für diese Arbeit bedeutsame Befunde beschreibt er in seiner Monographie: (a) müssen Versuchspersonen auf ein Signal reagieren, das nach einem konstanten Intervall präsentiert wird, haben sie die schnellsten Reaktionszeiten bei kurzen Intervallen (bei ihm: 2 s); das hängt damit zusammen, dass unsere interne Zeitschätzung mit steigender Dauer ungenauer wird; (b)

werden die Intervalle nicht konstant gehalten, sondern zufällig variiert, verschwindet der Vorteil für kurze Intervalle und die Reaktionszeit gleicht sich über die verschiedenen Intervalle hinweg an; (c) beschreibt er den Effekt der Reaktionszeitalterung: gibt es eine feste Anzahl von verschiedenen Intervallen, so weiß die Versuchsperson mit fortschreitender Zeit, immer genauer, welcher Intervall im laufenden Durchgang verwendet wurde. Bei Intervallen von 1, 2 und 4 Sekunden, weiß die Versuchsperson nach 3 s, dass sie mit hundertprozentiger Wahrscheinlichkeit nach 4 s reagieren muss; zusätzlich hat (d) die Reihenfolge der Intervalle einen Einfluss auf die Reaktionszeit: in einer Art Kontrasteffekt kommen einem auf lange Intervalle folgende kürzere Intervalle kürzer vor als sie tatsächlich sind, was zu längeren Reaktionszeiten führt.

Durch Woodrow wurden die Erkenntnisse zunächst im Rahmen der Aufmerksamkeitsforschung diskutiert. Aufmerksamkeit wurde zur damaligen Zeit als ein bewusster und Anstrengung erfordernder Prozess aufgefasst. Das führte dazu, dass die Prozesse um die zeitliche Antizipation ebenfalls vorwiegend als intentional galten. Unbewusste Anteile wurden wenn überhaupt im Zusammenhang mit Distraktoren formuliert (Woodrow, 1914). Weiter ergab sich auch die Erkenntnis, dass die Bereitschaft zur Reaktion nicht beliebig lange aufrecht erhalten werden kann (zum Beispiel Alegria, 1980). Woher die beschriebenen Effekte rühren, ist eine bis dato noch ungeklärte Frage, wobei der neueste Beitrag von Los und Kollegen kommt (Los, Knol & Boers, 2001; Los & Van den Heuvel, 2001). Sie kritisieren die Diskussion Alegrias (1980) zwar etwas vorschnell – auch er weist bereits auf Probleme klassischer Interpretationen hin – stellen jedoch in der Tat einen sowohl konsistenten als auch neuen Ansatz vor. Sie begreifen die oben aufgeführten Vorperiodeneffekte als Folge nicht-intentionaler Konditionierungsprozessen und erhoffen sich neuen Schwung für diesen in letzter Zeit wenig ergiebigen Forschungszweig.

Neben der Fortführung der Diskussion um die theoretische Grundlage dieser Effekte (Van der Lubbe, Los, Jaśkowski & Verleger, 2004) finden sich wenig neuere Erkenntnisse zu den von Woodrow (1914) gefundenen Effekten. Darunter fällt allerdings zum Beispiel die Erkenntnis, dass man dem Effekt der Alterung von Reaktionszeiten entgegen treten, indem man Durchgänge einführt, in denen überhaupt kein Reiz präsentiert wird, auf den reagiert werden soll¹¹. Eine ähnliche Wirkung haben auch bestimmte Wahrscheinlich-

¹¹Für diese Art Prüfdurchgänge ist der englische Begriff *catch trial* geläufig.

keitsverteilungen, die unter anderem Durup und Requin (1970) untersucht haben. Auch die Spanne der dargebotenen Vorperioden hat einen Einfluss auf den Vorperiodeneffekt; je größer sie ausfällt, desto größer ist auch der Vorperiodeneffekt. Unabhängig von der Spanne sinkt der Vorperiodeneffekt dabei mit steigender mittlerer Vorperiode (Los & Van den Heuvel, 2001).

Besonders sei noch auf die Modulation der Ergebnisse, je nach Darbietungsform, das heißt entweder geblockt oder gemischt, hingewiesen. Diese Ergebnisse wurden verschiedentlich repliziert (Requin et al., 1991) und auf sequentielle Effekte innerhalb der Blöcke zurückgeführt. Dabei sind die sequentiellen Effekte recht komplex: für längere Vorperioden kommt es zu einer Verbesserung der Vorhersagbarkeit wegen des Effektes der Reaktionszeitalterung, während es für kürzere Vorperioden, die in geblockten Bedingungen schnellere Reaktionszeiten zur Folge haben, zu einer Verschlechterung kommt. Diese ist damit zu erklären, dass für kürzere Vorperioden die vorhergehende Vorperiode mit höherer Wahrscheinlichkeit länger ist, was wiederum zu ungünstigeren Ergebnissen führt.

Ob beim Starten oder beim Beenden einer Bewegung auf einen äußeren Reiz hin – die Vorhersagbarkeit des Reizes wird eine entscheidende Auswirkung auf die Bewegungsausführung haben. Das drückt sich dabei nicht nur in einer kürzeren Reaktionszeit aus, sondern auch in der Art und Weise wie sie zustande kommt. So hat die Vorhersagbarkeit auch einen entscheidenden Einfluss auf die Art der Bewegungssteuerung – die Regelmäßigkeit in der Umwelt macht das Erlernen innerer Modelle sowie die Modulation von Reflexen und Impedanzkontrolle möglich. Ist die Vorhersagbarkeit eingeschränkt, so ist beim Stoppen nach einer Entlastung auch auf Grund mechanischer Randbedingungen und einer etwaigen psychologischen Refraktärzeit eine ballistische Phase zu erwarten, in der die Bewegung nicht unter kognitiver Kontrolle steht, sondern dann die mechanischen Eigenschaften des Effektors und allenfalls Reflexe die Bewegung ausformen.

1.5 Ziele

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Rolle der Antizipation, der kognitiven Einflussnahme im Allgemeinen, auf das Stoppen nach einer abrupten Entlastung untersucht werden. Ist die Aufgabe in einer gewissen Form lernbar, lassen sich daraus Rückschlüsse

für das Training chirurgischer Aufgaben und die Weiterentwicklung der Roboterunterstützung im Bereich der minimalinvasiven Chirurgie ableiten. Unabhängig von der Anwendung interessiert die Bewegungssteuerung im Rahmen abrupter dynamischer Transformationen, das heißt, welche der angesprochenen Aspekte der Bewegungssteuerung dominieren und wie sich das zentrale Nervensystem an die Anforderungen der Aufgabe anpasst.

Die ersten beiden Experimente sollen die Einflüsse der Eigenschaften von Kraftfeldern auf die nachfolgende Stoppbewegung aufdecken und das Ausmaß der Beteiligung antizipativer Prozesse sowie möglicher weiterer strategischer Prozesse klären. Dabei dient Experiment 2 auch der Replikation der Ergebnisse aus Experiment 1. In den nachfolgenden beiden Experimente wird neben den Einflüssen der Kraftfeldeigenschaften und antizipativen Prozessen insbesondere die Rolle der Impedanzkontrolle untersucht. Während in Experiment 1 und 2 aus einer Bewegung heraus gestoppt wird, untersuchen Experiment 3 und 4 das Halten einer Position gegen eine Entlastung, wobei Experiment 4 eine Erweiterung von Experiment 3 darstellt. Die zentrale Frage aller Experimente ist die nach dem Zusammenspiel mechanischer, reflektorischer und kognitiver Prozesse beim Stoppen nach abrupten dynamischen Transformationen. Letztendlich umfasst das auch die Frage nach dem Ausmaß der willkürlichen Beeinflussbarkeit der Bewegungssteuerung im Rahmen dieser Aufgabe.

2 Experiment 1

2.1 Fragestellung

Hinsichtlich des Abbremsens einer Bewegung nach einer abrupten dynamischen Transformation stellt sich zunächst einmal die Frage nach der Rolle der dynamischen Transformation selbst. In Experiment 1 werden die Auswirkungen der Stärke des Kraftfeldes, seiner Länge (im Sinne der räumlichen Ausdehnung) und der Vorhersagbarkeit der Kraftfeldlänge untersucht. Bezüglich der Vorhersagbarkeit weiß man aus der Literatur zur Antizipation und den Vorperioden-Effekten um den Vorteil geblockter gegenüber gemischt dargebotener Vorperioden. Die Vorperiode wird hier beschrieben durch die Zeit zwischen Aufschalten und Abschalten des Kraftfeldes.

Generell wird es um die Frage gehen, inwiefern diese Aufgabe zentral modulierbar ist. Die zentrale, wenn vielleicht auch nicht willkürliche Beteiligung an der Bewegungssteuerung wird dabei über die Manipulation der Vorhersagbarkeit untersucht. Als wichtigste abhängige Variable dient dabei in Anlehnung an den Bremsweg die nach dem Abfall der Kraft bis zu einem bestimmten Zeitpunkt zurückgelegte Strecke.

Dabei sollte (a) sich mit der Stärke des Kraftfeldes der zurückgelegte Weg erhöhen; (b) es mit zunehmender Tiefe des Kraftfeldes zu einer Reaktionszeitalterung kommen und die Versuchspersonen sollten sich zudem besser auf das Kraftfeld einstellen können, was insgesamt zu einer Verringerung der zurückgelegten Wegstrecke führen sollte; weiter sollte (c) sich mit zunehmender Vorhersagbarkeit der Tiefe des Kraftfeldes, also bei geblockter Darbietung, die Leistung im Sinne eines schnelleren Abbremsens verbessern. Da die Vorhersagbarkeit für längere Strecken nach dem Alterungseffekt besser sein sollte als die für kürzerer Strecken, sollte es (d) zu einem Interaktionseffekt kommen, da der Vorteil der geblockten Darbietung bei längeren Strecken geringer werden sollte. Es wird zunächst angenommen, dass die Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes wirkt, indem sie die

Vorhersage des Zeitpunktes erlaubt, an dem die Stoppreaktion eingeleitet werden soll. Dabei sollte eine schnellere Reaktion einen kürzeren Weg bis zum Messpunkt bedingen.

2.2 Methode

2.2.1 Versuchspersonen

Für das erste Experiment wurden 12 Versuchspersonen, 5 Frauen und 7 Männer im Alter zwischen 20 und 30 Jahren (MW: 22.9; STD: 3.0) eingeladen. Alle waren Rechtshänder und berichteten von keinen Beschwerden im Bereich von Hand, Arm oder Schulter der rechten Körperhälfte. Die Versuchspersonen nahmen freiwillig an der etwa einstündigen Untersuchung teil und erhielten eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro.

2.2.2 Apparatur

Die Apparatur bestand im Wesentlichen aus einem 19" CRT-Bildschirm (iiyama Vision Master Pro 451, A902MT-v), der erhöht aufgestellt war und über den die Versuchspersonen während des Experimentes Anweisungen bekamen und einem Roboterarm (PHANToMTM Premium 1.5 3DOF, Sensable Technologies). Dieser war leicht erhöht auf einem Podest aufgestellt, auf dem Markierungen für die Pausenposition und die Warteposition angebracht waren. Die Pausenposition entspricht der Eichposition des Roboterarms, die Warteposition befand sich zur Versuchsperson hin 11 cm davon entfernt (siehe Abbildung 2.1). Die Versuchspersonen saßen stets so vor dem Aufbau, dass sich ihr Unterarm möglichst parallel zur Tischplatte befand und der Winkel zwischen ihrem Unter- und ihrem Oberarm in Startposition in etwa 135° betrug. Die Startposition befand sich dabei in 10 cm Höhe relativ zur Tischplatte. Was leichte Veränderungen der Körperposition betraf, war es den Versuchspersonen erlaubt, ihre Haltung im Laufe des Experimentes zu verändern. Sie durften während eines Durchgangs allerdings ihren Arm nicht auf der Tischplatte aufstützen. Die Versuchspersonen hielten den Stift des Roboterarms in etwa so wie man ein Schreibgerät hält: fest zwischen Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen.

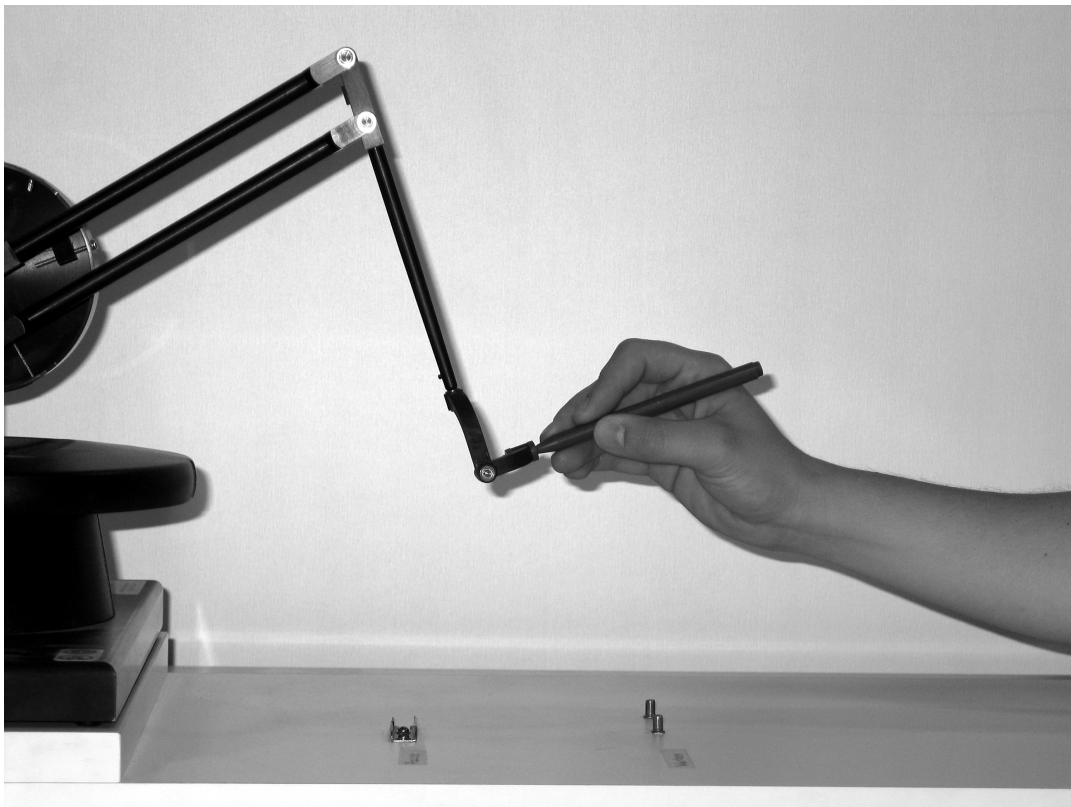


Abbildung 2.1: Die Versuchspersonen hielten den Stift des Roboterarmes in etwa so wie man ein Schreibgerät hält: fest zwischen Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen. Während eines Durchganges durften sie ihren Arm nicht auf der Tischplatte aufstützen. Auf dem Brett unten sieht man links die Markierung für die Pausenstellung und rechts diejenige für die Wartestellung. Die Startposition befand sich 10 cm oberhalb der Wartestellung.

2.2.3 Aufgabe

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, den Roboterarm von der oben beschriebenen Startposition waagrecht und parallel zur sagittalen Ebene von ihrem Körper weg nach vorne zu bewegen. Im Verlauf der Bewegung wurde stets ein Kraftfeld aufgeschaltet, das die Versuchspersonen durchqueren mussten, um dann, sobald das Kraftfeld abgeschaltet wurde, sofort inne zu halten. Sie wurden angewiesen eine möglichst ruhige, gerade Vorwärtsbewegung auszuführen und beim Stoppen neben der Geschwindigkeit darauf zu achten, Rückwärtsbewegungen zu vermeiden. Je nach Bedingung variierten dabei die Kraftfeldeigenschaften (siehe Abschnitt 2.2.4).

2.2.4 Design und Ablauf

Das Experiment umfasste drei Messwiederholungsfaktoren, die sich alle auf die Eigenschaften des Kraftfeldes bezogen: die Stärke des Kraftfeldes (1 N, 2 N, 4 N), seine räumliche Ausdehnung (40 mm, 50 mm und 60 mm) und die Vorhersagbarkeit der räumlichen Ausdehnung. Letztere wurde manipuliert, indem die räumliche Ausdehnung der Kraftfelder innerhalb eines Blockes konstant gehalten beziehungsweise variiert wurde. In den konstanten Blöcken wurde die Ausdehnung des Kraftfeldes konstant gehalten und die Kraftfeldstärke durch zufälliges Ziehen ohne Zurücklegen für 27 Durchgänge festgelegt, so dass jede Kraftfeldstärke je 9 Mal gezogen wurde. Die Kraft wurde sowohl in den konstanten als auch in den variablen Blöcken stets variiert. Für die variablen Blöcke ergaben sich 9 mögliche Kombinationen aus den zwei Faktorstufen Stärke und Ausdehnung des Kraftfeldes. Jede der 9 Faktorstufenkombinationen wiederholte sich 3 Mal innerhalb eines Blockes von 27 Durchgängen. Die Durchgänge aller Blöcke wurden durch zufälliges Ziehen ohne Zurücklegen der jeweiligen Kombinationen in eine Zufallsreihenfolge gebracht und durch drei weitere Durchgänge ergänzt. Diese standen jeweils am Anfang eines Blockes und wurde nicht ausgewertet. Damit umfasste das Experiment 180 Durchgänge in 6 zu je 30 Durchgängen.

Nach Begrüßung und einer allgemeinen Einweisung sowie einer Demonstration des Bewegungsablaufes durch eine Grafik und den Versuchsleiter, wurde das Training gestartet und die Versuchspersonen bekamen über den Bildschirm die Anweisung, eine ruhige, gerade Vorwärtsbewegung zu machen, Rückwärtsbewegungen zu vermeiden und sofort

inne zu halten, wenn sie keinen Widerstand mehr spürten. Dem eigentlichen Experiment ging ein Training voraus, das einen Block lang war und dessen Parameter wie bei einem variablen Block festgelegt wurden. Das Training war für alle Versuchspersonen gleich. Bei drei aufeinander folgenden fehlerlosen Durchgängen, frühestens aber nach 10 Durchgängen wurde das Training abgebrochen. Höchstens umfasste es 30 Durchgänge, also einen ganzen Block.

Eine Bewegung musste folgenden Kriterien genügen, damit der Durchgang als gültig eingestuft wurde: (a) die Bewegung musste enden, das heißt, die Bewegung der Versuchsperson musste innerhalb einer halben Sekunde für mindestens 100 ms unter einer tangentialen Geschwindigkeit von 40 mm/s liegen; (b) die Versuchspersonen durften beim Anhalten die Hand nicht nach hinten ziehen, das heißt nach dem Abschalten des Kraftfeldes durften nicht mehr als 15mm in Richtung dorsal zurück gelegt werden; (c) während der letzten 50 ms im Kraftfeld durfte die Geschwindigkeit parallel zur sagittalen Achse im Mittel nicht unter 10 mm/s liegen und (d) auch nicht über 90 mm/s; letzte Bedingung war schließlich, dass (e) die Bewegung gerade war, parallel zur sagittalen Achse, wobei sie einen Korridor von 50 mm Breite und Höhe nicht verlassen durfte. Wurde eine oder mehrere dieser Bedingungen nicht erfüllt, wurde das zurückgemeldet und der Durchgang musste wiederholt werden, es sei denn die Fehlermeldung betraf die Schrägheit der Bewegung – eine Abweichung von dieser Bedingung wurde lediglich zurückgemeldet, führte jedoch nicht zu einer Wiederholung des Durchganges. Diese Gültigkeitsüberprüfung diente dazu, für die Datenanalyse möglichst viele vergleichbare Durchgänge zur Verfügung zu haben. Die Geschwindigkeitsbeschränkung diente darüber hinaus dazu, die Geschwindigkeitsanpassung als potentielle Strategie zur Vereinfachung des Stoppens möglichst zu unterbinden. Die Kriterien für gültige Durchgänge wurden im Rahmen der Datenanalyse erneut überprüft. Konnte eine Versuchsperson ein Kriterium nicht einhalten – vermehrt kam das hauptsächlich für die erste Bedingung, das Stoppen der Bewegung vor – wurde die Wiederholung abgeschaltet, nicht aber die Warnung.

Nachdem das Training erfolgreich beendet wurde, begann das Experiment. Ein Durchgang lief folgendermaßen ab: zunächst wurde der nachfolgende Durchgang angekündigt, dann wurde ein ausgefüllter, grauer Kreis eingeblendet und die Hand der Versuchsperson wurde passiv mit Hilfe eines durch den Roboterarm generierten Kraftfeldes zur

Startposition hin geführt, die sich 10 cm oberhalb der Warteposition befand (siehe auch Abbildung 2.1). Erreichte der Roboterarm eine Position um einem Toleranzbereich von 10 mm um die Startposition herum, wurde das Signal blau, worauf die Versuchspersonen mit der Vorwärtsbewegung beginnen sollten. Das blaue Signal verschwand, sobald die Hand der Versuchsperson die Startposition in sagittaler Richtung verließ. Nach 10 mm in sagittaler Richtung wurde der Widerstand exponentiell aufgeschaltet (vergleiche Abbildung 2.2). Dies geschah um Vibrationen zu vermeiden, die bei plötzlichen Aufschalten eines Widerstandes auftreten. Durch den Verlauf der Exponentialfunktion ergaben sich effektiv Ausdehnungen des Bereichs des maximalen Widerstandes von etwa 10 mm, 20 mm und 30 mm. Nachdem der Widerstand abgeschaltet wurde, sollten die Versuchspersonen ihre Bewegung so schnell wie möglich stoppen. Dieser Prozess wurde 5 s lang aufgezeichnet. Dann erschien ein ausgefüllter, grüner Kreis auf dem Bildschirm, für die Versuchspersonen das Signal, um wieder auf die Warteposition zurück zu gehen. Wurde die Warteposition mit Toleranz von 10 mm erreicht, war der Durchgang beendet und die Bewegung wurde auf ihre Gültigkeit hin untersucht, was wiederum der Versuchsperson zurückgemeldet wurde. Gegebenenfalls wurde der Durchgang wiederholt, andernfalls wurden die nächsten Parameter geladen.

Zwischen den Blöcken waren Pausen programmiert, über deren Länge die Versuchspersonen selbst bestimmten und währenddessen sie ihre Hand und ihren Arm entlasten konnten. Pausen waren auch zwischen den Durchgängen möglich, falls die Versuchsperson es wünschte. Über Abweichungen und Besonderheiten im Ablauf des Experimentes und Kommentare der Versuchspersonen wurde genau Protokoll geführt. Zum Ende bekamen die Versuchspersonen noch einen kurzen demografischen Fragebogen, der nach Geschlecht, Alter und Händigkeit fragte, wurden aufgeklärt und entlassen.

2.2.5 Interaktion biologischer Bewegungen und technischer Systeme

Bei der Erfassung biologischer Daten mit technischen Systemen ergeben sich Unstetigkeiten, die sich normalerweise durch das Filtern der Daten beseitigen lassen. In der vorliegenden Arbeit werden die Daten nicht nur Roboterarm aufgezeichnet, sondern gleichzeitig auch moduliert. Die Interaktion zwischen biologischen Bewegung und tech-

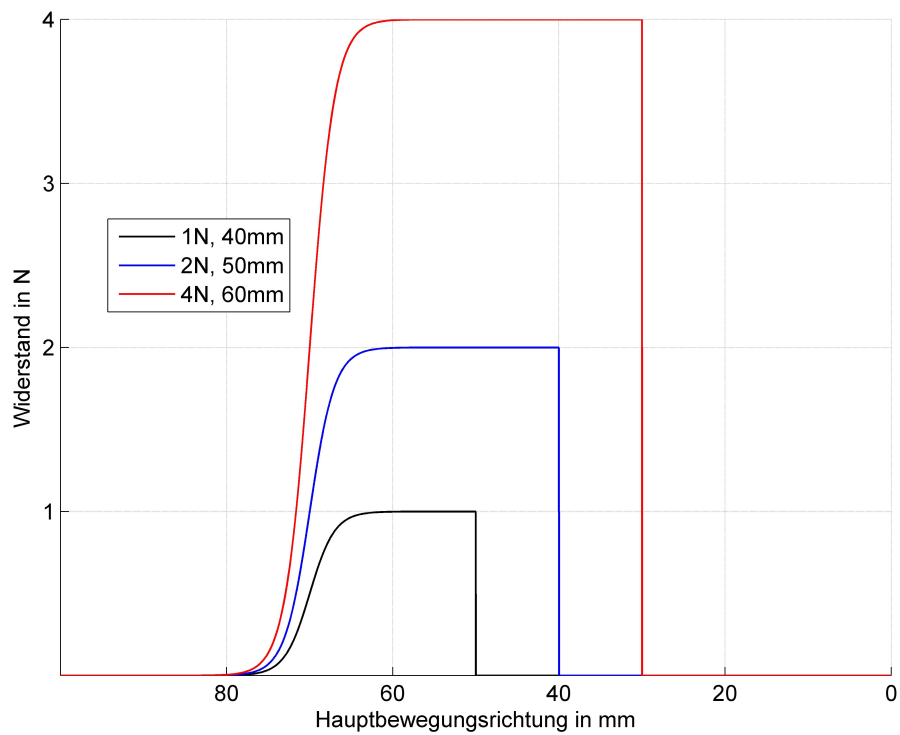


Abbildung 2.2: Die Kraft wurde anhand logistischer Funktionen aufgeschaltet um Vibrationen beim Aufschalten der Kraft zu vermeiden. Von den neun verwendeten Kraftfeldern sind hier drei beispielhaft dargestellt (siehe Legende).

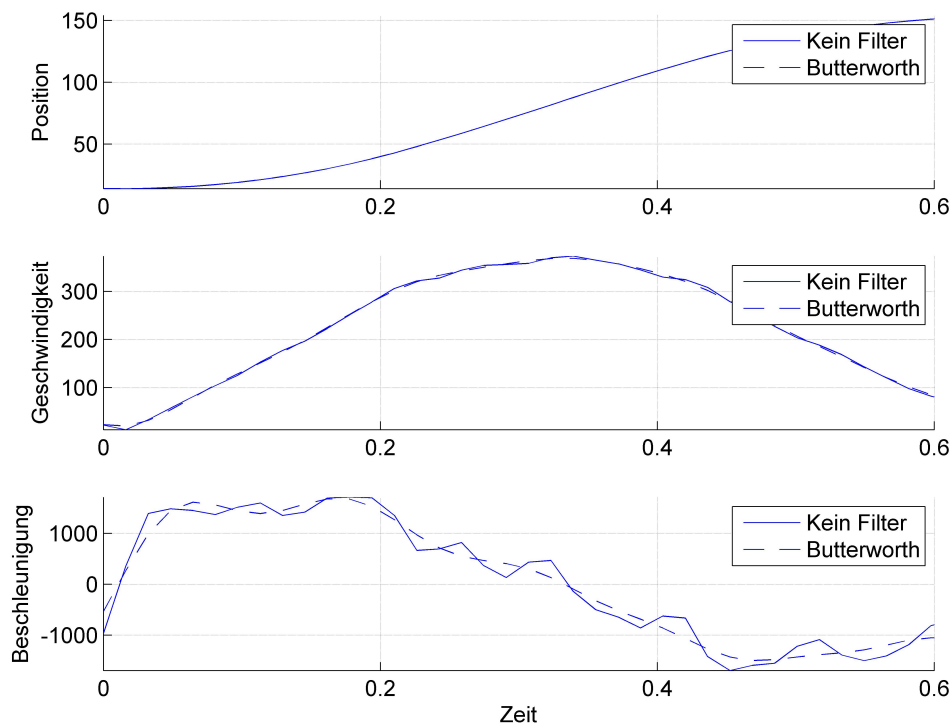


Abbildung 2.3: Darstellung gefilterter und ungefilterter Daten einer einfachen Zeigebewegung. Oben: Position in mm; in der Mitte: Geschwindigkeit in mm/s; unten: Beschleunigung in mm/s^2 . Deutlich Erkennbar ist die glättende Wirkung des Filters (hier ein Butterworth-Filter 4. Grades mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz).

nischem System wird vor allem nach dem abrupten Abfall der Kraft deutlich und hat weit reichende Auswirkungen auf die Datenanalyse.

Während die angesprochenen Unstetigkeiten in den Positionsdaten mit dem bloßen Auge in Abbildung 2.3 kaum zu erkennen sind, werden sie nach dem Differenzieren der Daten deutlich sichtbar. Ursache dafür ist, dass das Differenzieren zu einer Potenzierung der Unstetigkeiten führt (Nagano, Komura, Himeno & Fukushima, 2003; Vint & Hinrichs, 1996). Bei ungefilterten Daten zeigen sich deshalb im Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil schon bei einfachen Zeigebewegungen deutliche Wellen (siehe Abbildung

2.3). Diese Artefakte sind dabei allerdings hochfrequent und deswegen von biologischen Bewegungen, die bis etwa 10 Hz gehen (Paltsev & Aggashyan, 1980), gut abgrenzbar. Sie können durch das Anwenden eines Filters wirkungsvoll beseitigt werden (siehe ebenfalls Abbildung 2.3).

Filter sind letztendlich Polynome, die an die Daten angepasst werden. Das hat zur Folge, dass sie bei abrupten Sprüngen in den Daten, wie sie hier durch die Aufgabe bedingt sind, ins Schwingen geraten (siehe Abbildung 2.4).

Das Filtern der Daten bringt hier also Probleme mit sich, die eine Schätzung der unverrauschten, wahren Werte erschwert. Es gibt jedoch eine weitere Möglichkeit, die wahren Werte zu schätzen. Bildet man aus vielen Einzelbewegungen eine Durchschnittsbewegung, mitteln sich nach dem Gesetz der Großen Zahl die zufälligen Fehler und Abweichungen heraus. In Abbildung 2.5 sind zum einen fünf zufällig gezogene Bewegungen, die alle bei gleichen Kraftfeldeigenschaften erhoben wurden, dargestellt und zum anderen das Mittel aus den 263 Bewegungen, die in Experiment 1 über alle Versuchspersonen hinweg bei gleichen Kraftfeldcharakteristiken erhoben wurden. Man erhält ein deutlich rauschärmeres Bild des Geschwindigkeitsverlaufs. Anhand der Bewegung vor dem Kraftfeldaustritt sieht man deutlich, wie sich zufällige Schwankungen herausmitteln. Die Schwankungen, die nach dem Austritt aus dem Kraftfeld zu erkennen sind, stellen wohl keine Artefakte, wie sie etwa durch je unimodale aber verschobene Verteilungen entstehen würden, dar; zumindest lässt sich das mit Blick auf die Einzelbewegungen vermuten. Es bleiben also auch über das Mitteln hinaus Schwingungen erhalten. Zum einen eine deutlich erkennbare niederfrequente Schwingung und zusätzlich einige hochfrequente Schwingungen nach dem Austritt aus dem Kraftfeld.

Um der Herkunft der Schwingungen nachzugehen, wurde der Roboterarm zwischen zwei waagrecht gelagerten Federwaagen eingespannt und ein Kraftfeld von 1 N im Intervall von 1 Sekunde 100 Mal auf- und wieder abgeschaltet. Es wurden dazu Federwaagen unterschiedlicher Steifigkeit verwendet. Abbildung 2.6 zeigt die gemittelten Trajektorien dieser Testdurchläufe, wobei oben die Ergebnisse zweier Federwaagen mit einer Federkonstante von 60 N/m und unten die zweier Federwaagen mit 100 N/m dargestellt sind. Wieder zeigt sich eine niederfrequenterere und eine höherfrequenterere Schwingung. Die nie-

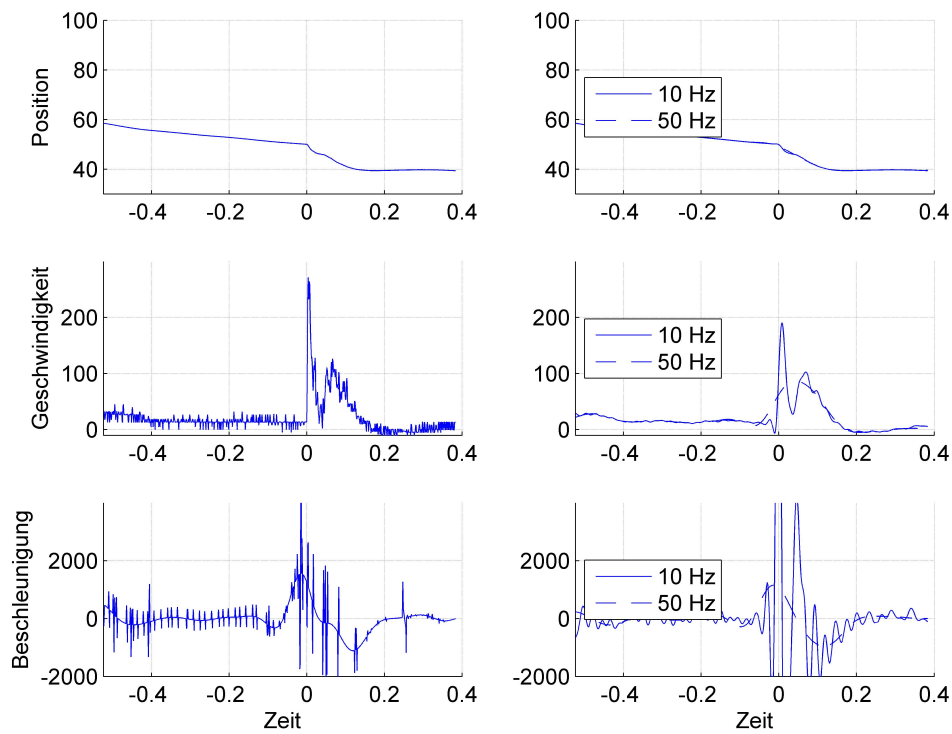


Abbildung 2.4: Darstellung gefilterter und ungefilterter Daten einer unter abrupter dynamischer Transformation ausgeführten Bewegung. Oben: Position in mm; in der Mitte: Geschwindigkeit in mm/s; unten: Beschleunigung in mm/s². Links die ungefilterten Daten, rechts die mit Butterworth-Filtern 4. Grades und Grenzfrequenzen von 10 und 50 Hz gefilterte Daten. Gut zu erkennen ist das Einschwingen der Filter vor dem Austritt aus dem Kraftfeld (bei $t_0 = 0$ s).

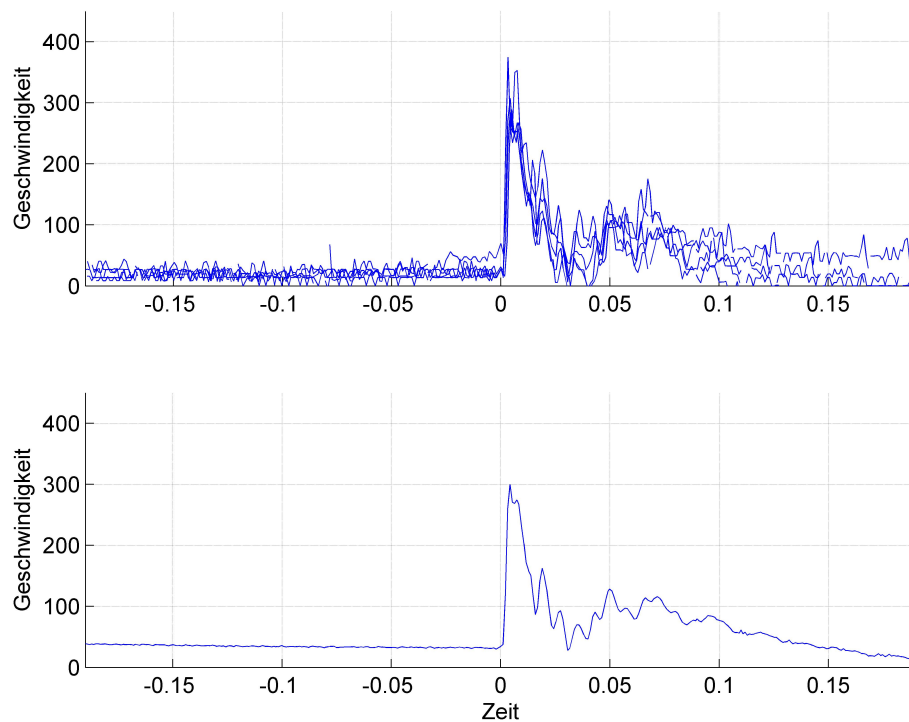


Abbildung 2.5: Darstellung von fünf einzelnen Geschwindigkeitsprofilen (oben, Geschwindigkeit in mm/s, Zeit in s) und des aus der Mittelung von 263 Einzelbewegungen erhaltenen Geschwindigkeitsprofils (unten). Alle Profile gehören zu Kraftfeldern mit einer räumlichen Ausdehnung von 50 mm und einer Stärke von 2 N. Der Zeitpunkt $t_0 = 0$ s markiert den Austritt aus dem Kraftfeld.

derfrequenterer Schwingung ist dabei von der Steifigkeit der Federwaagen abhängig, während die höherfrequenterer unabhängig von den verwendeten Federwaagen auftritt. Die Vermutung liegt dann nahe, dass die höherfrequente Schwingung in Abbildung 2.5 vom Roboterarm selbst ausgeht, während die dort sichtbare niederfrequenterer Schwingung auf die Steifigkeit des Armes zurückzuführen ist. Die höherfrequenten Anteile können dabei nicht durch eine Reflexfähigkeit erklärt werden; dagegen spricht die hohe Frequenz und die frühe Latenz. Auch die niederfrequenterer Schwingung besitzt eine für Reflexe zu frühe Latenz.

Aus den vorherigen Ausführungen ergeben sich zwei Erkenntnisse: Filter versagen bei diskontinuierlichen Daten der Art, wie sie im Rahmen dieser Arbeit anfallen. Eine Ableitung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmaßen verbietet sich damit, vor allem auch weil die Extrema der Ableitung direkt nach dem Ende des Kraftfeldes auftreten und dort der Filter noch stark schwingt. Klassische Maße der Bewegungsanalyse, wie die Zeit oder der Weg zur maximalen Geschwindigkeit oder negativen Beschleunigung können nicht gefunden werden. Greift man auf die ungefilterten Positionsdaten zurück, sollte man bei der Ableitung von Maßen dennoch den Bereich unmittelbar nach dem Ende des Kraftfeldes meiden, weil sich hier hochfrequente Schwingungen, die vermutlich vom Roboterarm herrühren, zeigen. Von einer teilweisen Filterung der Daten wird abgesehen, weil es an einem begründeten Kriterium für die Auswahl eines zu filternden Datenfensters fehlt. Das zusätzliche Rauschen in den Daten wird hingenommen, auch wenn damit kleine Effekte bei der statistischen Analyse eine geringere Chance haben entdeckt zu werden.

2.2.6 Datenanalyse

Die Bewegungen wurden bis 400 ms nach dem Wegfall der Kraft aufgezeichnet. Innerhalb dieser Zeit mussten die Versuchspersonen die Bewegung zum Stillstand bringen. Also wurden die Bewegungen zunächst auf 400 ms vor bis 400 ms nach dem Wegfall des Widerstandes gekürzt und in 10-ms-Schritten gespeichert. Kam es bei der Aufzeichnung zu Datenverlust und es fehlte ein Wert, wurde der Mittelwert des vorherigen und des nachfolgenden Wertes berechnet und der fehlende Wert damit ersetzt.

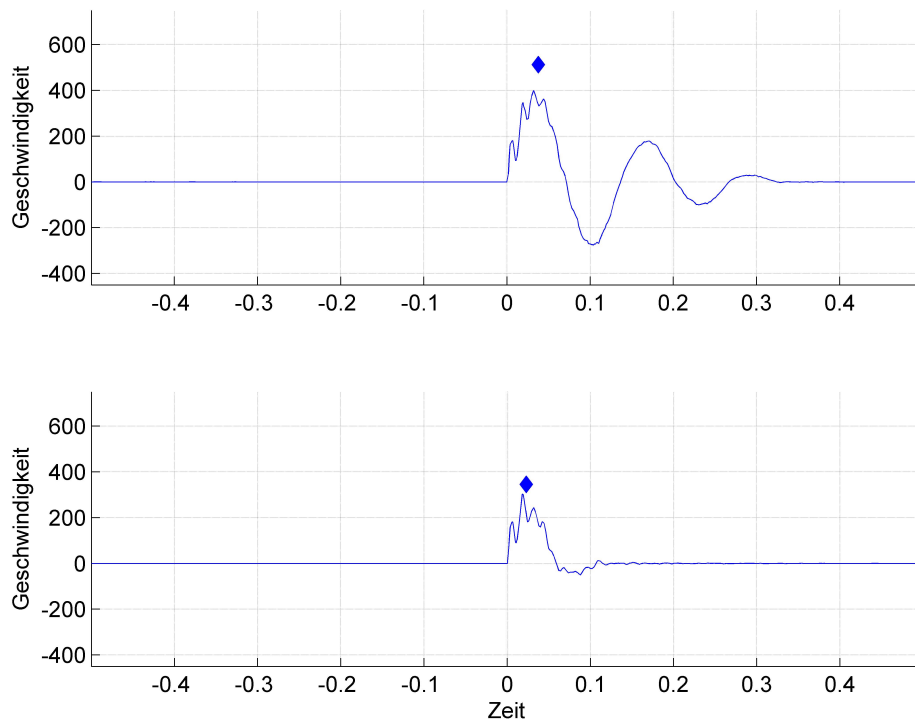


Abbildung 2.6: Darstellung der gemittelten Geschwindigkeitsdaten (Geschwindigkeit in mm/s, Zeit in s) eines Testexperimentes mit Federwaagen. Oben sind die Ergebnisse für zwei Federwaagen mit einer Federkonstante von 60 N/m dargestellt, unten die für zwei steiferen Federwaagen mit einer Federkonstante von 100 N/m. Die Rauten markieren die Maxima der Geschwindigkeit der je 100 Testdurchläufe.

Dann wurden jeweils die ersten drei Durchgänge eines Blocks und die Durchgänge, die wiederholt werden mussten, aus der Auswertung genommen. Anschließend wurden die Daten auf Ausreißer hin untersucht. Für die je neun Trajektorien einer Faktorstufenkombination einer Versuchsperson wurden zu jedem der 81 Messzeitpunkte der Mittelwert ausgerechnet. Ein Ausreißer wurde definiert als Punkt, der 3 Standardeinheiten von diesem Mittelwert entfernt war. In diesem Sinne lagen keine Ausreißer vor, so dass alle Daten in die Analyse mit einfließen.

Drei Versuchspersonen hatten große Schwierigkeiten die Bewegungen in den vorgegebenen Parametergrenzen durchzuführen. Bei ihnen wurde die Wiederholung der ungültigen Durchgänge ausgeschaltet. Da die Werte zweier dieser Versuchspersonen letztendlich nicht von denen der anderen abwichen, wurden sie in der Analyse belassen und auch die dritte Versuchsperson wurde trotz Auffälligkeiten mangels sauberem Ausschlusskriterium in der Analyse belassen.

2.3 Ergebnisse

Für die statistischen Auswertungen wurden die Voraussetzungen überprüft, bei Varianzanalysen mit Messwiederholung umfasst das auch die Überprüfung der Sphärizität. Falls letztere nicht gegeben war, wurden die korrigierten Greenhouse-Geisser-Werte zusammen mit den unkorrigierten Freiheitsgraden berichtet.

2.3.1 Bewegungsmuster

Sowohl die zeitliche (siehe Abbildung 2.7) als auch die räumliche Bewegungsmuster (siehe Abbildung 2.8) sind, gerade in ihren frühen Komponenten, recht stereotyp, was bei der Komplexität und der Dreidimensionalität der Bewegung für ein großes Gewicht mechanischer und peripherer Einflüsse spricht. Betrachtet man zunächst das zeitliche Bewegungsmuster aller Durchgänge einer Versuchsperson in der Draufsicht fällt auf, dass sich die Bewegung erst gerade und dann leicht schräg seitlich ausbreitet, um sich dann schließlich wieder zusammenzuziehen (siehe Abbildung 2.7). Auch die räumliche Entwicklung ist deutlich stereotyp. Das Zusammenziehen der einzelnen Bewegungspunkte in Abbildung 2.7 zeigt sich hier in einer deutlichen Zurückbewegung, die sich bei quasi allen Bewegungen findet. Abgetragen sind hier, ebenfalls in Draufsicht, die jeweils neun

Wiederholungen einer Faktorstufenkombination für drei verschiedene Versuchspersonen. Da die Versuchspersonen explizit instruiert wurden, lediglich anzuhalten, nicht aber zurückzugehen und die Bewegung in hohem Maße stereotyp ist, liegt die Annahme nahe, dass es sich hierbei um eine unwillkürliche Rückbewegung handelt.

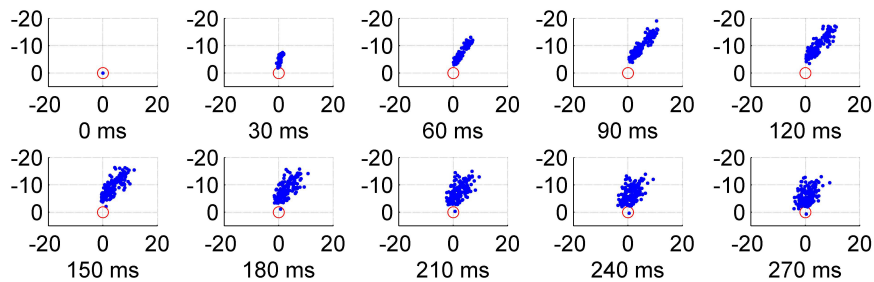


Abbildung 2.7: Draufsicht der Positionsdaten aller Bewegungen einer Versuchsperson zu 10 verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert.

2.3.2 Stoppen

Um eine Stoppbewegung zu untersuchen, ist es nahe liegend, sich den Bremsweg anzuschauen. Das Maß hat sich in vielen Bereichen bewährt, hat aber hier einen entscheidenden Nachteil. Verbunden mit der Beendigung von Bewegung sind relativ große Subbewegungen (Dounskaia, Wisleder & Johnson, 2005). Wenn die Bewegungen freischwebend beendet werden, können das Stoppen selbst zum einen und das Halten der Position zum anderen nicht mehr klar getrennt werden. Der Bremsweg ist unter dreidimensionalen Bewegungsbedingungen ein deutlich fehlerbehafteteres Maß als unter zweidimensionalen Bedingungen. Deswegen wurde nach einem Maß gesucht, das deutlich vor dem Ende der Bewegung und der Phase des Haltens der Position liegt.

Dadurch, dass die Daten nicht gefiltert und folglich auch nicht differenziert werden konnten, war es nicht möglich andere nahe liegende Maße zu verwenden, etwa die zu-

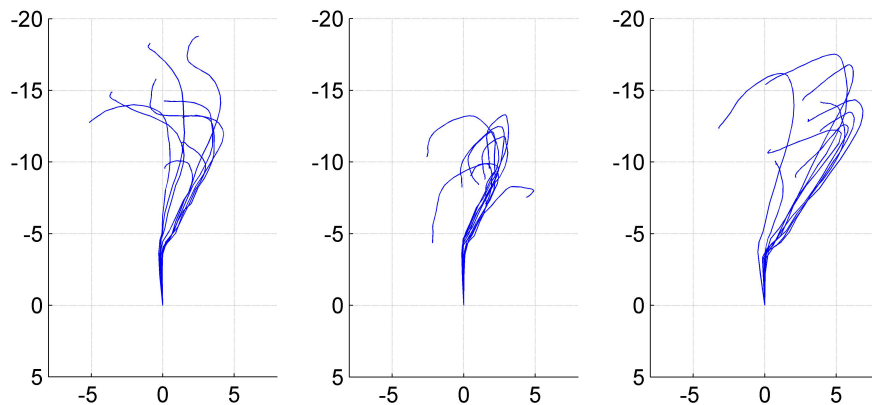


Abbildung 2.8: Draufsicht auf die Trajektorien einer Faktorstufenkombination, beispielhaft dargestellt anhand der Daten dreier Versuchspersonen. Positionsangaben in mm.

rückgelegte Wegstrecke und Zeit an dem die Geschwindigkeit nach dem Austritt aus dem Kraftfeld das Niveau vor dem Austritt wieder erreicht. Deswegen wird hauptsächlich die radiale Distanz nach 200 ms als Maß verwendet. Um dieses Zeitfenster liegt auch die Reaktionszeit. Zur zusätzlichen Absicherung wird die radiale Distanz nach je 100 und 300 ms ebenfalls ausgewertet. Ändert sich das Ergebnismuster über die Zeit, lässt das entweder auf unterschiedliche funktionale Prozesse zu den verschiedenen Zeitpunkten innerhalb der Bewegungen oder auf unterschiedliche Bewegungsmuster in Abhängigkeit der Faktorstufenkombination schließen. Alle radialen Distanzen lassen sich als Vektorlängen auffassen und, da sie sich auf einen bestimmten Zeitpunkt beziehen, auch als Geschwindigkeitsmaß aufgefasst werden. Konzentriert man die Betrachtung in dieser Weise auf einen Zeitpunkt, hat das allerdings zur Folge, dass man nicht mehr in der Lage ist, spezifische Aspekte einzelner Bewegungen zu berücksichtigen, etwa Schwankungen in der Reaktionszeit. Dazu bedarf es hier eines räumlichen Kriteriums und so werden die Trajektorien auf Extrema in den Polarkoordinaten hin untersucht und die Wegstrecke vom Austritt aus dem Kraftfeld bis zum Extremum ausgewertet. Die Extrema stellen dabei inhaltlich relevante Eigenschaften der Trajektorien dar (vergleiche dazu Abbildung 2.8).

Polarkoordinaten nach 200 ms

Abbildung 2.9 zeigt die Mittelwerte der Radialen Distanzen, gemessen vom Austritt aus dem Kraftfeld bis 200 ms nach Austritt. Die Daten flossen in eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit drei Messwiederholungsfaktoren ein: die Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N), die räumliche Ausdehnung des Kraftfeldes, in der Folge Tiefe des Kraftfeldes genannt (40, 50 und 60 mm) und die Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes. Diese bezieht sich auf die Variation der Tiefe der Kraftfelder innerhalb eines Blockes. Die Stärke der Kraftfelder wurde in allen Blöcken von Durchgang zu Durchgang variiert.

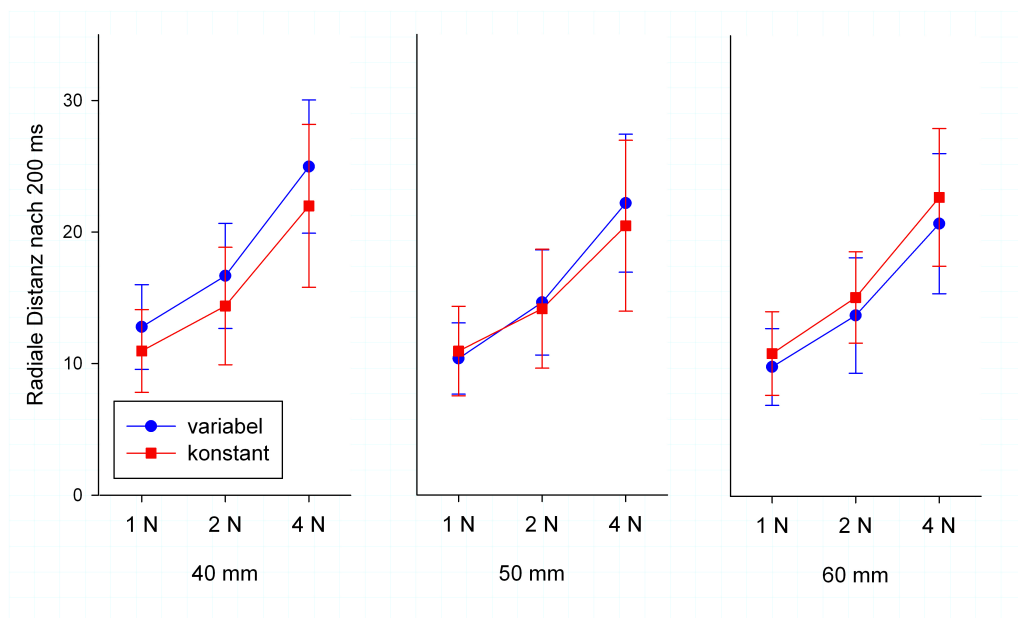


Abbildung 2.9: Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N), Tiefe des Kraftfeldes (40, 50 und 60 mm) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Tiefe der Kraftfelder innerhalb eines Blockes).

Während der Faktor Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} nicht signifikant wurde, werden die Versuchspersonen, wie aufgrund der Reaktionszeitalterung zu erwarten, mit zunehmender Tiefe des Kraftfeldes besser ($F(2, 22) = 9.2, p < 0.01$). Während sie bei Kraftfeldern der Tiefe 40 mm nach 200 ms schon eine radiale Distanz von 17.0 mm erreichten,

waren es bei 50 und 60 mm jeweils nur 15.5. Der deutlichste Effekt bestand in der Zunahme der zurückgelegten Wegstrecke in Abhängigkeit der Stärke des Kraftfeldes ($F(2, 22) = 84.4, p < 0.001$). Während diese bei 1 N bei rund 11.0 mm lag, wuchs sie bei 2 N auf 14.8 mm und bei 4 N schließlich auf 22.2 mm an. Das entspricht einem Verhältnis von ungefähr 1:1.3:2.0; damit wachsen die radialen Distanzen relativ zur Stärke der Kraftfelder (Verhältnis 1:2:4) deutlich unterproportional an.

Zuletzt konnte über die verschiedenen Tiefen der Kraftfelder eine signifikante Verringerung des Unterschiedes zwischen den Stufen des Faktors Vorhersagbarkeit aufgezeigt werden. Der Interaktionseffekt Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} x Tiefe_{Kraftfeld} war mit $F(2, 22) = 8.4, p < .01$ signifikant. Während es in Blöcken mit variablen Tiefen zu einer Abnahme der radialen Distanz zum Zeitpunkt 200 ms kommt (18.1, 15.7, 14.8 mm für Kraftfelder der Tiefe 40, 50 und 60 mm), weisen die Blöcke mit konstanten Kraftfeldtiefen tendenziell gleich bleibende radiale Distanzen auf, wobei sich der geringste Wert bei Kraftfeldern der Tiefe 50 mm findet (respektive 15.8, 15.2 und 16.2 mm).

Der Aufbau und die Aufgabe wurden absichtlich so gewählt, dass die Versuchspersonen, anders als bei vielen Experimenten, ein echtes dreidimensionales Bewegungsfeld hatten. Die radiale Distanz alleine sagt noch nicht viel über die Lage der Bewegung im Raum aus. Der nächste Schritt besteht somit in der Betrachtung der Winkel im Raum, zunächst des Azimuths. Der Azimuth ist der Winkel, der zwischen der positiven Transversalachse¹ und dem Ortsvektors des zu betrachtenden Punktes entsteht, wenn man diesen Punkt auf die (horizontale) Transversalebene projiziert.

Einziges signifikantes Ergebnis für dieses Maß besteht jedoch in einer größeren Abweichung von der geraden Bewegung in Abhängigkeit von der Stärke des Kraftfeldes. Da die Transversalachse des Roboterarms weg von der Versuchsperson negativ wird, entspricht eine gerade Bewegung nach vorne einem Azimuth von -90° . Für die verwendeten Kraftfeldstärken finden sich Azimuthwerte von je -90.4° (1 N) beziehungsweise von -84.0 und -78.2° (für 2 und 4 N). Für die dritte Polarkoordinate, den Zenith, fanden sich keine

¹Die Transversalachse nimmt hier links der Medianebene negative und rechts davon positive Werte an. Eigentlich werden die anatomischen Achsenbezeichnungen nicht standardmäßig in diesem Zusammenhang verwendet, allerdings bieten sie sich hier in der Beschreibung an, da sie anders als das kartesische Koordinatensystem eindeutig definiert sind.

signifikanten Ergebnisse, weswegen hier und in den folgenden Experimenten von einer Interpretation dieses Maßes abgesehen wird.

Radiale Distanz nach 100 ms und 300 ms

100 ms nach Verlassen des Kraftfeldes zeigt sich ein ganz ähnliches Bild wie weitere 100 ms später (siehe Abschnitt 2.3.2). Für zunehmende Tiefen der Kraftfelder nimmt die radiale Distanz von 13.1 mm für 40 mm, auf 12.3 mm für 50 mm und 12.1 mm für 60 mm ab ($F(2, 22) = 12.7, p < 0.001$). Für Kraftfelder der Stärke 1, 2 und 4 N, nimmt die radiale Distanz dagegen von 7.6 auf 11.3 und 18.6 mm zu ($F(2, 22) = 523.6, p < 0.001$). Auch der Interaktionseffekt zwischen Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Tiefe_{Kraftfeld} wurde erneut signifikant ($F(2, 22) = 8.5, p < 0.01$). Schon hier findet sich das Muster, das bereits für 200 ms nach Ende des Kraftfeldes gezeigt werden konnte: während für Blöcke mit variabler Tiefe die radiale Distanz von 13.7 auf 12.4 und 11.9 mm kontinuierlich abnimmt, zeigt sich bei Blöcken mit konstanter Tiefe der Kraftfelder bei annähernder Gleichheit der Werte die geringste radiale Distanz für Kraftfelder mit 50 mm Tiefe (12.5, 12.2 und 12.3 mm entsprechend für Kraftfeldtiefen von 40, 50 und 60 mm).

Auch nach 300 ms ergibt sich ein sehr ähnliches Bild wie nach 200 ms, was letztendlich das Vorgehen bestätigt. Zu diesem Zeitpunkt ist das Stoppen mit Sicherheit wieder unter willkürlicher Kontrolle. Für Kraftfelder der Tiefen 40, 50 und 60 mm liegt die bis zum Zeitpunkt 300 ms zurückgelegte radiale Distanz bei je 17.2, 15.6 und 15.5 mm und dieser Haupteffekt ist wieder signifikant ($F(2, 22) = 6.1, p < 0.05$). Ein deutlicher Haupteffekt findet sich auch wieder für den Faktor Stärke_{Kraftfeld}, innerhalb dessen die radiale Distanz für 1, 2 und 4 N von 12.1 und 15.0 auf 21.3 mm ansteigt ($F(2, 22) = 36.5, p < 0.001$). Auch der Interaktionseffekt zwischen Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Tiefe_{Kraftfeld} findet sich erneut ($F(2, 22) = 7.7, p < 0.01$): während es bei Blöcken von variabler Tiefe zu einer konstanten Abnahme kommt (18.3, 15.7 und 14.5 mm), sind die radialen Distanzen in Blöcken mit konstanter Tiefe für die Bedingung mit 50 mm wieder am kürzesten (16.2, 15.4 und 16.3 mm).

Maximum im Azimuth und Radiale Distanz bis zum Maximum

Wie auf Abbildung 2.8 zu erkennen, ist insbesondere ein Maximum im Azimuth charakteristisch für fast alle Bewegungen. In der Tat konnte es bei 97.2% der Bewegun-

gen festgestellt werden, was eine Analyse der Daten in dieser Hinsicht rechtfertigt. Das Maximum des Azimuths wird im Mittel nach 94 ms erreicht (STD: 0.02). Es findet sich erneut der sehr stabile Haupteffekt für die Stärke des Kraftfeldes. Der Azimuth steigt von -82.2 auf -74.9 und -68.3° für Kraftfelder der Stärke 1, 2 und 4 N ($F(2, 22) = 107.2, p < .001$). Daneben findet sich noch ein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Stärke_{Kraftfeld} ($F(2, 22) = 5.5, p < 0.05$), der darauf beruht, dass der Azimuth für die Stärke des Kraftfeldes in den konstanten Blöcken stärker ansteigt als für die variablen Blöcke ($-82.6, -74.4$ und -67.8° für die konstanten Blöcke und je 1, 2 und 4 N versus je $-81.9, -75.4$ und -68.9° für die variablen Blöcke).

Für die radiale Distanz bis zum Maximum des Azimuths fand sich neben den erneut erwartungsgemäß steigenden Werten (von 7.0 auf 10.8 und 18.2 mm) für die Stärke der Kraftfelder ($F(2, 22) = 307.5, p < 0.001$) ein Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Tiefe_{Kraftfeld} ($F(2, 22) = 4.7, p < 0.05$), der darauf beruht, dass sich die radiale Distanz für konstante und variable Blöcke für 40, 50 und 60 mm unterschiedlich entwickeln. Während die radiale Distanz in den variablen Blöcken mit zunehmender Tiefe des Kraftfeldes absinkt (von 13.1 auf 11.9 und 11.5 mm), steigt er für Blöcke mit konstanten Kraftfeldtiefen leicht an (von 11.7 auf 11.8 und 12.1). Dieser Effekt ist jedoch recht klein (siehe Abbildung 2.10).

2.3.3 Zentrale Modulation der Stoppbewegung

Anpassungseffekte

Eine mögliche Anpassungsstrategie, um die Aufgabe des Stoppens einer Bewegung nach abrupten dynamischen Transformationen möglichst erfolgreich auszuführen, ist die Anpassung der Bewegung vor Ende des Kraftfeldes. Je langsamer diese ist, desto schneller kann gestoppt werden. Die Bewegungen der Versuchspersonen durch das Kraftfeld wurden zwar in engen Grenzen gehalten und wiederholt, wenn diese Grenzen nicht eingehalten wurden, allerdings bestand dennoch ein gewisser Spielraum. Ob und inwiefern die Versuchspersonen diesen nutzten, wird im Folgenden untersucht.

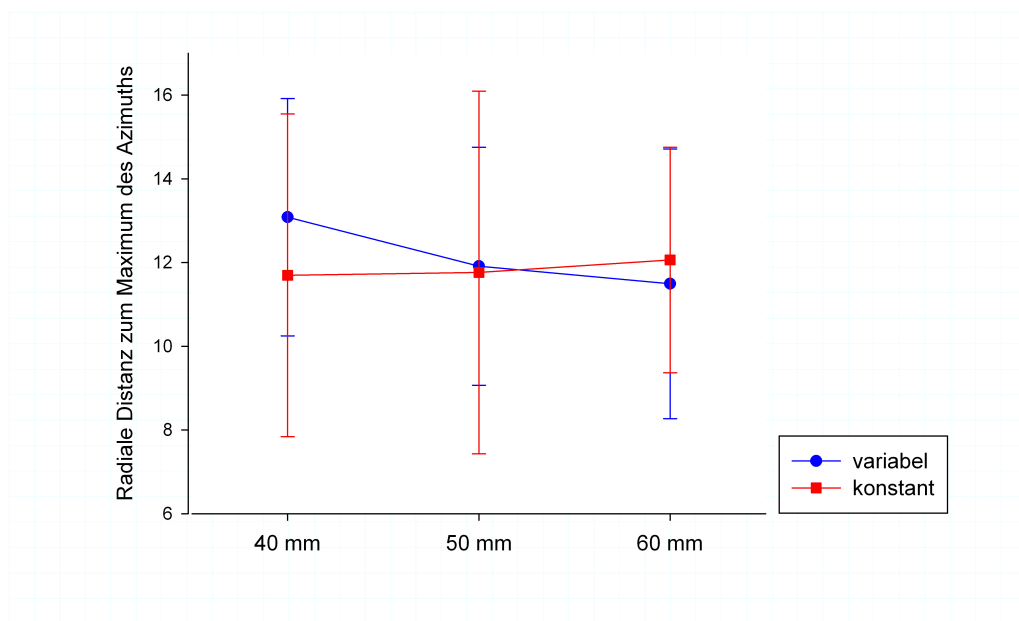


Abbildung 2.10: Radiale Distanz zum Maximum des Azimuths. Darstellung des Interaktionseffektes zwischen den Faktoren Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Tiefe_{Kraftfeld} ($F(2, 22) = 4.7, p < 0.05$).

Die Geschwindigkeit vor Austritt aus dem Kraftfeld wird dabei mittels der radialen Distanz zwischen dem Zeitpunkt 10 ms vor dem Austritt und dem Austritt selbst, erfasst. Das heißt, sie entspricht der in den letzten 10 ms im Kraftfeld zurückgelegte Strecke. Die Korrelation zwischen der radialen Distanz zum Zeitpunkt 10 ms vor dem Austritt aus dem Kraftfeld und der radialen Distanz zum Zeitpunkt 200 ms nach dem Austritt wird vor der statistischen Analyse Fisher-Z-transformiert, weil Korrelationswerte selbst nicht normalverteilt sind. Der Fisher-Z-Wert ergibt sich dabei aus der Korrelation r als:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right)$$

Aus den Fisher-Z-Werte lassen sich wiederum die Korrelationen berechnen zu:

$$r = \frac{e^{2Z} - 1}{e^{2Z} + 1}$$

Während kleine Korrelations- und Fisher-Z-Werte annähernd übereinstimmen, ein Fisher-Z-Wert von 0.4 entspricht etwa einer Korrelation von 0.38, steigt die Diskrepanz für große Werte an. Ein Fisher-Z-Wert von 0.8 entspricht einer Korrelation von 0.66, einer von 1.2 einer Korrelation von 0.83.

Es fand sich ein Haupteffekt für den Faktor Stärke des Kraftfeldes ($F(2, 22) = 9.3, p < 0.001$), wo sich ein Fisher-Z-Wert von 1.03 für 1 N, von 0.56 für 2 N und von 0.32 für 4 N ergab. Während also die Geschwindigkeitsanpassung bei 1 N eine Rolle gespielt hat, ist bei den anderen beiden Kraftfeldstärken keine Anpassung der Bewegung vor dem Austritt aus dem Kraftfeld zu verzeichnen. Darüber hinaus wurde die Interaktion zwischen $Tiefe_{Kraftfeld}$ und $Stärke_{Kraftfeld}$ ebenfalls signifikant ($F(4, 44) = 4.1, p < 0.01$). Diese Interaktion ist darauf zurückzuführen, dass je geringer die Tiefe des Kraftfeldes ist, der Fisher-Z-Wert über die Stärke des Kraftfeldes deutlicher abnimmt. Reduziert er sich für 40 mm Kraftfelder von 1.20 auf 0.54 und 0.20 (für je 1, 2 und 4 N), reduziert er sich für 50 mm Kraftfelder von 0.98 auf 0.47 und 0.30 und hat den flachsten Verlauf für 60 mm Kraftfelder mit Fisher-Z-Werten von je 0.91, 0.66 und 0.48 für Kraftfelder der Stärke 1, 2 und 4 N. Das bedeutet, dass der Einfluss der Stärke des Kraftfeldes mit zunehmender Tiefe des Kraftfeldes abnimmt.

Lerneffekte

Die zentralnervöse Modulation des Stoppens kann durch die Mittelwertsbildung in den vorigen Analysen auch kaschiert werden. Um den Lernprozess über die Durchgänge zu analysieren, wurde für alle 12 Versuchspersonen die radiale Distanz nach 200 ms über alle Durchgänge hinweg abgetragen und pro Block eine lineare Kleinste-Quadrate-Anpassung vorgenommen.

Das Ergebnis ist in Abbildung 2.11 getrennt für jeden Block dargestellt. Die Blöcke mit konstanter Kraftfeldtiefe sind rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt, die variablen blau mit offenen Kreisen und die Kurvenanpassungen in schwarz. Für die statistische Analyse wurde die variable und konstante Darbietung jeweils zusammengefasst. Analysiert wurden die Steigungskoeffizienten, wobei sich kein Unterschied zwischen der variablen und der konstanten Darbietung ergab. Die Steigungskoeffizienten lagen für die variable Darbietung bei $-.02$ und für die konstante Darbietung bei $.01$. Für die variable Darstellung ist das ein erwartetes Ergebnis und der fehlende Unterschied und die geringe Ausprägung der Steigungskoeffizienten legen nahe, dass hier auch unter vorhersagbaren Bedingungen kein Lernen stattfindet.

2.4 Diskussion

Hinsichtlich der Fragestellung (vergleiche Abschnitt 2.1) ergibt sich folgendes Bild. Die Eigenschaften der Kraftfelder haben den erwarteten deutlichen Einfluss auf die verwendeten Stoppmaße. Je stärker das Kraftfeld ist, desto größer ist die radiale Distanz bis zum Messzeitpunkt. Für die Tiefe des Kraftfeldes wurde für Blöcke mit gemischter Darbietung der Kraftfeldtiefen, jedoch nicht für Blöcke mit konstanten Kraftfeldtiefen, der vorhergesagte Effekt der Reaktionszeitalterung gefunden. Das spricht für eine mögliche Beteiligung antizipativer, zentraler Prozesse, wobei die gefundenen Effekte allerdings recht gering ausfallen. Die Interaktion zwischen der Tiefe des Kraftfeldes und der Vorhersagbarkeit der Tiefe spricht dafür, dass unter diesen beiden Bedingungen unterschiedliche Strategien der Bewegungssteuerung verwendet werden.

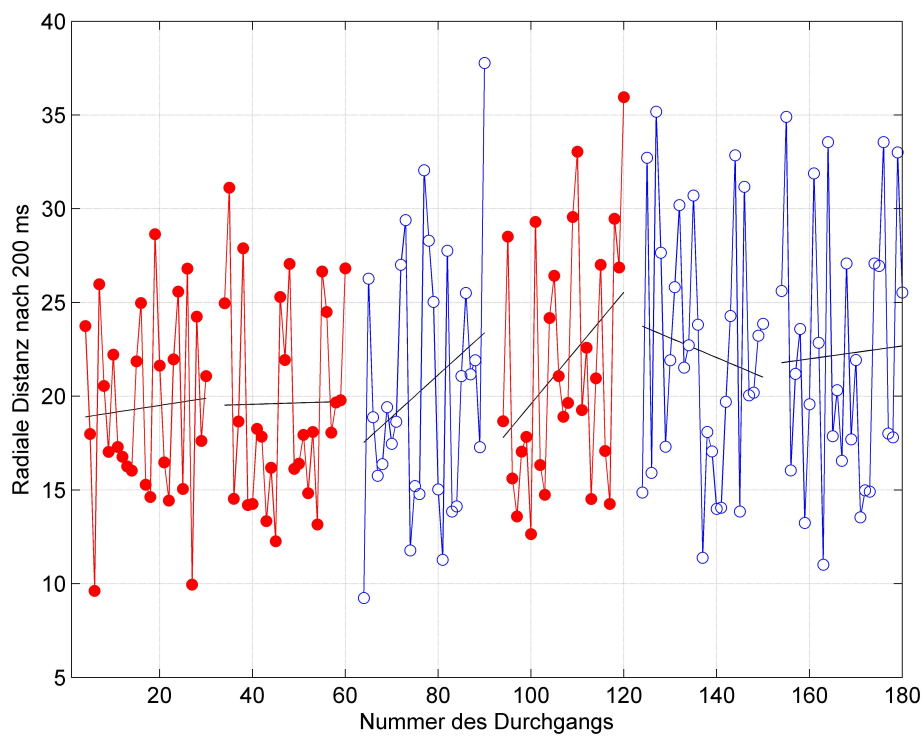


Abbildung 2.11: Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfeldtiefen, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfeldtiefen. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet.

Eine Strategie, die sich insbesondere für Kraftfelder geringer Stärke als erfolgreich erweist, ist die Anpassung der Geschwindigkeit. Die geringe Korrelation zwischen der radialen Distanz nach 200 ms und der Geschwindigkeit für Kraftfelder größerer Stärke muss dabei nicht für einen mangelnden Einfluss der Geschwindigkeit in diesem Falle sprechen. Mögliche Ursache dafür ist auch eine geringere Variabilität der Geschwindigkeit vor Austritt aus dem Kraftfeld bei Kraftfeldern von 2 und 4 N Stärke. In den Daten lassen sich allerdings keine größeren Unterschiede in der Variabilität für die radiale Distanz zum Zeitpunkt 10 ms vor Austritt aus dem Kraftfeld finden. Trotz Einfluss auf die Stoppmaße erklärt die Geschwindigkeitsanpassung also nicht die spezifischen Effekte in den Daten.

Neben dem beschriebenen Effekt der Reaktionszeitalterung und erster Hinweise auf das Verwenden weiterer Strategien, abgesehen von der Anpassung der Geschwindigkeit, wurden hier keine weitere Hinweise auf eine zentralnervöse Modulation, insbesondere im Bezug auf Lerneffekte, gefunden. Dies liegt vermutlich daran, dass die Stärke des Kraftfeldes stets variiert wurde und so einen möglichen Lerneffekt überdeckte (vergleiche Abbildung 2.11).

Neben der möglichen zentralnervösen Beteiligung wird aber mit Blick auf die Bewegungsmuster (vergleiche Abbildung 2.3.1) und den starken Einfluss der Stärke des Kraftfeldes deutlich, dass die Bewegung zu einem Großteil auch durch mechanische und gegebenenfalls reflektorische Prozesse mit bestimmt wird. Dafür sprechen insbesondere die stereotypen Rückbewegungen, die sich in quasi allen Bewegungen der Versuchspersonen fanden.

Während die angesprochenen Unterschiede in den Strategien zwischen vorhersagbaren und weniger vorhersagbaren Situationen besonders in Experiment 3 und 4 geklärt werden sollen, wird im nächsten Experiment der Einfluss der Vorhersagbarkeit der Kraftfeldstärke untersucht. Durch das Konstanthalten der Kraftfeldtiefe soll dabei eine Kaschierung des Lerneffektes, wie sie in Experiment 1 durch die stets vorhandene Variation der Kraftfeldstärke möglich war, verhindert werden. Da die Kraftfeldtiefe konstant gehalten wird, sind in Experiment 2 keine antizipativen Vorperiodeneffekte zu erwarten. Die Variation der Vorperioden wird erneut in Experiment 3 aufgenommen.

3 Experiment 2

3.1 Fragestellung

Generelle Zielstellung bleibt es, den Umgang des Zentralen Nervensystems mit den Anforderungen, die das Stoppen nach abrupter dynamischer Transformation stellt, zu untersuchen. Nach der Aufdeckung deutlicher mechanischer Beteiligung im ersten Experiment, soll weiter nach der Rolle zentraler Prozesse geforscht werden.

Nachdem in Experiment 1 die Vorhersagbarkeit der Kraftfeldtiefe manipuliert wurde, wird im zweiten Experiment zum einen die Vorhersagbarkeit insgesamt verbessert, indem es Blöcke gibt, in denen Kraft und Tiefe konstant gehalten werden und dabei die Rolle der Vorhersagbarkeit der Kraft näher beleuchtet.

Den Versuchspersonen wird im zweiten Experiment nur noch eine Vorperiode, das heißt eine Kraftfeldtiefe dargeboten, im Vordergrund steht der potentiell störende Aspekt der Kraftfeldstärkenvariation. Ohne diese Störung sollte sich ein klarer Vorteil für die geblockte Darbietung der Kraftfeldstärken ergeben. Reaktionszeitalterungseffekte wie in Experiment 1 sind hier nicht zu erwarten.

3.2 Methode

3.2.1 Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen 11 Versuchspersonen, 6 Frauen und 5 Männer im Alter zwischen 20 und 26 Jahren (MW: 22.9; STD: 2.0) freiwillig teil. Das Experiment dauerte zirka eine Stunde, wofür die Versuchspersonen eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro erhielten.

3.2.2 Design und Ablauf

Apparatur und Aufgabe entsprachen Experiment 1 (siehe Seite 28 – 30). Das Experiment umfasste erneut 180 Durchgänge in sechs Blöcken zu je 30 Durchgängen. Die sechs Blöcke wurden pseudorandomisiert dargeboten und teilten sich in 3 Blöcke mit konstanter Kraftfeldtiefe (50 mm) und konstanter Kraftfeldstärke (1, 2 oder 4 N) und drei Blöcken mit konstanter Kraftfeldlänge (50 mm) aber variabler Kraftfeldstärke. Im Gegensatz zu Experiment 1 wurden auch die ersten drei Durchgänge eines Blockes in die Auswertung mit einbezogen, so dass sich damit 30 Wiederholungen pro Faktorstufenkombination anstatt nur 9 in Experiment 1 ergeben. Das sollte zusätzlich die Robustheit der Mittelwertschätzungen etwas erhöhen. Damit ergibt sich ein Messwiederholungsdesign mit 2 Faktoren (a) die Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N) und (b) die Vorhersagbarkeit der Stärke des Kraftfeldes, das heißt entweder eine geblockte oder variable Darbietung der Kraftfeldstärken.

Auch der Ablauf entsprach weitgehend dem Ablauf aus Experiment 1 (siehe Abschnitt 2.2.4). Einzige Änderung gegenüber Experiment 1 betraf die Wiederholung der Durchgänge, welche die Kriterien nicht erfüllten: während sie in Experiment 1 direkt nach dem ungültigen wiederholt wurden, kam in Experiment 2 zunächst der regulär nächste dran und der zu wiederholende Durchgang wurde ans Ende des Blockes gestellt.

3.2.3 Datenanalyse

Die Daten wurden wie in Experiment 1 aufbereitet. In Experiment 2 hatte keine der Versuchspersonen Probleme bei der Einhaltung der Bewegungskriterien. Es gab demzufolge keinen Anlass, die Daten auf Ausreißer hin zu überprüfen. Alle Versuchspersonen und die gültigen Durchgänge wurden in die Analyse mit aufgenommen.

3.3 Ergebnisse

Erneut wurden die Voraussetzungen für die statistischen Auswertungen überprüft. Bei nicht gegebener Sphärizität wurden die korrigierten Greenhouse-Geisser-Werte mit den unkorrigierten Freiheitsgraden berichtet.

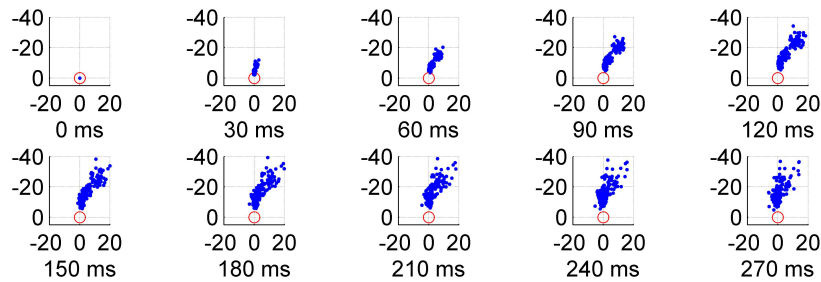


Abbildung 3.1: Draufsicht der Positionsdaten aller Bewegungen einer Versuchsperson zu 10 verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert.

3.3.1 Bewegungsmuster

Die in Experiment 1 gefundenen stereotypen Bewegungsmuster bestätigen sich in Experiment 2. Wieder kommt es zunächst zu einer ballistischen Bewegung entgegen der Richtung des Kraftfeldes nach vorne, die ab 60 ms immer mehr nach seitlich rechts abweicht. Etwa 150 ms nach dem Austritt aus dem Kraftfeld nimmt die Variabilität in den Bewegungen deutlich zu und die Bewegungen erreichen ihre größte Ausdehnung (vergleiche Abbildung 3.1). Danach kommt es zu einer stereotypen Rückbewegung, die deutlicher in Abbildung 3.2 zu erkennen ist.

3.3.2 Stoppen

Polarkoordinaten nach 200 ms

Die radiale Distanzen nach 200 ms flossen in eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ein; der erste Faktor war dabei die Stärke der Kraftfelder, der zweite Faktor die Vorhersagbarkeit der Stärke. Die Ergebnisse weisen einen Haupteffekt für die Stärke des Kraftfeldes aus. Für 1, 2 beziehungsweise 4 N finden sich radiale Distanzen von je 10.9, 13.1 und 16.7 mm ($F(2, 20) = 57.6, p < 0.001$). Des Weiteren findet sich ein Interaktionseffekt zwischen der Tiefe des Kraftfeldes und der Vorhersagbarkeit der Tiefe

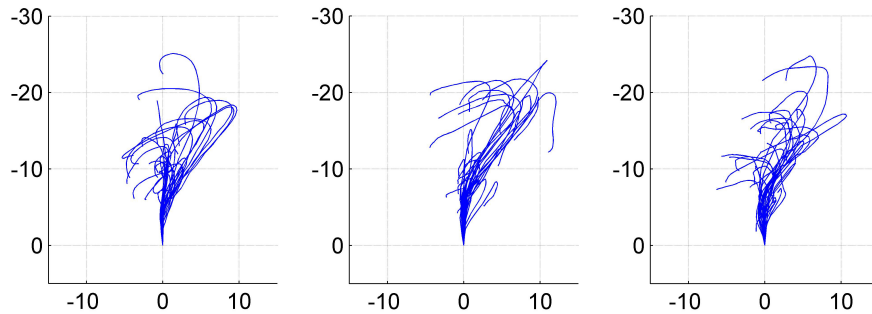


Abbildung 3.2: Draufsicht auf die Trajektorien einer Faktorstufenkombination, beispielhaft dargestellt anhand der Daten dreier Versuchspersonen. Positionsangaben in mm.

($F(2, 20) = 12.5, p < 0.001$), der darauf zurückzuführen ist, dass sich der zunächst bei 1 N vorhandene Vorteil für die konstanten Blöcke für Kraftfelder der Stärke 4 N in einen Nachteil umkehrt (vergleiche Abbildung 3.3). Während die radialen Distanzen nach 200 ms sich in Blöcken mit variabler Kraftfeldstärke von 12.2 mm für 1 N auf 12.6 und 15.3 mm für 2 beziehungsweise 4 N erhöhen, ist der Anstieg von 9.7 auf 13.6 und 18.1 mm in Blöcken mit konstanter Kraftfeldstärke deutlich stärker. Daraus geht auch deutlich hervor, warum die Vorhersagbarkeit als Haupteffekt erneut nicht signifikant wurde. Für den Azimuth wurden in Experiment 2 keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Radiale Distanz nach 100 ms und 300 ms

Für die radiale Distanz nach 100 ms ergibt sich das gleiche Ergebnismuster wie für die radiale Distanz 100 ms später. Für Kräfte von 1, 2 und 4 N steigt sie von 9.1 auf 11.4 und 15.6 ($F(2,20) = 207.2, p < 0.001$), wobei der Anstieg je nach Vorhersagbarkeitsbedingung unterschiedlich ausfällt: für die Blöcke mit variabler Stärke ergibt sich ein flacherer Anstieg von 10.6 auf 11.4 und 14.0 mm, für die Blöcke mit konstanter Stärke ein Anstieg von 7.7 auf 11.4 und 17.3 mm für Kraftfelder der Stärke 1, 2 und 4 N respektive.

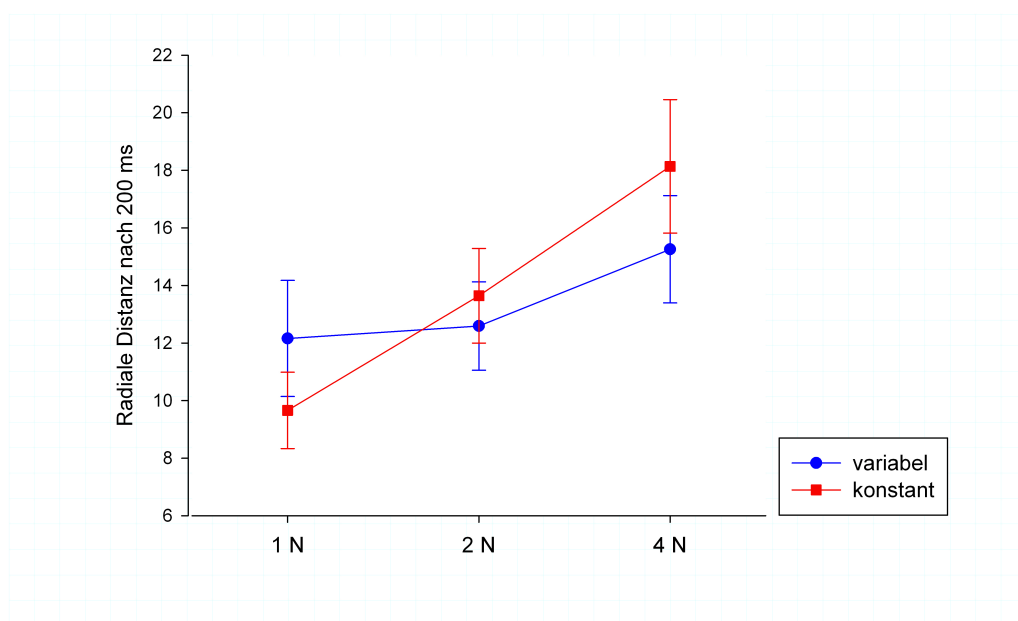


Abbildung 3.3: Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Stärke der Kraftfelder innerhalb eines Blockes).

Dieses Muster findet sich im Großen und Ganzen auch 300 ms nach Austritt aus dem Kraftfeld. Mit steigender Stärke steigt die radiale Distanz von 11.3 auf 12.5 und 15.6 mm ($F(2, 20) = 21.8, p < 0.001$). Die Interaktion zwischen Vorhersagbarkeit und Stärke des Kraftfeldes verläuft mit einem leicht anderen Muster. Während es in Blöcken mit konstanter Kraftfeldstärke zu einem stetigen, relativ steilen Anstieg kommt (10.1, 12.9 und 16.6 mm), ist er für variable Blöcke flacher und nimmt für Kraftfelder mit einer Stärke 2 N den kleinsten Wert an (12.1 mm für 2 N, gegenüber 12.5 und 14.5 mm für 1 und 4 N). Aber auch hier erreicht die Interaktion Signifikanz ($F(2, 20) = 7.3, p < 0.01$).

Maximum im Azimuth und Radiale Distanz bis zum Maximum

Für den Azimuth konnten in Experiment in 95.5% der Fälle ein Maximum festgestellt werden. Es wird im Schnitt nach 93 ms erreicht (STD: 0.02). Das Maximum im Azimuth steigt mit der Stärke des Kraftfeldes von -81.5 auf -79.1 und -75.8° an ($F(2, 20) = 37.5, p < 0.001$). Der Verlauf ist bei einem höheren Startwert für die variablen Blöcke flacher ($-80.0, -78.5, -77.1^\circ$) als für die Blöcke mit konstant gehaltener Kraftfeldstärke ($-83.0, -79.7, -74.5^\circ$). Dieser Interaktionseffekt ist signifikant ($F(2, 20) = 6.9, p < 0.01$).

Die radiale Distanz bis zum Maximum des Azimuths steigt von 8.6 auf 10.6 und 14.6 ($F(2, 20) = 124.3, p < 0.001$). Das Muster der Interaktion ($F(2, 20) = 14.8, p < 0.01$) zwischen Stärke des Kraftfeldes und Vorhersagbarkeit der Stärke bleibt gegenüber den anderen Distanzmaßen erhalten. Für die Blöcke mit variabler Stärke kommt es zu einem flacheren Anstieg, der auf höherem Niveau beginnt (10.1, 10.8 und 13.2 mm), während der Anstieg in Blöcken mit konstanten Kraftfeldstärken auf niedrigerem Niveau beginnt und auf höherem Niveau endet (7.1, 10.4 und 16.0 mm). Dieses Muster ist auch zu erwarten gewesen, nachdem es 7 ms später bereits getestet wurde (siehe Abschnitt 3.3.2) und wird nicht weiter interpretiert.

3.3.3 Zentrale Modulation der Stoppbewegung

Anpassungseffekte

Erneut wurde der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit vor Austritt aus dem Kraftfeld und der radialen Distanz nach 200 ms untersucht. Der Haupteffekt für die Vorhersagbarkeit der Kraftfeldstärke ist dabei hochsignifikant ($F(1, 10) = 21.1, p < 0.001$),

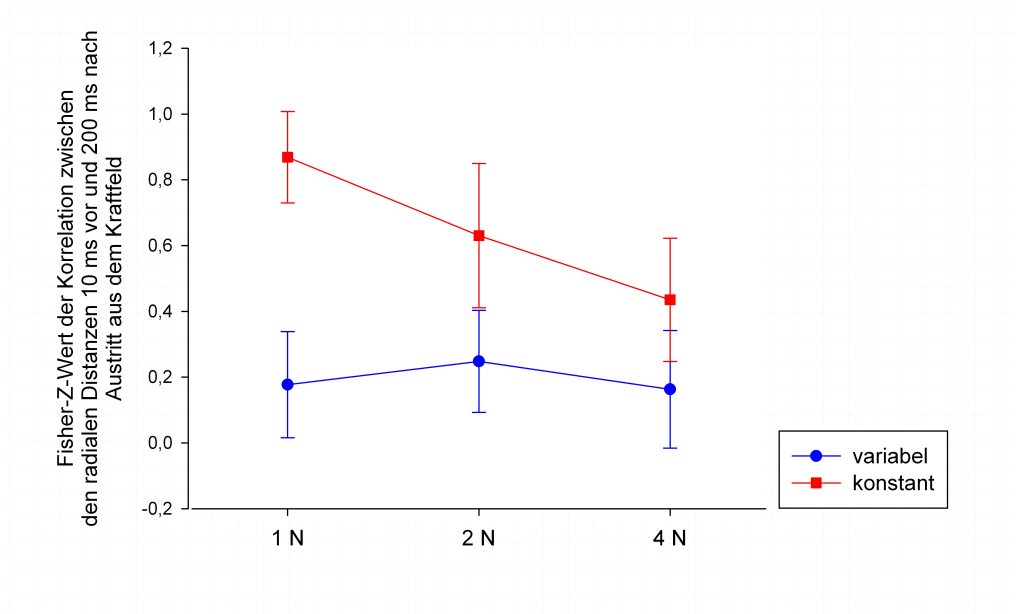


Abbildung 3.4: Fisher-Z-Werte der Korrelationen zwischen den radialen Distanzen 10 ms vor und 200 ms nach Austritt aus dem Kraftfeld. Ein Fisher-Z-Wert von 1.0 (0.6, 0.4) entspricht dabei einer Korrelation von $r = 0.76$ (0.54, 0.38).

wobei in den Blöcken mit konstanten Kraftfeldstärken der Fisher-Z-Wert im Schnitt deutlich über dem der Blöcke mit variablen Kraftfeldstärken liegt (0.64 versus 0.20). Darüber hinaus sinkt mit Zunahme der Kraftfeldstärke der Zusammenhang signifikant ($F(2, 20) = 4.8, p < 0.05$), und zwar von 0.52 mm für 1 N über 0.44 mm für 2 N auf 0.30 mm für 4 N. Der Interaktionseffekt ($F(2, 20) = 8.1, p < 0.01$) beruht, wie in Abbildung 3.4 gut zu erkennen ist, darauf, dass es in variablen Blöcken für alle Kraftfeldstärken keinen Zusammenhang zwischen den beiden radialen Distanzen gibt (0.18, 0.25 und 0.16 für 1, 2 und 4 N entsprechend), während er für die Blöcke mit konstanten Kraftfeldstärken deutlich darüber liegt, über die Stärke der Kraftfelder hinweg jedoch abnimmt (je 0.87, 0.63 und 0.44).

Lerneffekte

Wie in Experiment 1 ist auch in Experiment 2 in den konstanten Blöcken kein Lernen zu erkennen (in Abbildung 3.5 sind beispielhaft die Daten einer Versuchsperson abgetragen). Für Blöcke mit variablen Kraftfeldstärken hängen die Steigungskoeffizienten hauptsächlich von der Reihenfolge der dargebotenen Kraftfeldstärken ab, so dass lediglich eine Betrachtung der Blöcke mit konstanter Kraftfeldstärke sinnvoll ist. Nach der statistischen Analyse der Steigungskoeffizienten, die keine Unterschiede zwischen variabler und geblockter Darbietung der Kraftfeldstärken aufdecken konnte, legt auch die numerische Ausprägung der Steigungskoeffizienten keinen Lerneffekt nahe. Es findet sich im Schnitt je ein Steigungskoeffizient von -0.01 für die variable Darbietung beziehungsweise von 0.00 für die geblockte Darstellung der Kraftfeldstärken.

3.4 Diskussion

Wie in Experiment 1 findet sich wieder ein deutlicher Einfluss der Stärke des Kraftfeldes auf die radiale Distanz nach 200 ms, allerdings ist der Einfluss der Kraftfeldstärke abhängig von der Darbietungsform. Blieben die Kraftfeldstärken innerhalb eines Blockes konstant, stiegen die radialen Distanzen nach 200 ms wie in Experiment 1 unterproportional an und zwar im Verhältnis 1:1.4:1.9. Für Blöcke mit variabler Kraftfeldstärke fand sich allerdings ein signifikant flacheres Anwachsen mit einem Verhältnis von 1:1.0:1.3. Führt man diese unterproportionale Entwicklung auf die dämpfenden Eigenschaften der Armmuskulatur zurück, lässt sich dieses Ergebnis mit einer höheren Kokontraktion im Falle variabler Kraftfeldstärken erklären – im Falle einer variablen, schlechter vorhersagbaren Umwelt wird der Arm stärker kokontrahiert.

Dass die Vorhersagbarkeit der Kraftfeldstärke das Stoppen moduliert, ist dabei als Hinweis darauf zu verstehen, dass es nach dem Aufschalten der Kraft nicht zu einer vollständigen Anpassung an das Kraftfeld kommt. Denn die Höhe der abrupten dynamischen Transformation lässt sich eigentlich in jedem Durchgang, sobald die Kraft voll aufgeschaltet ist, feststellen. Dass es dennoch zu einer Modulation durch die Vorhersagbarkeit kam, liegt eventuell an einer Konfundierung von Kraftfeldstärke und wahrgenommener Kraftfeldtiefe. Wird die Kraftfeldtiefe von hier konstanten 50 mm je nach

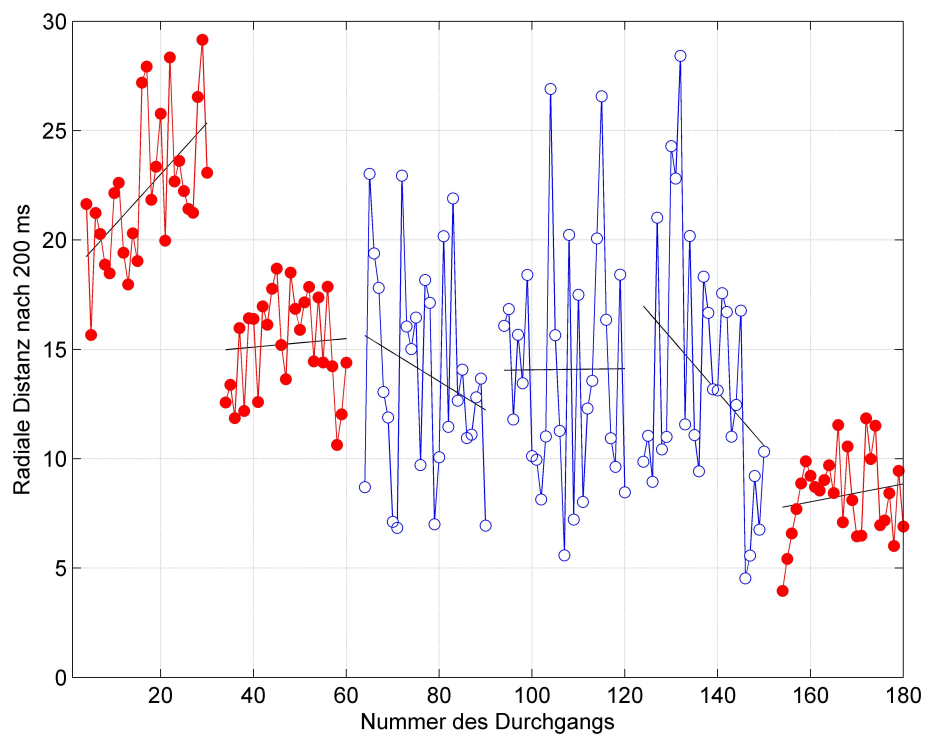


Abbildung 3.5: Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfeldstärken, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfeldstärken. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet.

Stärke des Kraftfeldes unterschiedlich wahrgenommen, ist den Versuchspersonen zwar in allen Blöcken die dynamische Transformationen bekannt, den Zeitpunkt des Abfalls konnten sie jedoch in Blöcken mit konstanter Kraftfeldtiefe besser einschätzen.

Neben dem Einsatz der Kokontraktion unter der Bedingung variabler Kraftfeldstärken, deutet das Ergebnismuster für die in Fisher-Z-Werte umgewandelten Korrelationen zwischen den radialen Distanzen 10 ms vor und 200 ms nach dem Austritt aus dem Kraftfeld darauf hin, dass hier die Geschwindigkeitsanpassung als Strategie eingesetzt wurde. Die Fisher-Z-Werte sind allerdings nur für den Fall schwacher Kraftfelder von 1 N Stärke hoch genug, damit man von einem bedeutsamen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Stoppmaß sprechen kann.

Nimmt man nun an, dass in Blöcken mit konstanten Kraftfeldstärken die Strategie der Geschwindigkeitsanpassung überwog, während die Versuchspersonen in Blöcken mit variabler Kraftfeldstärke eher die Impedanzkontrolle via Kokontraktion bevorzugten, erklärt das die Ergebnisse in Abbildung 3.3 recht gut. Kokontraktion führt im Allgemeinen zu einer höheren Dämpfung und zu einem geringeren Einfluss dynamischer Transformationen. Die höheren radialen Distanzen nach 200 ms im Falle schwacher Kraftfelder sind nicht durch einen Unterschied in der Geschwindigkeit vor Austritt aus dem Kraftfeld zurückzuführen. Möglicherweise sind sie mit der Wechselwirkung zwischen Kokontraktion und Dehnungsreflex erklärbar. So kommt es unter Kokontraktion zur Abnahme der Reflextätigkeit (Nielson & Kagamihara, 1993), was bei Kraftfeldern von 1 N womöglich zu einer schlechteren Leistung führt. Allerdings ist kaum vorstellbar, dass die Reflextätigkeit hier zu einer besseren Stabilisierung führt als die Kokontraktion. Allerdings kommt es unter Kokontraktion zusätzlich zu einer geringeren Sensibilität gegenüber externen Störungen (Wise et al., 1998), so dass die Kokontraktion nicht ausreichend an die Richtung der Störung angepasst werden kann, das heißt die Steifigkeit wird entlang einer Achse erhöht, die nicht der Hauptrichtung der Störung entspricht. Dazu passt die Aussage einiger Versuchspersonen, dass sie das Aufschalten des schwachen 1-N-Kraftfeldes kaum bemerkten. Ohne EMG lässt sich diese Frage jedoch nicht endgültig klären.

Beide Strategien, wobei anhand der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie zeitgleich zum Einsatz kommen, müssen nicht gelernt werden, erfordern in dem Sin-

ne nicht den Aufbau innerer Modelle und so findet sich hier wie in Experiment 1 kein Lerneffekt. Deutlich wird damit aber auch, dass sich die schlechtere Leistung in Blöcken mit einer konstanten Kraftfeldlänge von 4 N nicht auf Ermüdung, sondern tatsächlich eher auf Strategieunterschiede zurückführen lassen.

Aus der Analyse der radialen Distanzen zum Maximum des Azimuths ergeben sich wie in Experiment 1 deutliche Hinweise auf den Einfluss mechanischer und peripherer Größen. Die Rückbewegung beginnt in etwa bei 93 ms und damit noch vor der willkürlichen Reaktionszeit. Da das Ergebnismuster zu diesem Zeitpunkt bereits hervortritt, kann es letztendlich nur auf Prozesse, die vor dem Austritt aus dem Kraftfeld einsetzen oder auf Reflexe und mechanische Eigenschaften im Allgemeinen zurückzuführen sein. Für eine Beteiligung mechanischer und reflektorischer Prozesse spricht der erneut gefundene, hohe Grad an Stereotypie der Bewegungen.

Neben der Vorhersagbarkeit der Kraftfeldtiefe (Experiment 1) hat also auch die Vorhersagbarkeit der Kraftfeldstärke (Experiment 2) einen modulierenden Einfluss auf das Stoppen nach abrupten dynamischen Transformationen. Weiter wurde gegenüber Experiment 1 der große Einfluss mechanischer und peripherer Größen bestätigt. Offen bleibt die Wechselwirkung zwischen Reflexen und Impedanzkontrolle. Letztere wurde aufgrund der Modulation der Steifigkeit in Abhängigkeit der Vorhersagbarkeit der Kraftfeldstärke neben der Geschwindigkeitsanpassung als weitere Strategie identifiziert. Die Interaktion zwischen diesen Strategien ist allerdings schwer zu erfassen. Vermutlich wird auch in Blöcken mit konstanter Kraftfeldstärke ab einer gewissen Kraftfeldstärke vermehrt zur Impedanzkontrolle gegriffen und der Einfluss der Geschwindigkeitsanpassung geht zurück. Während die Geschwindigkeitsanpassung als Strategie nicht weiter untersucht wird, soll in den Experimenten 3 und 4 die Impedanzkontrolle näher untersucht werden. Im nächsten Experiment wird deshalb das Paradigma modifiziert. Es werden zum einen keine Bewegungen mehr durch ein Kraftfeld durchgeführt. Die Versuchspersonen werden vielmehr dazu angehalten eine Position gegen eine Gegenkraft zu halten. Zum anderen wird nun die Kraftfeldstärke konstant gehalten und nur die Zeit zwischen Auf- und Abschalten der Kraftfelder variiert. Damit gibt es in Experiment 3, anders als in Experiment 1, echte zeitliche Vorperioden, die nicht an eine räumliche Größe, hier die Tiefe des Kraftfeldes, gekoppelt sind. Es sind also wieder antizipative Vorperiodeneffekte

zu erwarten, insbesondere wird eine Bestätigung der in Experiment 1 gefundenen Reaktionszeitalterung untersucht. Um die Rolle der Steifigkeit näher zu untersuchen, wird als dritte Modifikation die Richtung der Kraftfelder variiert, was die nähere Untersuchung der Modulation des Stoppens durch Impedanzkontrolle ermöglicht.

4 Experiment 3

4.1 Fragestellung

Mit den ersten beiden Experimenten wurden bereits wichtige Aspekte des Stoppens nach abrupten dynamischen Transformationen aufgedeckt. Schmidt (1968) vermutet, dass Versuchspersonen, sobald ein Aspekt einer Reaktionsaufgabe nicht vorhersagbar ist, dazu neigen eine Strategie zu wählen, die sie im Mittel zum besten Erfolg führt. Das muss nicht bedeuten, dass die Strategie, die unter der geblockten oder gemischten Darbietung gewählt wird für die jeweils andere Bedingung in diesem Sinne optimal ist. Nach Experiment 1 gab es durch das Auftreten von Reaktionszeitalterungen erste Hinweise auf die Rolle der zeitlichen Antizipation und dem damit verbundenen Generieren innerer Modelle. Dieses Ergebnis soll in Experiment 3 näher untersucht werden. Darüber hinaus wurde in Experiment 1 und 2 als Anpassungsstrategie die Geschwindigkeitsregulation vor Austritt aus dem Kraftfeld identifiziert. Diese erklärt allerdings weder in Experiment 1 noch in Experiment 2 erschöpfend die gefundenen Effekte. Aufgrund der Konfundierung mit anderen Strategien wird sie allerdings in Experiment 3 und 4 nicht weiter analysiert. In Experiment 2 wurde schließlich die Rolle einer weiteren Strategie, der Impedanzkontrolle, aufgedeckt und soll jetzt in Experiment 3 weiter untersucht werden.

Nachdem in den ersten Experimenten aus einer Bewegung heraus gestoppt wurde und der Einfluss der Geschwindigkeit vor Austritt aus dem Kraftfeld zumindest für die Bedingung 1 N deutlich wurde, soll nun eine Position gegen eine Kraft gehalten werden, die zu einem bestimmten Zeitpunkt abrupt abfällt. Die Wirksamkeit der Impedanzkontrolle ist richtungssensitiv, was sich auch hier zeigen sollte. Die Vorhersagbarkeit des Zeitpunktes, zu dem die Kraft abgeschaltet wurde, variierte dabei innerhalb eines Blockes oder blieb konstant. Die Stärke der Kraftfelder wurde nun nicht mehr variiert.

Insbesondere wird angenommen, dass sich in Experiment 3 erneut ein Reaktionszeitalterungseffekt zeigt, die radiale Distanz nach 200 ms in variablen Blöcken also mit der Dauer der Vorperiode sinkt und den geringsten Wert für die längste Vorperiode erreicht. Für die Variation der Richtung ist nach 200 ms eine klar geringere radiale Distanz für Kraftfelder, die parallel zur sagittalen Achse verlaufen, zu erwarten, da entlang dieser Achse die größte Steifigkeit erreicht werden kann.

4.2 Methode

4.2.1 Versuchspersonen

An Experiment 3 nahmen 12 Versuchspersonen, je 6 Frauen und 6 Männer im Alter zwischen 19 und 31 Jahren freiwillig teil (MW: 22,9; STD: 4,5). Davon war eine Person nach eigener Aussage beidhändig alle anderen waren Rechtshänder. Keine Versuchsperson klagte rechts über Beschwerden im Bereich von Hand, Arm oder Schulter. Das Experiment dauerte in etwa anderthalb bis zwei Stunden. Die Versuchspersonen erhielten für die Teilnahme am Experiment eine Aufwandsentschädigung von 15 Euro.

4.2.2 Apparatur und Aufgabe

Der Aufbau blieb gegenüber den Experimenten 1 und 2 unverändert. Die Aufgabe änderte sich dahingehend, dass die Versuchspersonen nun gebeten wurden, den Roboterarm gegen einen künstlichen Widerstand in seiner Position zu halten, auch wenn der Widerstand abgeschaltet wird und nicht mehr zu spüren ist. Sie wurden ferner darauf hingewiesen, Korrekturbewegungen unbedingt zu vermeiden. Die Versuchspersonen wurden schließlich auch angewiesen ihren Arm während eines Durchganges keinesfalls auf der Tischplatte abzustützen, was seitens des Versuchsleiters überwacht wurde. Nach jedem Durchgang konnten die Versuchspersonen ihren Arm entlasten, so dass keine Ermüdungserscheinungen auftraten.

4.2.3 Design und Ablauf

In Experiment 3 wurden 3 Faktoren aufgenommen. Die Richtung, aus der die Kraft kam, wurde in fünf Stufen von 0 (rechts)° über 45, 90 und 135° bis 180° (links) von Durchgang

zu Durchgang variiert. Die Dauer des Kraftfeldes wurde aus der Dauer der Durchquerung aus Experiment 1 abgeleitet. Kraftfelder von 40, 50 und 60 mm wurden in Experiment 1 im Mittel je in 163, 426 und 789 ms durchquert. Die Kraftfelddauern für Experiment 3 wurden daraus zu je 200, 500 und 800 ms gleichabständig abgeleitet. Die Dauern entsprechend dabei der Zeit in der die Maximalkraft aufgeschaltet war. Um Vibrationen zu vermeiden wurde davor die konstante Maximalkraft von 3 N über 1 s hinweg aufgeschaltet. Der zweite Faktor, die Dauer des Kraftfeldes umfasst damit drei Stufen. Der dritte Faktor, die Vorhersagbarkeit der Dauer der Kraftfelder, besaß zwei Stufen: die Dauer der Kraftfelder wurde entweder innerhalb der Blöcke konstant gehalten oder variiert. Die Hälfte der Versuchspersonen absolvierte zunächst die Blöcke mit variablen Kraftfelddauern, die andere Hälfte zunächst die mit konstanter Dauer. Das Experiment umfasste 540 Durchgänge in 12 Blöcken zu je 45 Durchgängen. Dabei entfallen auf die Faktorstufenkombinationen je 18 Wiederholungen.

Der Ablauf sah im einzelnen so aus: zunächst bekamen die Versuchspersonen eine Einverständniserklärung vorgelegt und wurden über die Aufgabe und ihr Recht, das Experiment jederzeit abbrechen zu können informiert. Das Experiment selbst begann mit einem Training, das maximal aus 20 Durchgängen bestand, wobei Richtung und Kraftfelddauer variiert wurden. Das Training wurde nach zwei gültigen Durchgängen abgebrochen, umfasst jedoch mindestens 10 Durchgänge. Ein Durchgang war gültig, wenn sich die Versuchsperson während der Kraftaufschaltung nicht mehr als 2 cm von der Halteposition entfernte. Die erlaubte Drift wurde nach der ersten Versuchsperson auf 2.5 cm hochgesetzt. Die Halteposition entsprach dabei der Startposition aus den Experimenten 1 und 2 (siehe Abbildung 2.1) und wenn sie nicht zu früh, das heißt vor Ablauf von 2 s nach dem Abschalten der Kraft, zur Warteposition zurückkehrte. Ungültige Durchgänge mussten wiederholt werden, wobei der zu wiederholende Durchgang nicht direkt wiederholt wurde, sondern an das Ende des Trainings verschoben wurde.

Ein Durchgang begann damit, dass die Versuchsperson vom Roboterarm passiv zur Halteposition geführt wurde. Das genaue Ansteuern der Halteposition wurde visuell via Computerbildschirm unterstützt. Die visuelle Rückmeldung umfasste die Halteposition und zwei Cursor, welche die drei Raumdimensionen abdeckten und wurde intuitiv verstanden. Nach 1 s in der Halteposition verschwand die Grafik und die Kraft wurde linear

ansteigend aufgeschaltet, so dass sie nach 1 s die Maximalkraft von 3 N erreichte. Nach der durch den Parameter Dauer vorgegebenen Zeit (200, 500 oder 800 ms) wurde das Kraftfeld abgeschaltet und die Bewegung danach noch weitere zwei Sekunden aufgezeichnet. Danach erschien ein grünes Signal auf dem Bildschirm und die Versuchspersonen kehrten auf die Warteposition zurück. Nach nicht gültigen Durchgängen erschien eine Warnmeldung, der Durchgang wurde anders als im Training jedoch nicht wiederholt. Nach jedem Block konnte der Roboterarm in eine Pausenposition (siehe Abbildung 2.1) gebracht werden und Hand und Arm konnten vollständig entlastet werden.

Nach Ende des Versuches bekamen die Versuchspersonen einen kurzen demografischen Fragebogen vorgelegt, wurden aufgeklärt, bekamen ihre Aufwandsentschädigung ausbezahlt und wurden entlassen. Um den Gesamt Ablauf zu beschleunigen wurde nach der ersten Versuchsperson die Meldung, die den nächsten Durchgang ankündigte verkürzt dargeboten.

4.2.4 Datenanalyse

Während der Ansteuerung der Halteposition mit visueller Unterstützung via Monitor betrug die Abtastrate 60 Hz, während des Aufschaltens des Kraftfeldes bis 2 s nach Abschalten des Kraftfeldes betrug die Abtastrate 10 Hz. Die Daten wurden wie in Experiment 1 und 2 aufbereitet. Es kamen alle 540 Durchgänge aller Versuchspersonen zur Auswertung.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Bewegungsmuster

Wie in Experiment 1 und 2 findet sich auch hier ein sowohl in der zeitlichen als auch in der räumlichen Entwicklung stereotypes Bewegungsmuster. Wird die Kraft abgeschaltet, kommt es zunächst zu einer ballistischen Bewegung entlang der Richtung, aus der das Kraftfeld wirkte, danach kommt es je nach Richtung zu einer spezifischen Abweichung und einer Rückbewegung. Die Abweichung ist für Kräfte aus 180° nach oben, für die aus 0° dagegen nach unten (siehe Abbildungen 4.1 und 4.2). Rechnet man über die 18 Wiederholungen einer Faktorstufenkombination eine orthogonale Hauptkomponenten-

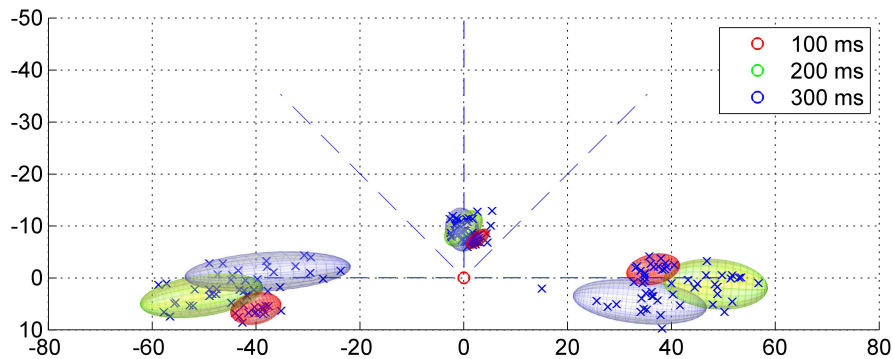


Abbildung 4.1: Draufsicht der Positionsdaten der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° und 180° zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. Zu erkennen sind (a) die Rückbewegung, (b) die Erhöhung der Variabilität der Bewegungen über die Zeit und (c) die höhere Variabilität der Bewegungen nach Kraftfeldern, die aus seitlichen Richtungen (0° und 180°) kamen.

analyse und legt dann 95%-Ellipsoide um den Ursprung des Koordinatensystems der Hauptkomponenten, sieht man neben der Rückbewegung auch wie sich über die Zeit die Variabilität der Bewegung erhöht. Beispielhaft sind in Abbildung 4.1 die Bewegungsendpunkt nach 100 ms, 200 ms und 300 ms einer Versuchsperson für drei Richtungen dargestellt. Die Rückbewegung wird auch bei der Betrachtung gemittelter Trajektorien deutlich. Abbildung 4.2 stellt die gemittelten Trajektorien für drei Richtungen einer Versuchsperson dar. Neben der stereotypen Rückbewegung ist zu erkennen, dass Bewegungen nach Kraftfeldern, die aus Richtung 0° oder 180° kommen, nicht nur deutlich variabler, sondern auch deutlich weiter ausfallen als die Bewegungen nach Kraftfeldern aus Richtung 90° .

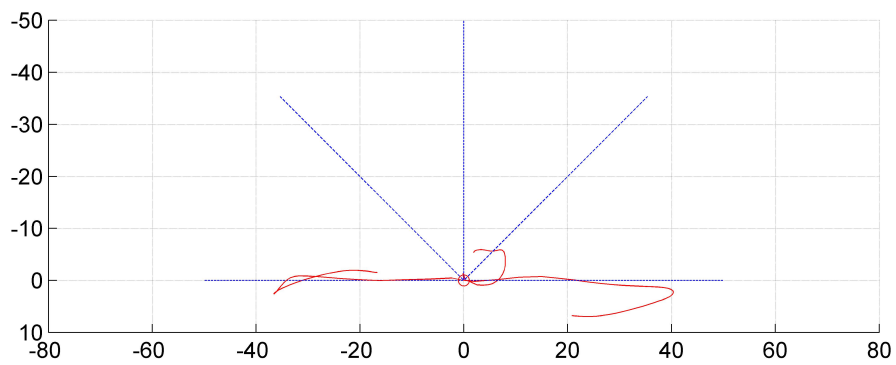


Abbildung 4.2: Draufsicht auf die mittleren Trajektorien der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° und 180° , Positionsdaten in mm.

4.3.2 Stoppen

Polarkoordinaten nach 200 ms

Die radiale Distanzen nach 200 ms flossen in eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung ein; der erste Faktor war dabei die Richtung, aus der das Kraftfeld kam (0, 45, 90, 135 und 180°), der zweite die Dauer (200, 500 und 800 ms maximale Kraftfeldstärke) und der dritte Faktor die Vorhersagbarkeit der Dauer (Dauer innerhalb eines Blockes konstant versus zufällig variiert). Die radiale Distanz nach 200 ms weist signifikante Haupteffekte für Dauer ($F(2, 22) = 7.15, p < 0.01$) und Richtung ($F(4, 44) = 46.59, p < 0.001$) der Kraftfelder auf (vergleiche Abbildung 4.3). Die radiale Distanz nimmt mit zunehmender Dauer des Kraftfeldes von 23.50 mm bei 200 ms Maximalkraft über 24.34 mm bei 500 ms Kraftfelddauer auf 25.46 mm unter 800 ms langen Kraftfeldern zu. Für die Richtung ist die radiale Distanz nach 200 ms unter der Bedingung, dass die Kraft von vorn kommt (0°) am kleinsten (10.64 mm) und nimmt mit zunehmender seitlicher Orientierung von 20.61 mm (135°) und 27.08 mm (45°) auf 31.05 mm (180°) und 32.80 mm (0°) zu. Darüber hinaus fand sich ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Dauer der Kraftfelder und der Vorhersagbarkeit der Dauer ($F(2, 22) = 11.51, p < .001$). Während die radiale Distanz nach 200 ms unter in Blöcken mit variablen Kraftfelddauern in etwa konstant blieb, 25.28 mm für 200 ms betrug und je 24.32 und 24.93 mm für 500 ms und 800 ms, stieg sie bei geblockter Darbietung von durchschnittlich 21.72 auf 24.37 und 26.00 mm an. Der Anstieg der radialen Distanz über die Dauer der Kraftfelder war für die unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich stark, so dass sich auch ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen Richtung und Dauer der Kraftfelder ergab ($F(8, 88) = 5.62, p < .001$). Aus der Abbildung wird deutlich, dass der Interaktionseffekt zwischen der Dauer und der Vorhersagbarkeit der Dauer eines Kraftfeldes unterschiedlich stark ausgeprägt war, so dass schließlich auch der Interaktionseffekt zwischen allen drei Faktoren signifikant wurde ($F(8, 88) = 3.81, p < .001$). Winkelmaße wurden im Folgenden nicht weiter untersucht.

Radiale Distanz nach 100 ms und 300 ms

Die radialen Distanzen nach 100 ms wiesen weitgehend das Ergebnismuster der radialen Distanzen nach 200 ms auf. Es fanden sich wieder zwei Haupteffekte für Dauer_{Kraftfeld}

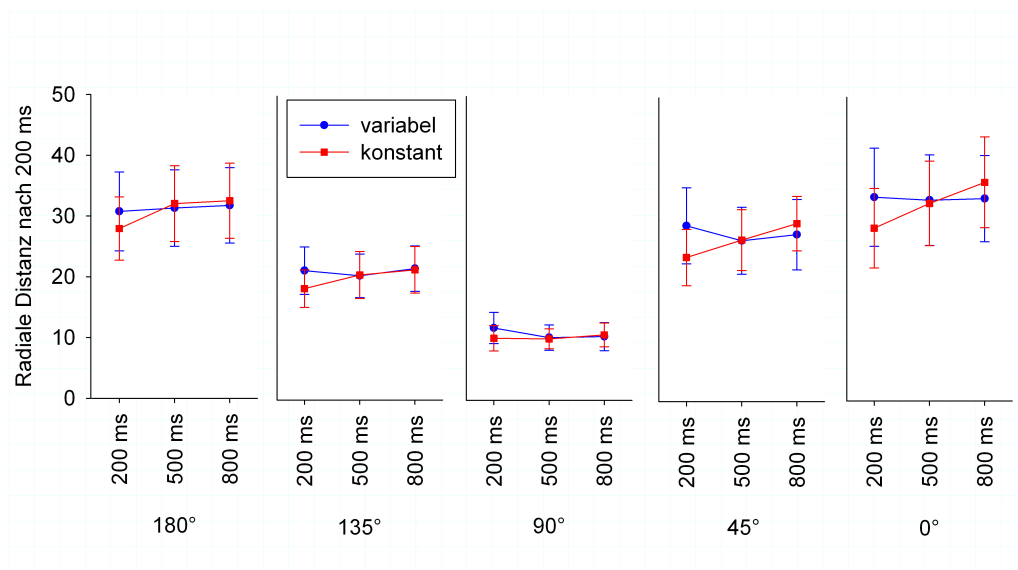


Abbildung 4.3: Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Richtung des Kraftfeldes (180, 135, 90, 45 und 0°), Dauer des Kraftfeldes (200, 500 und 800 ms) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Dauer der Kraftfelder innerhalb eines Blockes). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an.

($F(2, 22) = 5.89, p < .01$) und Richtung_{Kraftfeld} ($F(4, 44) = 75, 80, p < .001$). Mit zunehmender Dauer (200, 500 und 800 ms) stieg die radiale Distanz von 22.02 auf 22.11 und 22.90. Mit zunehmender seitlicher Orientierung der Richtung, aus der die Kraft kam, wuchs die radiale Distanz von 11.14 mm (90°) über 17.45 und 25.23 mm (135 und 45°) auf 29.50 und 28.38 mm (180 und 0°) an. Darüber hinaus wurden die Interaktionen zwischen der Dauer und der Vorhersagbarkeit der Dauer ($F(2, 22) = 14.15, p < .001$), zwischen der Dauer und der Richtung ($F(8, 88) = 5.50, p < .001$) sowie der Interaktion zwischen allen drei Faktoren ($F(8, 88) = 4.83, p < .001$) signifikant.

Gegenüber den Ergebnissen nach 100 und nach 200 ms erreichten nach 300 ms lediglich die beiden Haupteffekte für Dauer ($F(2, 22) = 10.86, p < .001$) und Richtung ($F(4, 44) = 36.25, p < .001$) sowie die Interaktion zwischen Dauer und Richtung ($F(8, 88) = 5.65, p < .001$) statistische Bedeutsamkeit. Mit zunehmender Dauer steigt die radiale Distanz von 18.13 auf 19.05 und 20.42. Die radiale Distanz liegt für die 90°-Richtung bei 8.91 mm, für 135 und 45° bei 17,36 und 19.57 mm, sowie für 180 und 0° bei 24.58 und 25.57 mm.

Maximum der Radialen Distanz

Da der Umkehrpunkt je nach Richtung durch ein Maximum oder Minimum des Azimuths gekennzeichnet war, wurde hier zur Schätzung des Umkehrpunktes auf das Maximum der radialen Distanz zurückgegriffen. Es wurde in 99.7% der Bewegungen gefunden und im Schnitt nach 160 ms erreicht. Es zeigte sich ein zur radialen Distanz nach 100 und 200 ms vergleichbares Ergebnismuster, auf dessen Erläuterung verzichtet wird.

4.3.3 Zentrale Modulation der Stoppbewegung

Anpassungseffekte

Durch das Fehlen einer Bewegung kann es in Experiment 3 nicht zu einer Geschwindigkeitsanpassung vor dem Ende des Kraftfeldes kommen; die Aufgabe der Versuchspersonen lautete, die Position zu halten, also eine Geschwindigkeit von null zu produzieren. Allerdings ist es quasi nicht möglich, eine Position im freien dreidimensionalen Raum exakt zu halten. Noch schwerer wird es, wenn diese Position gegen ein sich aufbauendes Kraftfeld gehalten werden muss. Die Drift, das heißt die Abweichung von der Halteposition bevor die Kraft abgeschaltet wird, betrug im Mittel 13.97 mm.

In der Drift kann sich eine vorbereitende Komponente, wie in der Geschwindigkeitsanpassung verstecken, weswegen der Zusammenhang zwischen der Drift und der radialen Distanz nach 200 ms untersucht wurde. Wie in Abschnitt 2.3.3 wurden die Korrelationen innerhalb einer Faktorstufenkombination einer Versuchsperson zwischen, in diesem Falle, der Drift und der radialen Distanz nach 200 ms gebildet und in Fisher-Z-Werte umgerechnet. Die Fisher-Z-Werte schwankten bei einem Mittelwert von 0.07 und einer Standardabweichung von 0.10 über die Faktorstufen gemittelt von -0.12 bis 0.36 und sprechen in ihrer geringen Höhe gegen eine vorbereitende Komponente, zumindest eine, die sich im Drift wiederfindet. Von einer statistischen Auswertung dieser Größe wurde deshalb abgesehen.

Lerneffekte

In Abbildung 4.4 sind in schwarz die Kurvenanpassungen an die radialen Distanzen nach 200 ms innerhalb der Blöcke in schwarz eingezeichnet. Ein Lerneffekt zeichnet sich dabei durch negative Steigungskoeffizienten, ein Ermüdungseffekt durch positive Steigungskoeffizienten aus. Interessant ist dabei lediglich die Entwicklung innerhalb der Blöcke mit konstanter Kraftfelddauer. Es zeigt sich gegenüber den Steigungskoeffizienten in Blöcken mit variabler Kraftfelddauer jedoch kein statistisch signifikanter Unterschied ($F(1, 11) = 3.37, p < .1$). Zudem fallen die mittleren Steigungskoeffizienten numerisch sehr klein aus. Für die geblockte Darbietung ergibt sich ein durchschnittlicher Steigungskoeffizient von -0.03, für die variable Darbietung ein Steigungskoeffizient von 0.01.

4.4 Diskussion

In Abschnitt 4.1 wurden für Experiment 3 zwei Ziele formuliert: (a) die Rolle der Kraftfeldrichtung zu untersuchen und (b) den in Experiment 1 gefundenen Reaktionszeitalterungseffekt mit einer zeitlichen Vorperiode gegenüber einer eher raum-zeitlichen Vorperiode in Experiment 1 zu bestätigen. Die erste Fragestellung betrifft mechanische Aspekte der Bewegungssteuerung, die zweite noch einmal die Antizipation und die mögliche Beteiligung innerer Modelle der dynamischen Transformation an der Bewältigung dieser Stoppaufgabe.

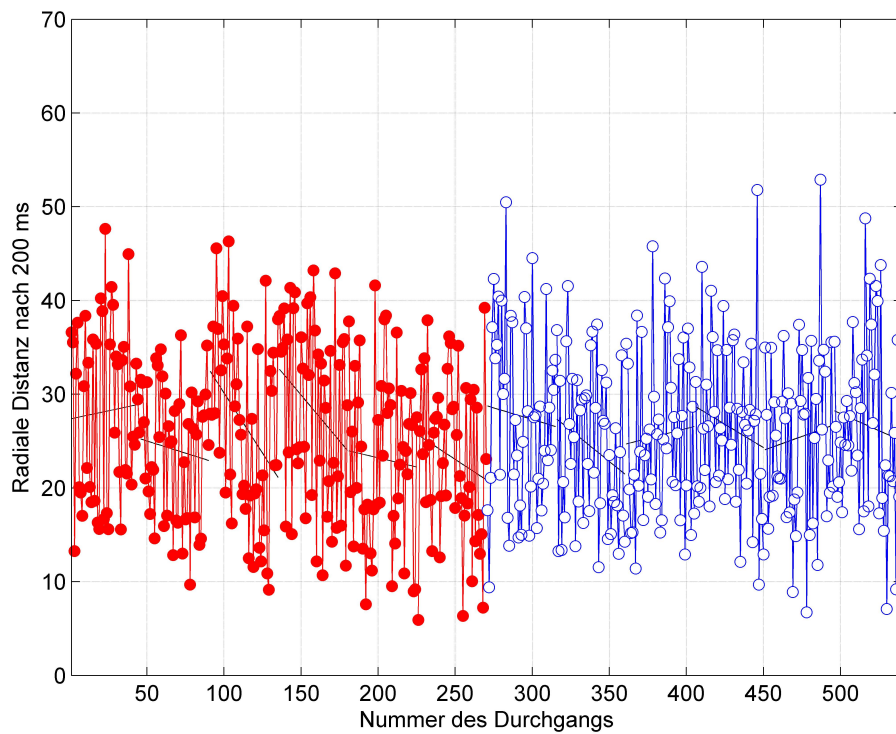


Abbildung 4.4: Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfelddauern, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfelddauern. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet.

Es zeigen sich hier die auf Grund der Trägheitsanisotropie (siehe Abschnitt 1.3.1) zu erwartenden Unterschiede in Ausformung und Amplitude der Trajektorien in Abhängigkeit der Kraftfeldrichtung. Bewegungsamplituden sind für solche Bewegungen kürzer, in denen auch Oberarm und Schulter beschleunigt werden müssen, und länger für solche, die sich weitgehend auf den Unterarm und die Hand beschränken. Im Rahmen normaler Zeigebewegungen ist der Effekt der Trägheitsanisotropie kompensierbar (Flanagan & Lolley, 2001), in der vorliegenden Aufgabe ist es jedoch nicht. Die größte Stabilität tritt noch bei Kraftfeldern aus Richtung 90° , wie sie auch schon in Experiment 1 und 2 betrachtet wurden, auf. Hier ist auch die Modulation durch die Faktoren Vorhersagbarkeit der Kraftfelddauer und Kraftfelddauer am geringsten (vergleiche Abbildung 4.3). Nach dem Abschalten des Kraftfeldes kommt es zu einer ballistischen Bewegung, die nicht verhindert werden kann. Diese Bewegung hat in den allermeisten Fällen eine maximale Ausdehnung, die je nach Kraft nach etwa 90 - 160 ms erreicht wird (vergleiche Experiment 1, 2 und 3). Danach kommt es zu einer Rückbewegung und die Variabilität der Bewegung nimmt zu (siehe Abbildung 4.1), was wiederum für einen steigenden Einfluss zentraler Bewegungssteuerungsprozesse in späten Phasen der Bewegung spricht. So dass die Überschussbewegung zunächst durch periphere und mechanische Größen unter Kontrolle gebracht wird, bevor die zentralnervöse Bewegungssteuerung das Stoppen aus der Rückbewegung und das Halten der Endposition übernimmt.

In frühen Phasen der Bewegung scheinen zentrale, antizipative Prozesse kaum eine Rolle zu spielen. Die Vorhersagbarkeit der Dauer der Kraftfelder moduliert zwar den Einfluss der Kraftfelddauer auf die radiale Distanz nach 200 ms, allerdings findet sich kein Effekt der Reaktionszeitalterung für Blöcke mit variablen Kraftfelddauern. Dass dieser Effekt ausbleibt, ist zwar mit dem gegenläufigen Effekt der mit der Dauer der Vorperiode zunehmenden Ungenauigkeit der Zeitschätzung zu erklären (Requin et al., 1991), allerdings ist das kaum als hinreichender Nachweis für eine Beteiligung antizipativer Prozesse bei der Bewegungssteuerung zu werten. Das Stoppmaß der radialen Distanz nach 200 ms steigt in Blöcken mit konstanter Kraftfelddauer mit der Dauer der Kraftfelder an, das heißt, der Vorteil kürzerer Vorperioden in Blöcken mit konstanten Vorperioden wird hier gefunden. Insgesamt zeigen die Effekte zwar, dass die Manipulation der Kraftfelddauer einen Einfluss hat, allerdings sind sie so klein, dass man kaum

davon ausgehen kann, dass antizipative Mechanismen einen großen Einfluss auf die Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen haben.

In diesem Experiment stellt die Impedanzkontrolle vermutlich eine Invariante dar, weil die Kraftfeldstärke stets konstant gehalten wurde, die Kraftfeldrichtung stets variierte und die Kraftfelddauern keinen nennenswerten Einfluss auf den strategischen Einsatz der Impedanzkontrolle haben dürfte. Andere Strategien wurden nicht ausgemacht; prinzipiell wird eine geringere Gegenkraft gegen das Kraftfeld beim Stoppen nach dem Wegfall der Kraft, also eine höhere Drift, zielführend. Anders als die Anpassung der Geschwindigkeit in Experiment 1 und 2 wurde diese mögliche Strategie von den Versuchspersonen jedoch nicht eingesetzt, zumindest ergibt sich kein Zusammenhang mit der radialen Distanz nach 200 ms. Lerneffekte innerhalb von Blöcken mit konstanter Kraftfelddauer wurden nicht gefunden.

Mit Experiment 3 wurde zwar die Wirkung der Trägheitsanisotropie auf die Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen nachgewiesen, unklar bleibt jedoch, welchen Einfluss die Impedanzkontrolle via Kokontraktion auf die Trägheitsanisotropie hat. Letztendlich lassen sich in Experiment 3 Trägheitsanisotropie und Impedanzkontrolle nicht in ihrer Wirkung trennen, weil die Erhöhung der Steifigkeit durch Kokontraktion durch den Aufbau der Hand ebenfalls richtungsabhängig ist. In Experiment 4 wird die Rolle der Antizipation nicht weiter untersucht; stattdessen soll die Rolle der Impedanzkontrolle näher beleuchtet werden. Dabei wird die Tatsache herangezogen, dass die linke und rechte Hand, beziehungsweise die dominante und nicht-dominante Hand, unterschiedliche Charakteristika im Rahmen der Bewegungssteuerung aufweisen. So gibt es Hinweise darauf, dass die nicht-dominante Hand bevorzugt zur Impedanzkontrolle greift, während die dominante Hand Vorteile beim Lernen innerer Modelle besitzt. Eine wichtige Methode, um das Lernen innerer Modelle nachzuweisen ist dabei der Nachweis von Generalisierung. Das heißt, das Gelernte ist auch auf neue Situationen übertragbar. Diese Argumentation wird in Experiment 4 herangezogen, um nach einmal die zentrale Modulation der Bewegungssteuerung in dieser Aufgabe zu untersuchen.

5 Experiment 4

5.1 Fragestellung

Vor allem bei Rechtshändern finden sich teils große Unterschiede in den motorischen Fertigkeiten zwischen der linken und der rechten Hand, wobei die dominante Hand vor allem für feinmotorische Aufgaben bevorzugt eingesetzt wird (J. Annett, Annett, Hudson & Turner, 1979). Wird die linke Hand¹ eingesetzt, dient sie meistens der Stabilisierung eines Objektes, das mit der rechten Hand manipuliert wird. Allerdings finden sich auch Aufgaben, in denen die linke Hand gegenüber der rechten Hand einen Vorteil besitzt, so scheint sie etwa eine bessere Reaktionszeit zu produzieren (M. Annett & Annet, 1979). Das spricht für einen Vorteil in der Vorbereitung von Bewegungen (Sainburg & Schaefer, 2004). Desweiteren fanden Bagesteiro und Sainburg (2003) Vorteile für die nicht-dominante Hand in der Kompensation von Veränderung der dynamischen Eigenschaften des Armes bei der Belastung durch ein Gewicht. Weiter kommt es zu Vorteilen in der Verarbeitung und Nutzung von somatosensorischer Rückmeldung gegen Ende der Bewegung und damit zu einem Vorteil in der Genauigkeit bei der Regulierung der Position des Armes, gerade in Situationen ohne visuelle Rückmeldung.

Vorteile für die dominante Hand liegen im Bereich der prädiktiven Bewegungssteuerung, was auch ein besseres Lernen dynamischer Transformationen zur Folge hat (Davidson & Wolpert, 2003). Die dominante Hand scheint Vorteile beim Bilden interner Modelle zu haben, während die nicht-dominante Hand sich mehr auf die Impedanzkontrolle verlässt. Bagesteiro und Sainburg (2002) gehen davon aus, dass es für die dominante und die nicht-dominante Hand unterschiedliche neuronale Kontrollmechanismen gibt, die letztendlich Grund für die genannten Unterschiede sind. Die Tatsache, dass die linke Hand

¹Wenn im Folgenden von der linken Hand die Rede ist, wird stets die nicht-dominante linke Hand eines Rechtshänders gemeint, beziehungsweise, wenn von der rechten Hand die Rede ist, von der dominanten Hand eines Rechtshänders.

mehr zur Impedanzkontrolle neigt als zur Ausbildung von inneren Modellen, kann zwei Ursachen haben. Zum einen kann es daran liegen, dass bei der Bewegungssteuerung mit der linken Hand die Fähigkeit zur Generierung von inneren Modellen schwächer ausgeprägt ist und die Impedanzkontrolle kompensatorisch eingesetzt wird und zum anderen daran, dass die Fähigkeit zum Bilden innerer Modelle lediglich nicht genutzt wird und die Impedanzkontrolle die präferierte Art der Kontrolle darstellt, die der Hauptaufgabe der nicht-dominanten Hand in der Stabilisierung und Positionierung entspricht (Schabowsky et al., 2007).

Gibt es tatsächlich Unterschiede in der Verwendung der Impedanzkontrolle und der Generierung innerer Modelle zwischen linker und rechter Hand, lässt sich hier unabhängig von Trägheitsanisotropie und anderen mechanischen Einflüssen, die Rolle der Impedanzkontrolle untersuchen. Die unterschiedliche Muskelstärke in der rechten und linken Hand sollte bei Kraftfeldern von 3 N Stärke, was auf der Erde der Zugkraft von etwa 300 g entspricht, keinen Unterschied machen. Es sollten sich dabei Vorteile für die linke Hand ergeben. Zusätzlich wird mit Hilfe der Untersuchung des Transfers zwischen den beiden Händen noch einmal die Beteiligung zentralnervöser Prozesse im Rahmen der Bewegungssteuerung nach abrupter dynamischer Transformation überprüft. Finden zentralnervöse Lernprozesse statt, müsste die als zweites eingesetzte Hand von Anfang an einen Lernvorsprung gegenüber der zuerst eingesetzten Hand besitzen.

5.2 Methode

5.2.1 Versuchspersonen

An Experiment 4 nahmen 12 Versuchspersonen, 7 Frauen und 5 Männer, teil. Alle waren Rechtshänder und hatten keine gesundheitlichen Beschwerden im Bereich der Hände, Arme oder der Schultern. Ihr Alter variierte zwischen 20 und 30 Jahren (MW: 22,6; STD: 2,8). Sie alle nahmen an der etwa einstündigen Erhebung freiwillig teil und erhielten eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro.

5.2.2 Apparatur und Aufgabe

Der Aufbau erfuhr gegenüber den Experimenten 1 bis 3 keine Änderungen. Wie in Experiment 3 bestand die Aufgabe der Versuchspersonen darin, eine bestimmte Position, die Halteposition, gegen ein Kraftfeld und gegen das Abschalten dieses Kraftfeldes zu halten. Diese Aufgabe sollten die Versuchspersonen zum einen mit der linken, zum anderen mit der rechten Hand durchführen und abschließend mit der dominanten rechten Hand unter maximaler Kokontraktion der Muskulatur. Während die Reihenfolge der ersten beiden Aufgaben pseudorandomisiert wurde, stand die dritte Aufgabe immer am Ende des Experimentes.

5.2.3 Design und Ablauf

In Experiment 4 wurden 2 Faktoren variiert. Die Richtung, aus der die Kraft kam, wurde in sechs Stufen von 0° über 45° , 90° , 135° und 180° bis -90° in allen Blöcken in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten. Der zweite Faktor, die Aufgabenvariante, umfasste 3 Stufen. Die Halteaufgabe wurde entweder mit der linken oder mit der rechten Hand ausgeführt, wobei die Reihenfolge dieser ersten beiden Aufgabenvarianten ausbalanciert wurde. Die dritte Aufgabenvariante wurde erst nach der zweiten Aufgabe eingeführt; hier sollte die Halteaufgabe unter maximaler Kokontraktion mit der rechten Hand ausgeführt werden. Die Durchgänge einer Aufgabe wurden in jeweils 6 Blöcken dargeboten, wobei die ersten 12 Blöcke jeweils 18 Durchgänge und die letzten 6 Blöcke, mit maximaler Kokontraktion, 9 Durchgänge umfassten, für diese entfielen die Kraftfeldrichtungen 45° , 135° und -90° . Es ergaben sich damit in der Summe 270 Durchgänge pro Versuchsperson und ein unvollständiges zweifaktorielles Design.

Bis auf wenige Ausnahmen, die sich aus dem gegenüber Experiment 3 neuen Faktor der Aufgabenvariante ergaben, entsprach der Ablauf von Experiment 4 weitestgehend dem von Experiment 3 (siehe Abschnitt 4.2.3). Die erste Trainingseinheit umfasste mindestens 10, höchstens jedoch 18 Durchgänge und wurde mit dem Arm ausgeführt, der auch in den ersten 6 Experimentalblöcken verwendet werden sollte. Die Gültigkeit der Durchgänge wurde wie in Experiment 3 überprüft, wobei die erlaubte Drift hier während aufgeschaltetem Kraftfeld 2 cm betrug. Das Kraftfeld wurde linear ansteigend aufgeschaltet, so dass es nach 1 s die Maximalkraft von 3 N erreichte. Nach weiteren 0.5 s wurde

die Kraft abgeschaltet. Nach diesen ersten 6 Blöcken wurde der Arm gewechselt und es gab ein verkürztes Training von mindestens 6 Durchgängen. Auch im zweiten Training wurden die ungültigen Durchgänge wiederholt. Vor der dritten Aufgabenvariante gab es kein Training; die Pausen zwischen den letzten 6 Blöcken waren obligatorisch und von einer Länge von 30 s. Abschließend bekamen die Versuchspersonen wieder einen kurzen demografischen Fragebogen vorgelegt, wurden aufgeklärt, bekamen ihre Aufwandsentschädigung ausgezahlt und wurden entlassen.

5.2.4 Datenanalyse

Die Datenaufzeichnung war gegenüber Experiment 3 verkürzt; anstatt 2 s wurden die Daten nach Abschalten des Kraftfeldes nur noch 1.5 s lang aufgezeichnet. Ansonsten entsprach die Datenanalyse der aus Experiment 3. Alle Durchgänge aller Versuchspersonen kamen zur Auswertung.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Bewegungsmuster

Die zeitliche Entwicklung der Trajektorien wurde in den Experimenten 1 bis 3 bereits ausführlich beschrieben, neu hinzu kommt hier allerdings die spezifische Entwicklung für die linke und rechte Hand. Im Gegensatz zu Abbildung 4.1 sind in Abbildung 5.1 die 95%-Ellipsoide für die linke Hand abgetragen (zur Erläuterung siehe Abschnitt 4.3.1). Je nachdem, ob die linke oder rechte Hand eingesetzt wird kommt es zu einem Effekt, der einer Spiegelung gleicht, was auch in Abbildung 5.2 deutlich wird. Dieser Effekt rührt hauptsächlich von der Asymmetrie der menschlichen Hand (Daumen versus Finger) her, verdeutlicht aber auch den potentiellen Einfluss der Handhaltung im Allgemeinen. Gut zu erkennen ist auch die zunehmende Größe der Überschussbewegung bei zunehmender Lateralität der Kraftfeldrichtung. Gleichzeitig verlängert sich auch die Rückbewegung, so dass nicht nur die Beschleunigungsphase nach dem Austritt aus dem Kraftfeld von der Trägheitsanisotropie beeinflusst wird, sondern auch die Rückbewegung.

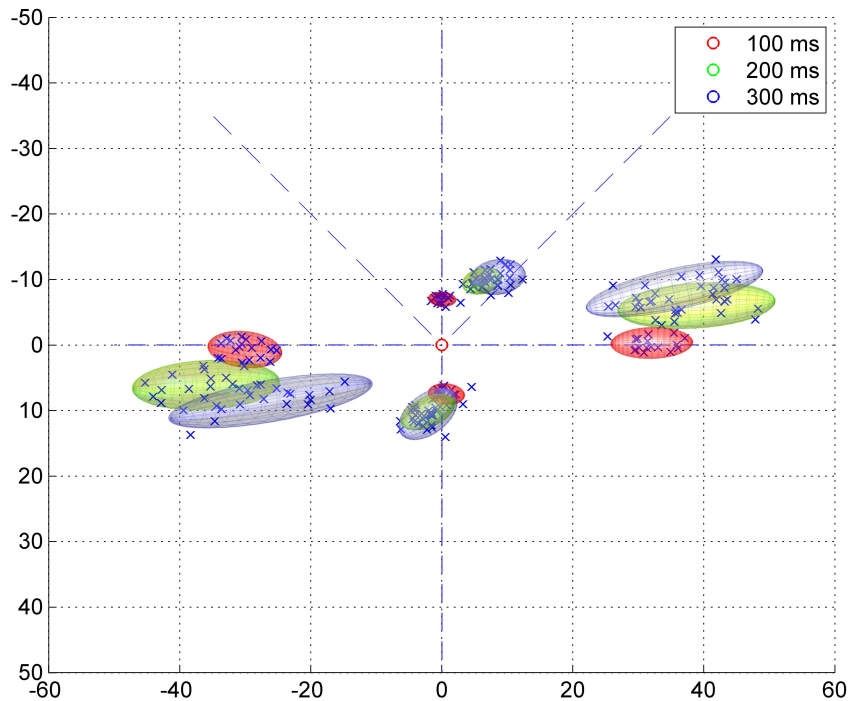


Abbildung 5.1: Draufsicht der Positionsdaten der Bewegungen einer Versuchsperson mit der linken Hand nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° , 180° und -90° zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. Zu erkennen sind (a) die Rückbewegung, (b) die Erhöhung der Variabilität der Bewegungen über die Zeit, (c) die höhere Variabilität der Bewegungen nach Kraftfeldern, die aus seitlichen Richtungen (0° und 180°) kamen und (d) die Auswirkungen der Asymmetrie der Hand beziehungsweise der Handhaltung

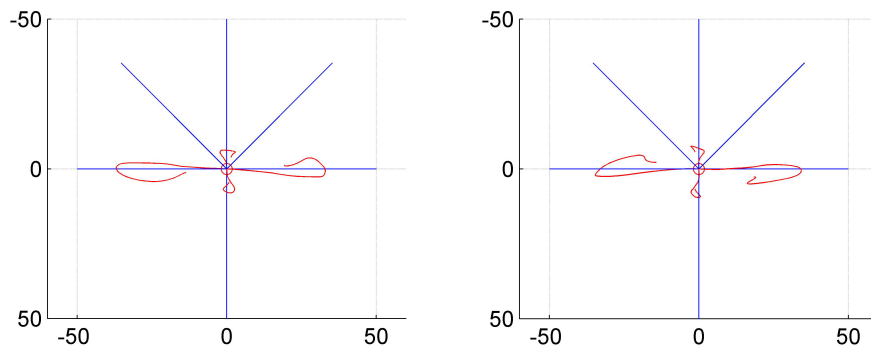


Abbildung 5.2: Draufsicht auf die mittleren Trajektorien der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° , 180° und -90° , Positionsdaten in mm. Links die Daten für die linke Hand, rechts die Daten für die rechte Hand.

5.3.2 Stoppen

Die Daten wurden jeweils einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zugeführt, wobei sich die Stufen der beiden Faktoren $\text{Richtung}_{\text{Kraftfeld}}$ und Aufgabenvariante je nach Analyse variierten. Wo nicht anders erwähnt, findet die statistische Überprüfung nur mit den genannten Faktoren Richtungen 180° , 90° und 0° statt, die für alle Aufgabenvarianten erhoben worden sind.

Radiale Distanz nach 200 ms

Für die radiale Distanz nach 200 ms fand sich der zu erwartende signifikante Haupteffekt für den Faktor $\text{Richtung}_{\text{Kraftfeld}}$ ($F(2, 22) = 240,95, p < .001$). Dabei lag die radiale Distanz für die Richtung 90° bei 8.53 mm und für 180° und 0° je bei 30.88 und 30.30 mm. Darüber hinaus wurde auch der Faktor der Aufgabenvariante signifikant. Wurde die Aufgabe mit links erledigt, ergab sich im Schnitt eine radiale Distanz nach 200 ms von 26.53 mm, für die rechte Hand eine von 24.53 und für die rechte Hand unter der Anweisung zur maximalen Kokontraktion eine von 18.65 mm ($F(2, 22) = 25.64, p < .001$). Schließlich wurde auch die Interaktion zwischen den beiden Faktoren signifikant, was vor

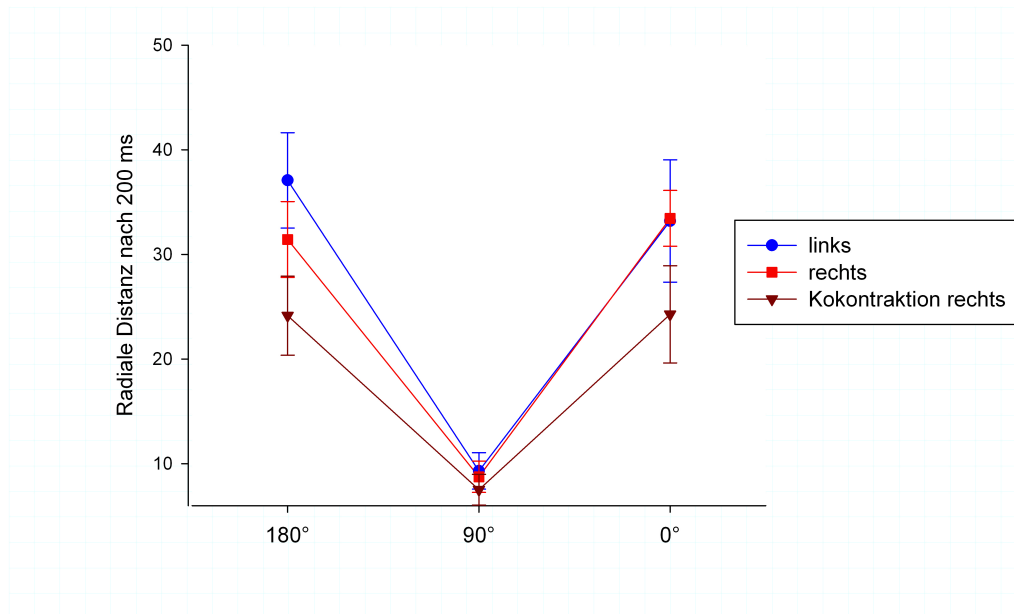


Abbildung 5.3: Radiale Distanz nach 200 ms für die Faktorstufen Richtung des Kraftfeldes (180, 90 und 0°) und Aufgabenvariante (linke Hand, rechte Hand, rechte Hand unter maximaler Kokontraktion). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an.

allem auf den Vorteil der Kokontraktionsbedingung bei Kraftfeldern aus lateralen Richtungen zurückzuführen ist und darauf, dass sich bei Kraftfeldern aus Richtung 180° ein Vorteil für rechte Hand ergab, während sich der Effekt für Kraftfelder aus Richtung 0° tendenziell umkehrte ($F(4, 44) = 8.62, p < .001$). Unter Kokontraktion der rechten Hand ergaben sich für die drei Richtungen 180°, 90° und 0° je radiale Distanzen nach 200 ms von 24.15, 7.52 und 24.27 mm, bei der Ausführung der Aufgabe mit der linken Hand je radiale Distanzen von 37.07, 9.31 und 33.19 mm und schließlich bei der Ausführung mit der rechten Hand radiale Distanzen von je 31.43, 8.76 und 33.44 mm (siehe Abbildung 5.3).

Wertet man dasselbe Maß ohne die dritte Aufgabenvariante (rechte Hand unter maximaler Kokontraktion) aus, ergibt sich lediglich ein signifikanter Haupteffekt für die Kraftfeldrichtung ($F(5, 55) = 211.96, p < .001$). Dabei stiegen die radialen Distanzen

nach 200 ms mit zunehmender Lateralität der Kraftfeldrichtung an. Für Kraftfelder aus Richtung 90 und -90° ergab sich nach 200 ms je eine radiale Distanz von 9.03 beziehungsweise 9.96 mm, für Kraftfelder aus Richtung 135 und 45° , je eine radiale Distanz zu 25.56 und 23.73 mm und für Kraftfelder aus Richtung 180 und 0° schließlich eine radiale Distanz von je 34.25 und 33.32 mm. Innerhalb dieser Paare findet sich dabei kein signifikanter Unterschied, während die Paare sich untereinander in Post-Hoc-Test (Fisher LSD) alle auf einem Niveau von $p < .001$ unterscheiden. Der vorhergesagte Vorteil für die linke Hand findet sich nicht.

Die zweite wichtige Frage, die sich stellte, war die nach der Generalisierung. Wird die Aufgabe mit der ersten Hand gelernt, sollte die zweite Hand davon profitieren und eine kleinere radiale Distanz aufweisen. Rechnet man eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung über die Faktoren Richtung_{Kraftfeld} (180° , 90° und 0°) und Stellung in der Aufgabenreihenfolge (erste Hand, zweite Hand) findet man jedoch lediglich einen signifikanten Haupteffekt für die Richtung aus der das Kraftfeld kommt ($F(2, 22) = 266.44, p < .001$). Für 180, 90 und 0° ergeben sich radiale Distanzen nach 200 ms von je 34.25, 9.03 und 33.32 mm. Es findet sich also kein Generalisierungseffekt von der ersten auf die zweite Hand.

Radiale Distanz nach 100 ms und 300 ms

Werden erneut alle 3 Stufen des Faktors Aufgabenvariante und die Stufen 180° , 90° und 0° des Faktors Richtung_{Kraftfeld} ausgewertet findet sich dasselbe Ergebnismuster wie 100 ms später bei der gleichen Auswertung (vergleiche Seite 82). In Abhängigkeit der Richtung des Kraftfeldes steigt die radiale Distanz mit zunehmender Lateralität der Kraft von 7.35 mm für 90° auf 30.69 mm für 180° und 29.92 mm für 0° an ($F(2, 22) = 766.60, p < .001$). Auch die Aufgabenvariante modulierte die radiale Distanz in statistisch bedeutsamer Weise ($F(2, 22) = 30.03, p < .001$), wobei die rechte Hand unter Kokontraktion mit 19.31 mm die kleinste radiale Distanz nach 100 ms aufwies, gefolgt von der rechten Hand ohne Anweisung (23.06 mm) sowie der linken Hand (25.59 mm). Letztendlich überschritt auch der Interaktionsterm erneut das Signifikanzniveau deutlich ($F(4, 44) = 10.46, p < .001$). Das lag daran, dass die Unterschiede zwischen den Stufen des Faktors Aufgabenvariante für unterschiedliche Richtung unterschiedlich groß ausfielen. Für die Aufgabenvarianten linke Hand, rechte Hand und rechte Hand unter

maximaler Kokontraktion fanden sich für Kraftfelder aus Richtung 180° je Mittelwerte von 34.31, 31.53 und 26.23 mm radialer Distanz nach 200 ms, für Kraftfelder aus Richtung 90° Werte von je 8.44, 7.38 und 6.24 mm und für Kraftfelder aus Richtung 0° Werte von je 34.02, 30.28 und 25.46 mm.

Das Ergebnismuster war auch noch nach 300 ms stabil; die Effekte für Richtung ($F(2, 22) = 156.74, p < .001$), Aufgabe ($F(2, 22) = 22.44, p < .001$) und der Interaktionseffekt zwischen diesen beiden Faktoren ($F(4, 44) = 5.45, p < .01$) blieben erhalten. Kam die Kraft aus Richtung 90°, wurde mit 7.90 mm erneut die geringste radiale Distanz erreicht, gefolgt von 23.88 mm (0°) und 24.48 mm (180°). Auch für den Aufgabenfaktor fanden sich analoge Ergebnisse; mit 15.07 mm war die radiale Distanz am geringsten, wenn der rechte Arm kokontrahiert wurde, gefolgt vom rechten Arm ohne spezielle Anweisung (19.84 mm) und dem linken Arm, ebenfalls ohne spezielle Anweisung zur Kokontraktion (21.35 mm). Der Interaktionseffekt beruht wieder darauf, dass die Unterschiede zwischen den Aufgabenvarianten über die Stufen des Faktors Kraftfeldrichtung unterschiedlich groß ausfielen. Die radialen Distanzen nach 300 ms betragen, wenn das Kraftfeld aus Richtung 180° kam, für je die linke und rechte Hand sowie die rechte Hand unter maximaler Kokontraktion, 39.82, 34.42 und 28.83. Für Kraftfelder aus Richtung 90° waren sich die radialen Distanzen nach 300 ms am ähnlichsten und betragen je 10.20, 9.01 und 7.70 mm. Für Kraftfelder aus Richtung 0° betragen die Werte je 37.14, 35.66 und 28.29 mm.

Maximum der Radialen Distanz

Das Maximum der radialen Distanz trat im Durchschnitt nach 164 ms auf und konnte in 99.07 % der Bewegungen festgestellt werden. Für die maximale radiale Distanz, die also zu einem Zeitpunkt zwischen 100 ms und 200 ms erreicht wird, ergibt sich folglich dasselbe Ergebnismuster und es wird von einer zusätzlichen statistischen Analyse abgesehen.

5.3.3 Zentrale Modulation der Stoppbewegung

Anpassungseffekte

Bei einer mittleren Drift von 13.45 mm zeigten sich bedeutsame Unterschiede sowohl hinsichtlich der Richtung aus der die Kraft kam ($F(2, 22) = 114.47, p < .001$) als auch der Aufgabe ($F(2, 22) = 9.91, p < .001$). Kommt die Kraft aus Richtung 90° beträgt die Drift 6.30 mm, kommt sie aus 180° beträgt sie 17.21 mm und für 0° 16.83 mm. Weiter kommt es für den rechten Arm unter Kokontraktion zu einer Drift von 12.02 mm, für den rechten Arm ohne besondere Anweisung zu einer über 13.83 mm und für den linken Arm zu einer Drift von 14.49 mm. Dabei werden die Ergebnisse für die Krafrichtung erneut durch die Aufgabenvariante moduliert ($F(4, 44) = 11.63, p < .001$). Wie in Experiment 3 wurden wieder Drift und radiale Distanz korreliert und die Korrelationen in Fisher-Z-Werte umgerechnet. Bei einem Mittelwert von 0.18 schwankten die Fisher-Z-Werte zwischen 0.02 und 0.34. Diese Werte legen keinen Zusammenhang zwischen der Drift und dem Stoppmaß nahe; von einer statistischen Analyse der Fisher-Z-Werte wurde deshalb abgesehen.

Lerneffekte

Bei der Betrachtung der radialen Distanz nach 200 ms über alle Durchgänge einer Aufgabenvariante hinweg, ließ sich kein Lerneffekt erkennen, dabei wurden in Experiment 4 sowohl Stärke des Kraftfeldes als auch seine Dauer konstant gehalten. Die Werte für die Steigungskoeffizienten (vergleiche dazu Abschnitt sec:T01Lerneffekte) liegen für die Blöcke, die mit der linken Hand ausgeführt wurden bei -0.04, für die Blöcke mit der rechten Hand bei -0.05 und für die Blöcke die mit der rechten Hand unter maximaler Kokontraktion ausgeführt wurden bei -0.14. Die Unterschiede sind nicht signifikant. In Bezug auf die letzte Aufgabenvariante ist vor allem auf das Fehlen eines Ermüdungseffektes hinzuweisen.

5.4 Diskussion

Mit Experiment 4 sollten hauptsächlich die Kokontraktion und der Transfer zwischen den Händen untersucht werden, also die Rolle von Impedanzkontrolle und inneren Modellen im Rahmen der Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen.

Zur Impedanzkontrolle sind mehrere Ergebnisse zu berichten. Für die linke Hand findet sich hier kein Vorteil. Wenn sie wirklich eher zur Impedanzkontrolle neigt und in diesem Bereich Vorteile hat, werden sie hier dadurch aufgewogen, dass es für die rechte Hand entweder zu einer ähnlich hohen Versteifung kommt oder dass andere kompensatorische Prozesse den Nachteil ausgleichen. Für die rechte Hand wurde ein deutlicher Unterschied zwischen der radialen Distanz nach 200 ms in der Bedingung ohne besondere Instruktion zur Kokontraktion und der Bedingung mit Instruktion zur maximalen Kokontraktion gefunden. Das zeigt deutlich, dass die Impedanzkontrolle nur zu einem bestimmten Teil voll ausgereizt wird, wobei vermutet wird, dass sich diese Aussage auch auf die linke Hand übertragen lässt. Als Ursache für diesen Effekt sind die hohen energetischen Kosten beziehungsweise die subjektiv empfundene hohe Anstrengung am wahrscheinlichsten.

Die Richtung des Kraftfeldes moduliert die Leistung der linken und rechten Hand. Kann der Kraft mit vier Fingern stabilisierend entgegengewirkt werden, ergibt sich ein Vorteil gegenüber der Stabilisierung mit Hilfe des Daumens allein. Kommen die Kräfte aus Richtung 180° ergibt sich eine geringere radiale Distanz nach 200 ms, das heißt eine höhere Stabilität für die rechte Hand (vergleiche Abbildung 5.3). Durch die Asymmetrie der Hand (vergleiche Abbildung 5.2) lässt sich vermuten, dass sich dieser Vorteil für Kräfte aus Richtung 0° umkehren sollte und in der Tat findet sich hier kein Vorteil mehr für die rechte Hand. Allerdings ist der numerische Vorteil der linken Hand sehr klein und die radialen Distanzen nach 200 ms für die Richtung 0° liegen für alle Aufgabenvarianten innerhalb der 95%-Konfidenzintervalle des selben Maßes für die Richtung 180° . Damit liegt nahe, dass die Asymmetrie der Hand als Erklärung nicht ausreicht und die rechte Hand ihren potentiellen Nachteil, wenn Kräfte aus Richtung 0° kommen, anderweitig kompensieren kann.

Es ist anzunehmen, dass die Impedanzkontrolle und das Formen von inneren Modellen keine Dichotomie darstellen, sondern in einem graduellen Übergang parallel existieren. Auf die Möglichkeit zum selektiven, situationsabhängigen Einsatz der Impedanzkontrolle haben schon Liu und Reinkensmeyer (2007) hingewiesen. Dabei beeinflusst die Impedanzkontrolle das Bilden innerer Modelle möglicherweise dadurch negativ, dass eine höhere Muskelaktivierung eine höhere Varianz in der Effektorposition hervorruft und zusätzlich besonders kleinere Störungen oder Abweichungen weniger gut gespürt werden

können (Liu & Reinkensmeyer, 2007). Während sich ein deutlicher Effekt für die Kokontraktion zeigte, Impedanzkontrolle also in dieser Aufgabe eine wichtige Rolle spielen kann, konnte bisher kein Hinweis auf die Beteiligung innerer Modelle der dynamischen Transformationen gefunden werden. Abschließend sei hier angemerkt, dass eine Interpretation der Steigungskoeffizienten letztendlich aufgrund der Störgrößen Kraftfeldstärke und -richtung für die Experimente 1, 3 und 4 nicht möglich ist. Eine Lösung bestünde in der Bereinigung der Werte für die radialen Distanzen nach 200 ms um diese Störeffekte. Da aber auch in Experiment 2 kein Hinweis auf Lernen innerhalb der Blöcke gefunden wurde, wird auf eine Interpretation der Steigungskoeffizienten im Folgenden verzichtet. Auch ein Transfer zwischen den Händen wurde nicht nachgewiesen.

Wie beschrieben wurde die Reihenfolge der ersten beiden Aufgabenvarianten, also der Ausführung ohne Instruktion zur Kokontraktion mit je der linken und rechten Hand ausbalanciert, um den Aufgabenfaktor von Sequenzeffekten zu bereinigen. Ist die Wirkung der Sequenz jedoch asymmetrisch bleiben Aufgabenfaktor und Sequenz konfundiert. Um dieser Möglichkeit nachzugehen wurde neben den Faktoren Kraftfeldrichtung (180, 90, 0°) und Aufgabenvariante (linke Hand, rechte Hand) in eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung noch ein Sequenzfaktor mit aufgenommen, der die Information umfasste, welche Hand die Halteaufgabe zuerst ausführte.

Begannen die Versuchspersonen das Experiment mit der linken Hand, so waren sie im Durchschnitt mit einer radialen Distanz nach 200ms von 27.37 mm schlechter als bei der umgekehrten Reihenfolge (23.70 mm). Der Haupteffekt für den Faktor Sequenz verfehlte allerdings statistische Signifikanz. Der Haupteffekt für die Kraftfeldrichtung war erneut signifikant ($F(2, 20) = 289.56, p < .001$). Kam die Kraft aus Richtung 90° betrug die radiale Distanz nach 200 ms 9.03 mm, aus Richtung 180° dagegen 34.25 mm und für 0° 33.32 mm. Die Interaktion zwischen Sequenz und Richtung, sowie die Dreifach-Interaktion waren nicht statistisch signifikant. Die restlichen Haupt- und Interaktionseffekte wiesen teilweise statistische Tendenzen auf. Hervorgehoben wird hier der Interaktionseffekt zwischen Aufgabenvariante und Sequenz (siehe auch Abbildung 5.4). Für die radialen Distanzen nach 200 ms, die für die rechte und linke Hand erhoben wurden, zeigten eine Abhängigkeit von der Sequenz, in der die ersten beiden Aufgabenvarianten ausgeführt wurden ($F(1, 10) = 4.42, p < .1$). Während die rechte Hand

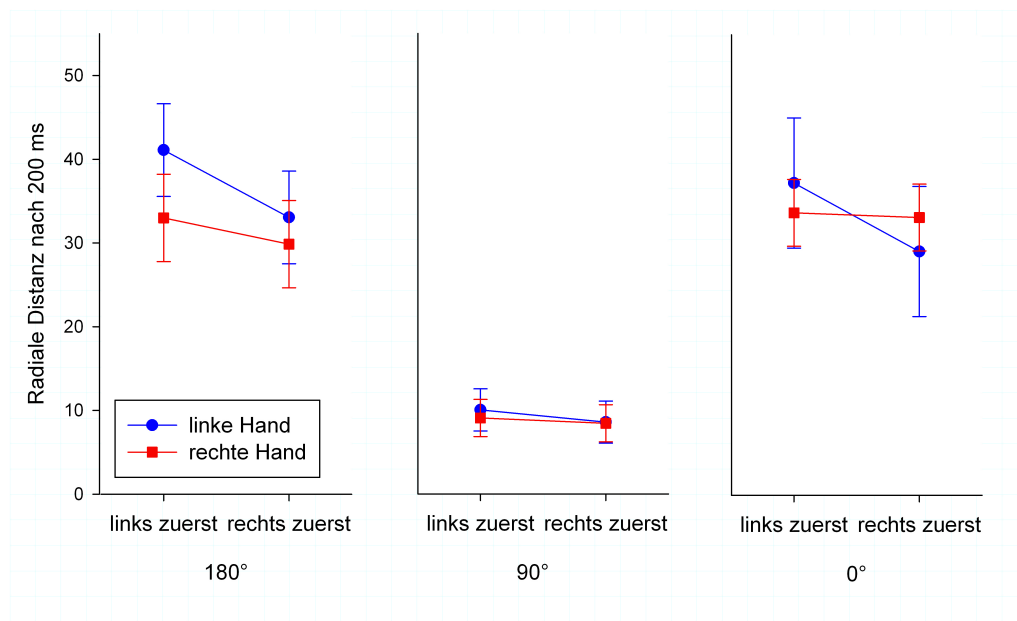


Abbildung 5.4: Radiale Distanz nach 200 ms für die Faktorstufen Richtung des Kraftfeldes (180, 90 und 0°), Aufgabenvariante (linke Hand, rechte Hand) und Sequenz (linke Hand zuerst, rechte Hand zuerst). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an. Deutlich sichtbar ist der asymmetrische Transfer zwischen der rechten und linken Hand.

unabhängig von der Sequenz annähernd die gleiche Leistung erzielt (25.27 mm, wenn sie als erstes zur Durchführung der Aufgabe verwendet wird, gegenüber 23.82 mm, wenn zunächst die linke Hand verwendet wird), profitiert die linke Hand deutlich, wenn zunächst die rechte Hand verwendet wurde (29.47 gegenüber 23.58 mm). Wird die rechte Hand zuerst verwendet, zeigt sich auch der Vorteil der linken Hand bei Kräften aus Richtung 0° .

Damit konnte der asymmetrischer Transfer zwischen linker und rechter Hand zwar nicht statistisch abgesichert werden, aber das wird vermutlich an der Teststärke gelegen haben. Auch andere Autoren weisen auf asymmetrische Transfers von der dominanten auf die nicht-dominante Hand beim Lernen dynamischer Transformationen hin (Davidson & Wolpert, 2003). Jedenfalls legt dieser Transfer eine zentralnervöse Beteiligung bei der Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen nahe. Linke und rechte Hand unterliegen zunächst unterschiedlichen Modi der Bewegungssteuerung, wobei für die linke Hand die Impedanzkontrolle am naheliegendsten ist und für die rechte Hand ein erweiterter Modus angenommen wird. Weniger in Frage kommt dabei mit Bezug zu Experiment 1 bis 3 eine schnellere Reaktion auf die abrupte dynamische Transformation oder eine spezifische Anpassung der Reaktion. Eine mögliche Strategie zusätzlich zur Impedanzkontrolle ist die Optimierung der Position von Hand und Arm relativ zum Kraftfeld, was ebenfalls zu einer erhöhten Stabilität führt. Wird die Positionierung gelernt und für den linken Arm nutzbar, zeigt sich der erwartete Richtungsvorteil der linken Hand bei Kräften aus Richtung 0° .

Damit ergibt sich zusammenfassend für Experiment 4 folgendes Bild: nach der abrupten dynamischen Transformation kommt es zu einer weitgehend ballistischen Bewegung. Die Trägheitsanisotropie, die normalerweise bei Bewegungen kompensiert werden kann, nimmt auch über viele Wiederholungen hinweg auch in der Phase der Rückbewegung nicht ab (vergleiche Abbildung 5.2), was eventuell daran liegen kann, dass die Vorhersage der Auswirkung der Trägheitsanisotropie zu viel Zeit in Anspruch nimmt (vergleiche etwa (Flanagan & Lolley, 2001)). Mechanische und reflektorische Ursachen für die Rückbewegung liegen nahe. Die Steifigkeit als mechanische Eigenschaft der Effektoren wird dabei durch verschiedene Strategien, die alle vor der abrupten dynamischen Transformation einsetzen, moduliert. Dazu gehört zum einen die Impedanzkontrolle via Kokontraktion, die hier allerdings der linken Hand keinen funktionalen Vorteil bringt, vermutlich weil sie

bei der Bewegungssteuerung hier unabhängig von der Hand eingesetzt wird, allerdings, wie zumindest für die rechte Hand deutlich nachgewiesen wurde, nicht in vollem Umfang. Die andere wichtige Strategie, die durch den asymmetrischen Transfer nahe gelegt wird, ist die Positionierung von Hand und Arm relativ zur Richtung des Kraftfeldes. Diese Strategie muss allerdings noch experimentell überprüft werden. Ein Hinweis auf die Bedeutung der Positionierung relativ zum Kraftfeld ist die Tatsache, dass die Aufgabenvariante und die Reihenfolge der Aufgaben im Falle von Kraftfeldern aus Richtung 90° , der stabilsten Bedingung, keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die radiale Distanz nach 200 ms haben. Die Positionierung des Armes im Kraftfeld erfordert koordinative Fähigkeiten, die in der rechten Hand stärker ausgeprägt sind (Bagesteiro & Sainburg, 2002). Ist die Positionierung einmal gelernt, profitiert auch die linke Hand vom gelernten Bewegungsmuster und der durch die Asymmetrie der Hand bedingte Vorteil der linken Hand bei Kraftfeldern aus Richtung 0° wird sichtbar (vergleiche Abbildung 5.4). Die Impedanzkontrolle alleine zeigt sich damit im Rahmen dieser Arbeit als weniger effektiv als die Anpassung der Handposition an die Kraftfeldrichtung. Das Nachgeben gegenüber dem Kraftfeld als mögliche Strategie, um das Ausmaß der Bewegung nach der abrupten dynamischen Transformation zu begrenzen, wurde in Form der Drift in Experiment 3 und 4 kontrolliert, so dass die Rolle dieser Strategie offen bleibt.

6 Von neuen Antworten und neuen Fragen

„Und alles Wissen, aus dem nicht neue Fragen aufkeimen, ist schnell ein totes Wissen, verliert die Temperatur, die das Leben braucht. Im Extremfall, den wir aus der alten und neuen Geschichte nur allzu gut kennen, wird es sogar für ganze Gesellschaften zur tödlichen Gefahr. Deshalb sind für mich die drei kleinen Wörter: „Ich weiß nicht“ so vertraut und kostbar.“

*Wisława Szymborska,
Der Dichter und die Welt*

Wissen, aus dem neue Fragen aufkeimen – es ist wie ein Kreislauf, der einmal mehr Antworten liefert und das andere Mal mehr Fragen. Analogien, seien es mechanische Uhrwerke oder digitale Rechenmaschinen, sind Antworten, die sich früher oder später selbst in Frage stellen. Auch die vorliegenden Experimente lieferten Antworten – und auch ein paar Fragen.

6.1 Rückblick

6.1.1 Die Rolle der Aufgabe

In Abschnitt 1.2.3 wurde der Unterschied zwischen dem Unterdrücken geplanter Bewegungen, das heißt der Inhibition, und dem Beenden, das heißt dem Abbruch bereits laufender Bewegungen beschrieben. Dabei wird der Umkehrgrenzpunkt als Trennlinie zwischen diesen beiden Prozessen oder Prozessteilen aufgefasst. Experimentelle Unterschiede zwischen Unterdrücken und Beenden von Bewegungen liegen dabei vor allem im Nachweis einer psychologischen Refraktärzeit, die anders als für das Beenden von

Bewegungen für das Unterdrücken von Bewegungen nicht gefunden wurde (Horstmann, 2003). Allerdings zeigt sich bei beiden Prozessen kein Einfluss der Vorhersagbarkeit des Stoppsignals auf die Reaktion selbst. Mit Hilfe der Manipulation der ereignisabhängigen Vorhersagbarkeit des Stoppsignals wiesen das Logan und Burkell (1986) für das Unterdrücken einer Bewegung nach. Experiment 1 und 3 fanden für die zeitabhängige Vorhersagbarkeit im Rahmen des Beendens von Bewegungen ebenfalls keinen Haupteffekt für die Vorhersagbarkeit in Bezug auf die Reaktionszeit. Diese modulierte allenfalls die verwendeten Strategien. Insbesondere die Arbeit von Diedrichsen, Verstynen, Hon, Lehman und Ivry (2003) bestätigt dabei die Ergebnisse zu Experiment 1 und 3. Diedrichsen et al. (2003) verwendeten im Rahmen einer Entlastungsaufgabe visuelle, auditive sowie haptische Vorankündigungsreize, fanden jedoch lediglich für den Fall, dass die Versuchsperson selbst die Entlastung auslöste, einen Lerneffekt. Für andere Aufgaben, wie etwa das Synchronisieren von Tippbewegungen mit einem Metronom, weisen Studien mit deafferenzierten Patienten allerdings darauf hin, dass auditive und visuelle Vorankündigungsreize bis zu einem gewissen Grad durchaus zur Unterstützung der Bewegungssteuerung eingesetzt werden können (LaRue et al., 1995; Stenneken et al., 2006).

Während der Reaktionszeitpunkt also kaum zu beeinflussen ist, hat die Vorhersagbarkeit jedoch einen großen Einfluss auf die verwendeten Strategien zur Bewegungssteuerung. So finden Verbruggen und Logan (2009) für das Unterdrücken von Bewegungen eine Abhängigkeit der Reaktionszeit von der Wahrscheinlichkeit eines Stopp-Durchganges und des vorherigen Durchganges. Die Reaktionszeit wird zum Beispiel langsamer, wenn im vorhergehenden Durchgang die Unterdrückung der Reaktion fehlgeschlagen ist. In diesem Fall werden die Versuchspersonen vorsichtiger und reagieren langsamer. Was für die ereignisabhängige Vorhersagbarkeit und die Unterdrückung von Bewegungen gilt (siehe jedoch Morein-Zamir et al., 2007), wurde in Experiment 1 und 3 auch für den Fall zeitabhängiger Vorhersagbarkeit beim Beenden von Bewegungen nachgewiesen. In Anhängigkeit der Vorhersagbarkeit der Situation und ihren Randbedingungen griffen die Versuchspersonen zur Geschwindigkeitsanpassung (Experiment 1 und 2) oder Impedanzkontrolle. Das Lernen innerer Modelle auf Grund der zeitlichen Vorhersagbarkeit kann jedoch anhand der Ergebnisse nicht als nachgewiesen gelten.

Eine weitere mögliche Strategie, die tatsächlich mit einem Lernprozess einherging, ist die Positionierung der Hand entlang des Kraftfeldes (vergleiche Experiment 4). Diese Strategie wurde jedoch ohne Variation der Vorhersagbarkeit untersucht. Strategien sind neben der Vorhersagbarkeit auch von den Randbedingungen abhängig, hier etwa die Eigenschaften der dynamischen Transformationen (Stärke, Richtung des Kraftfeldes). So ist in Experiment 1 die Geschwindigkeitsanpassung in variablen Blöcken vor allem für geringe Kraftfeldstärken funktional (vergleiche Abschnitt 3.4). Randbedingungen haben dabei auch direkt Einfluss auf die Umsetzbarkeit von Strategien. Bei strengeren Geschwindigkeitskriterien in Experiment 1 und 2 wären die Anpassungseffekte ähnlich wie in Experiment 3 und 4 im Bezug auf die Drift nicht beobachtbar gewesen.

Neben der Tatsache, dass hier das Beenden laufender Bewegungen in Folge einer dynamischen Transformation untersucht wurde, zeichnete sich die experimentelle Aufgabe insbesondere durch die Abruptheit der dynamischen Transformation aus. Somit haben auch die dynamischen Eigenschaften der Situation einen deutlichen Einfluss auf die Bewegungssteuerung.

6.1.2 Die Rolle der dynamischen Eigenschaften der Situation

Eine wichtige Erkenntnis aus den vorliegenden Experimenten betrifft die Charakteristiken der Trajektorien. Sie sind in hohem Maße stereotyp und weisen auf die Wichtigkeit mechanischer Einflüsse im Rahmen von Bewegungen nach abrupten dynamischen Transformationen hin. Willkürliche Korrekturen verursachen eine höhere Variabilität in den Bewegungen, gerade wenn die dynamische Transformation schlecht vorhersagbar ist (Archambault et al., 2005). Darüber hinaus sind die gefundenen Effekte über verschiedene Manipulationen hinweg stabil. Die vorliegende Serie an Experimenten hat den Einfluss der Stärke einer dynamischen Transformation (Experiment 1 und 2), der räumlichen Ausdehnung einer dynamischen Transformation in Form eines Kraftfeldes (Experiment 1 und 2), der zeitlichen Ausdehnung eines Kraftfeldes (Experiment 3) sowie der Richtung, in der die Transformation wirkt (Experiment 3 und 4), aufgezeigt. In Experiment 3 und 4 wurde zudem deutlich, dass die dynamischen Eigenschaften der Situation mit denen des Endeffektors interagieren. Die mechanischen Eigenschaften von Hand und

Arm sowie ihre Geometrie sind von entscheidender Bedeutung und sind in der Lage, die Auswirkungen von Kraftfeldern zu modulieren (zur Rolle der Geometrie siehe auch Milner, 2002b; Zago et al., 2009).

Die Rückbewegung war das gemeinsame Charakteristikum quasi aller erhobenen Bewegungen, wobei laut Instruktion diese Rückbewegung ausdrücklich zu vermeiden war und die Versuchspersonen Rückmeldung darüber bekamen, wenn die Rückbewegung zu groß ausfiel, was der Instruktion zusätzlich Nachdruck verlieh. Dass sich die Rückbewegung dann dennoch in diesem Umfang zeigt, spricht deutlich dafür, dass es sich hier um eine unwillkürliche Bewegung handelt, die nicht unterdrückt werden konnte. Ob es sich bei der Rückbewegung um die geplante Stoppbewegung handelt, die Muskelaktivierung jedoch in Folge einer psychologischen Refraktärzeit zu spät eintritt, und es so zur dann ungewollten Rückbewegung kommt oder ob mechanische oder reflektorische Prozesse die Ursache dafür sind, lässt sich anhand der erhobenen Daten schwerlich entscheiden. Der Scheitel der Bewegung wird in Experiment 1 und 2 im Schnitt nach 94 und 93 ms erreicht und liegt damit zwar im Bereich getriggelter Reaktionen, allerdings zeichnet sich schon nach etwa 60 ms ein Richtungswechsel ab, der eher für einen reflektorischen Einfluss spricht (vergleiche Abbildungen 2.7 und 2.7). Die Krümmung ist durch eine unvollständige Koordination der Muskelaktivierung beim Stoppen von Bewegungen und durch die Tatsache bedingt, dass die Muskeln nicht an der Hand selbst, sondern an den Gelenken ansetzen (Gordon, Ghilardi & Ghez, 1994). Zusätzliche mechanische Einflüsse wie sie etwa auch durch die Spiegelung der Bewegung von rechter und linker Hand erkennbar werden (siehe Experiment 3 und 4), lassen sich kaum ausschließen und ohne EMG oder genaue Bestimmung der mechanischen Eigenschaften auch nicht von reflektorischen Einflüssen trennen.

Die Bewegungen nach abrupten dynamischen Transformationen sind also zunächst ballistisch und außer Kontrolle des Zentralen Nervensystems (vergleiche dazu auch Archambault et al., 2005), werden dann durch mechanische und reflektorische Einflüsse bestimmt, das heißt in gewisser Weise unter Kontrolle gehalten, bis das zentrale Nervensystem wieder steuernd auf die Bewegung zugreifen kann. Das Zentrale Nervensystem hat allerdings indirekt Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Effektoren und ist auch in der Lage, die Reflextätigkeit zu modulieren. Sowohl Dehnungs- als auch

Entlastungsreflex sind dabei an der Kompensation der dynamischen Transformation beteiligt, wobei das Ausmaß der Modulation der Reflexe, wie sich auch in den vorliegenden Experimenten zeigt, allerdings eingeschränkt ist (siehe auch Angel & Weinrich, 1986). Auf Grund der Abhängigkeit der Reflexe vom Muskeltonus ist trotzdem davon auszugehen, dass die Reflexe zumindest im Zusammenhang mit der Impedanzkontrolle ebenfalls moduliert wurden.

Auch wenn das zentrale Nervensystem zeitweilig nicht steuernd in Bewegungen eingreifen kann, so kann es doch die mechanischen Bedingungen modulieren unter denen diese ballistischen Bewegungen stehen. Alle Strategien, die im Rahmen der Experimente 1 bis 4 gefunden wurden, griffen dabei schon vor der dynamischen Transformation und stehen vermutlich nicht mit dem Reaktionszeitpunkt in Zusammenhang, wenn sich auch einige Ergebnisse als Reaktionszeiteffekte interpretieren lassen.

6.1.3 Die Rolle von Antizipation – innere Modelle und Strategien

Abgesehen vom Reaktionszeitalterungseffekt in Experiment 1 fanden sich keine weiteren eindeutig als Reaktionszeiteffekt klassifizierbaren Ergebnisse. Letztendlich handelt es sich in Experiment 1 auch nicht um eine zeitliche Vorperiode, auch wenn propriozeptive Distanzschätzungen und Zeitschätzungen Gemeinsamkeiten aufweisen. So steigt in beiden Fällen die Variabilität der Distanzschätzungen mit zunehmender Dauer beziehungsweise Länge der zu schätzenden Distanz an (Amir & Kugelmass, 1959; Woodrow, 1914). Die in Experiment 1 gefundene Abnahme der radialen Distanzen bei zunehmender Kraftfeldtiefe in variablen Blöcken wurde auf Grund der Ähnlichkeiten zwischen Zeit- und Distanzschätzung als Reaktionszeitalterungseffekt interpretiert (vergleiche Abbildung 2.10), kann allerdings auch im Zusammenhang mit den verwendeten Strategien stehen, die mehr oder weniger Zeit brauchen, um zu greifen. Vor dem Hintergrund der Wirkungslosigkeit von Vorankündigungsreizen in der Entlastungsaufgabe von Diedrichsen et al. (2003) und den fehlenden Reaktionszeiteffekten in Experiment 3 wird davon ausgegangen, dass sich die Reaktionszeit nicht zentral modulieren lässt und folglich hier auch keine Lerneffekte zu erwarten sind.

Dennoch zeigen sich in Experiment 4 Transfereffekte, die auf das Lernen eines inneren Modells der dynamischen Transformation schließen lassen. Dieses innere Modell wur-

de vermutlich hinsichtlich der Positionierung der Hand relativ zur dynamischen Transformation genutzt. Abweichend von den anderen gefundenen Strategien erfordert die Ausrichtung der Hand koordinative Fähigkeiten, wodurch die dominante rechte Hand Vorteile gegenüber der nicht-dominanten linken Hand besitzt. In Antizipation der dynamischen Transformation versuchen die Versuchspersonen hier also die Stabilität des Armes durch die Optimierung von Hand- und Armstellung zu maximieren. Hätte die Kraftfeldrichtung keinen so großen Einfluss auf die radialen Distanzen oder wären die Kraftfeldrichtungen in Experiment 4 innerhalb einiger Blöcke konstant gehalten worden, hätte sich vielleicht sogar ein Lerneffekt für die rechte Hand nachweisen lassen. Allerdings sind dynamische Transformationen teilweise sehr schnell lernbar, zumindest mit der dominanten Hand. So finden Milner und Franklin (2005) den größten Lernzuwachs schon in den ersten beiden Durchgängen.

Sowohl in Experiment 1 als auch in Experiment 2 wurde die Geschwindigkeitsanpassung innerhalb des Kraftfeldes als antizipative Strategie in Vorbereitung auf die dynamische Transformation genutzt, um das Stoppen der Bewegung zu erleichtern. Ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit unmittelbar vor der dynamischen Transformation und der radialen Distanz nach 200 ms wurde dabei vor allem bei geringen Kraftfeldstärken gefunden und in Experiment 2 lediglich bei Blöcken mit variablen Kraftfeldstärken (vergleiche Abbildung 3.4). Das und die Tatsache, dass die radialen Distanzen nach 200 ms für Kraftfelder der Stärke 2 und 4 N in Blöcken mit variabler Kraftfeldstärke trotz nicht vorhandener Geschwindigkeitsanpassung kürzer ausfallen (vergleiche Abbildung 3.3), legen nahe, dass neben oder zusätzlich zur Geschwindigkeitsanpassung weitere antizipative Strategien verwendet werden.

Die unterproportionale Entwicklung der radialen Distanzen gegenüber dem Verhältnis der Kraftfeldstärken und der in Experiment 2 gefundene Unterschied in dieser Entwicklung zwischen Blöcken mit konstanten und variablen Kraftfeldtiefen gab erste Hinweise auf die Rolle der Regulierung der Versteifung beim Stoppen nach abrupten dynamischen Transformationen. Die Ergebnisse von Al-Falahe und Vallbo (1988) bestätigen dabei den schließlich in Experiment 4 deutlich nachgewiesenen Effekt der Impedanzkontrolle via Kokontraktion. Antizipative Kokontraktion findet sich dabei auch in anderen Aufgaben, etwa beim Fangen eines Balles (Lacquaniti & Maioli, 1987). In Experiment 4 wurde

darüber hinaus deutlich, dass das Potential der Impedanzkontrolle zur Unterstützung der Stoppbewegung ohne explizite Instruktion bei weitem nicht voll ausgenutzt wurde.

Dass das Verwenden antizipativer Strategien, etwa der Geschwindigkeitsanpassung, von den jeweiligen Randbedingungen abhängt, wurde bereits erwähnt. Auch die Kosten einer Strategie stellen letztendlich Randbedingungen dar, welche den Einsatz einer Strategie erschweren können. So wird die Impedanzkontrolle mittels Kokontraktion mit hohen metabolischen Kosten in Zusammenhang gebracht, aber auch mit einer erhöhten Variabilität der Handposition über die Zeit (Milner, 2002b). Auf Grund der hohen Kosten wird sie nur selten ganz ausgereizt. Eine Ausnahme könnten Situationen darstellen, die eine Verletzung zur Folge haben können. Beißen Versuchspersonen etwa gegen einen großen Widerstand und erwarten, dass er plötzlich nachgibt, erhöhen sie antizipativ die Kokontraktion der Kaumuskulatur (Miles & Madigan, 1983). Auf die Kosten der Vorbereitung wies schon Woodrow (1914) hin und auch das Lernen innerer Modelle bedeutet letztendlich Aufwand, das diese Form der Adaptation erhöhte Anforderungen an die Aufmerksamkeit stellt, so dass manche Versuchspersonen zu in diesem Sinne einfacheren Strategien wie der Impedanzkontrolle mittels Kokontraktion greifen, wenn sie eine dynamische Transformation lernen sollen (Kaluzny & Wiesendanger, 1992).

Zentrale Erkenntnisse dieser Arbeit umfassen die Nutzung unterschiedlicher Strategien in Abhängigkeit der Randbedingungen. Dabei wirkt sich neben den Eigenschaften der dynamischen Transformation wie ihre Stärke, ihre räumliche und zeitliche Ausdehnung und ihre Richtung auch die Vorhersagbarkeit dieser Eigenschaften modulierend auf die verwendeten Strategien aus. Dabei nimmt die Modulation ab, je stabiler die Randbedingungen sind (vergleiche die 90°-Bedingungen von Experiment 3 und 4). Darüber hinaus muss angenommen werden, dass diese Strategien nicht in Reinform angewandt werden, sondern mehrere dieser Strategien, etwa die Impedanzkontrolle mittels Kokontraktion und das Ausformen innerer Modelle (siehe etwa Milner, 2004), gleichzeitig verwendet werden. Darüber hinaus wurde in Experiment 4 für die linke Hand ein Strategiewechsel während des Lernprozess nachgewiesen. Schlussendlich ergibt sich aus den Erkenntnissen, welche die vorliegenden Experimente geliefert haben, ein in hohem Maße flexibles Bild der menschlichen Bewegungssteuerung unter abrupten dynamischen Transformationen.

6.2 Ausblick. . .

6.2.1 . . . auf die Forschung

Da in der vorliegenden Arbeit nur ein recht kleiner Teil des Parameterraums erfasst wurde, ist dessen Erweiterung für ein tieferes Verständnis der Bewegungssteuerung unter abrupten dynamischen Transformationen notwendig. Vor allem im Hinblick auf die durchweg gefundenen Interaktionseffekte lässt sich dann eventuell feststellen, wann es zu Strategiewechseln kommt und ob das Stoppen nach abrupten dynamischen Transformationen mit der Spanne der untersuchten Randbedingungen zusammenhängt (für Vorperiodeneffekte vergleiche Los & Van den Heuvel, 2001).

Vor allem die Ergebnisse aus Experiment 4 lassen vermuten, dass die Positionierung von Hand und Arm eine wichtige Strategie ist, um externe Störungen wirkungsvoll zu kompensieren. Auch Milner (2002b) vermutet ein großes Potential in der strategischen Ausrichtung der Gliedmaßen gegenüber einer dynamischen Transformation (siehe auch Milner & Franklin, 1998). In Abhängigkeit von Richtung und Stärke der dynamischen Transformation erlaubt es eine solche Ausrichtung, die Steifigkeit in ganz bestimmte Richtungen auszurichten, ohne gleichzeitig die Kosten der Kokontraktion tragen zu müssen. Um diese Strategie näher zu untersuchen, ist allerdings eine Erfassung der Haltung von Arm und Hand unumgänglich. Damit ließen sich dann auch Veränderungen während des Lernens des inneren Modells der dynamischen Transformation untersuchen, was letztendlich weiter zum Verständnis der Bewegungssteuerung unter diesen Bedingungen beitragen würde.

Neben einer Erweiterung der Datenerfassung im Rahmen des verwendeten Paradigmas lassen sich Varianten des Paradigmas finden, die ebenfalls zur Erweiterung des Verständnisses um die Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen beitragen. Stellt man aktive Reaktionen auf eine dynamische Transformation (zum Beispiel Angel & Weinrich, 1986; Diedrichsen et al., 2003) und passive Reaktionen, wobei die Versuchspersonen gebeten werden, nicht willentlich auf die dynamische Transformation zu reagieren (zum Beispiel Archambault et al., 2005) einander gegenüber, erhält man potentiell Aufschluss darüber, wann die beschriebene ballistische Phase endet und wodurch sich Stoppen nach abrupten dynamischen Transformationen weiter auszeichnet.

Die Rolle der Impedanzkontrolle lässt sich ebenfalls durch eine Erweiterung der Paradigmas untersuchen. Die Steifigkeit kann dazu entweder experimentell über das Aufschalten kurzer Störimpulse (Burdet et al., 2000) oder über das parallele Aufzeichnen eines EMGs erfasst werden. Letztere Methode erfordert allerdings eine genaue Kenntnis der beteiligten Muskeln (Luttmann, 1996), andernfalls kann sich leicht ein verzerrtes Bild ergeben. Spezifische energiesparende Strategien, wie das punktuelle Erhöhen der Kokontraktion kurz vor der dynamischen Transformation lassen sich aber letztendlich nur mit Hilfe eines EMGs untersuchen.

Um die Rolle der Vorperioden noch einmal von einer anderen Seite zu betrachten, bietet es sich an, den Einfluss des vorherigen Durchgangs auf den aktuellen zu untersuchen. Solche Sequenzeffekte sind nicht nur im Rahmen von Vorperioden aufschlussreich, sondern geben letztendlich genauer Auskunft darüber, wie eine Einflussgröße wirkt, und zwar über den unmittelbaren Effekt während eines einzelnen Durchgangs hinaus. In den vorliegenden Experimenten lassen sich Sequenzeffekte nur schwer abschätzen, weil die möglichen Sequenzen nicht systematisch variiert wurden.

Weiter lässt sich das Paradigma hinsichtlich einer zweiten Aufgabe, etwa einer Detektionsaufgabe, die am Bildschirm präsentiert wird, erweitern. Kommt es zu einer Doppelaufgaben-Interferenz, lässt sich auf die Beteiligung zentrale, aufmerksamkeitsbindender Prozesse schließen und deren Modulation durch die verschiedenen Charakteristika dynamischer Transformationen untersuchen.

6.2.2 . . . auf die Praxis

Ob die Effekte groß genug sind, um eine Diskussion in der Praxis anzustoßen, kann letztendlich nur mit realistischeren Szenarien untersucht werden. Sind die Effekte zu klein, ist eine Investition in die Verbesserung der minimalinvasiven Operationstechnik kaum zu rechtfertigen. Abgesehen davon setzen die Ergebnisse enge Grenzen. Schon abrupte dynamische Transformationen in Höhe von 2 bis 3 N verursachen eine Ballistik in der Bewegung, welche eine zentralnervöse Bewegungssteuerung kurzzeitig unmöglich zu machen scheint. Selbst noch kleinere Kräfte führen, obwohl sie schon teilweise verzögert wahrgenommen werden, zu demselben Effekt.

Unklar ist vor allem, inwieweit sich die generell niedrigere Vorhersagbarkeit der Randbedingungen während einer Operation, die auch mit der fehlenden Wiederholung der Aufgabe in Verbindung steht, auf die Lernbarkeit abrupter dynamischer Transformationen auswirkt. Allein die günstige Positionierung von Hand und Arm scheint hier eine Möglichkeit zur Verbesserung durch Lernen zu bieten. Ansonsten legen die Ergebnisse hier den Einsatz der Impedanzkontrolle nahe, wie sie auch sonst in unsicheren und unbekannteren Situationen eingesetzt wird.

Mögliche technische Unterstützungen, die sich aus den vorliegenden Experimenten ergeben, umfassen die Transformation der am Operationsort wirkenden Kräfte. Sie können so skaliert werden, dass die ballistische Phase möglichst gering ausfällt und die dynamische Transformation trotzdem spürbar bleibt, was wünschenswert ist, da sie zum Beispiel in der Periduralanästhesie der Orientierung dient. Alternativ kann die Stoppbewegung aktiv vom Roboter abgefangen werden, so dass die Überschussbewegung und die Rückbewegung minimiert werden. Wie sich diese technische Unterstützung tendenziell auf die Bewegungssteuerung nach abrupten dynamischen Transformationen in einem chirurgischen Kontext auswirkt, lässt sich letztendlich besser mit Kraftfeldern untersuchen, die in ihren Eigenschaften mehr denen von menschlichem Gewebe gleichen als die hier verwendeten.

6.3 Der Forscher und die Welt

Die kognitionswissenschaftliche Forschung im Bereich der Bewegungssteuerung muss sich fragen lassen, ob sie bis jetzt nicht zu wenig mutig war, ob die Reduktion auf sehr einfache Bewegungen notwendig war und ob sie nicht gar hinderlich dabei war, die menschliche Bewegungssteuerung zu erforschen. Menschliche Bewegung stellt seltenst einen Selbstzweck dar; sie ist vielmehr in einen Handlungskontext eingebettet und einem Handlungsziel untergeordnet (zum Begriff der Handlung siehe zum Beispiel Müsseler, Aschersleben & Prinz, 1996). Die Forschung muss sich weiter fragen, ob die Bewegungsbruchteile, die sie im Labor betrachtet, etwas mit den Bewegungen zu tun haben, die etwa ein Chirurg im Operationssaal durchführt.

Der Weg vom Bewegungsbruchteil zu einer Bewegung mit sinnvollerem Handlungskontext kann für die hier behandelte Aufgabe ein sehr kurzer sein. Mit einer nur etwas aufwändigeren Experimentalssoftware gelingt es leicht, einen glaubwürdigen Spielkontext aufzubauen; eine Beispiel wäre eine Aufgabe, in der es etwa um die möglichst schnelle, aber erfolgreiche künstliche Befruchtung von Fliegenfischeiern in einem Labor geht.

Die Untersuchung von Handlungskontexten birgt wie die theoretische Diskussion um die „richtige“ Analogie für die menschliche Bewegungssteuerung das Potential die bisherigen Vorgehensweisen und theoretischen Überzeugungen in Frage zu stellen – und damit bleibt Wissen lebendig.

Literaturverzeichnis

- Aldien, Y., Marcotte, P., Rakheja, S. & Boileau, P.-E. (2005). Mechanical impedance and absorbed power of hand-arm xh-axis vibration and role of hand forces and posture. *Industrial Health*, 43, 495 – 508.
- Alegria, J. (1980). Contrôle stratégique du choix d'un instant pour se préparer à réagir. In: J. Requin (Hrsg.), *Anticipation et comportement* (S. 95 – 105). Paris: Editions du Centre national de la recherche scientifique.
- Al-Falahe, N. A. & Vallbo, A. B. (1988). Role of the human fusimotor system in a motor adaptation task. *Journal of Physiology*, 401, 77 – 95.
- Amir, N. & Kugelmass, S. (1959). The kinesthetic estimation of distances in relation to the midline of the body in normal persons. *Acta Psychologica*, 16, 235 – 244.
- Andani, M. E., Bahrami, F. & Jabehdar-Maralani, P. (2009). Ama-mosaici: An automatic module assigning hierarchical structure to control human motion based on movement decomposition. *Neurocomputing*, 72, 2310 – 2318.
- Angel, R. W., Eppler, W. & Iannone, A. (1965). Silent period produced by unloading of muscle during voluntary contraction. *Journal of Physiology*, 180, 864 – 870.
- Angel, R. W. & Goldstein, M. (1983). Abnormal unloading reflex in a patient with infarction of the medial lemniscus. *Annals of Neurology*, 13(3), 279 – 284.
- Angel, R. W. & Lewitt, P. A. (1978). Unloading and shortening reactions in parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 41, 919 – 923.
- Angel, R. W. & Weinrich, M. (1986). Stretch and unloading reflexes in a human hand muscle. *Experimental Neurology*, 94, 348 – 358.
- Annett, J., Annett, M., Hudson, P. T. W. & Turner, A. (1979). The control of movement in the preferred and non-preferred hands. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 641 – 652.
- Annett, M. & Annet, J. (1979). Individual differences in right and left reaction time. *British Journal of Psychology*, 70(3), 393 – 404.

- Archambault, P. S., Mihaltchev, P., Levin, M. F. & Feldman, A. G. (2005). Basic elements of arm postural control analyzed by unloading. *Experimental Brain Research*, *164*, 225 – 241.
- Arnold, P. & Farrell, M. J. (2002). Can virtual reality be used to measure and train surgical skills? *Ergonomics*, *45*(5), 362 – 379.
- Aron, A. R. (2009). Introducing a special issue on stopping action and cognition. *Neuroscience and Behavioral Reviews*, *33*, 611 – 612.
- Bagesteiro, L. B. & Sainburg, R. L. (2002). Handedness: Dominant arm advantages in control of limb dynamics. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 2408 – 2421.
- Bagesteiro, L. B. & Sainburg, R. L. (2003). Nondominant arm advantages in load compensation during rapid elbow joint movements. *Journal of Neurophysiology*, *90*, 1503 – 1513.
- Band, G. P. H. & van Boxtel, G. J. M. (1999). Inhibitory motor control in stop paradigms: review and reinterpretation of neural mechanisms. *Acta Psychologica*, *101*, 179 – 211.
- Bard, C., Paillard, J., Lajoie, Y., Fleury, M., Teasdale, N., Forget, R. et al. (1992). Role of afferent information in the timing of motor commands: A comparative study with a deafferented patient. *Neuropsychologia*, *30*(2), 201 – 206.
- Bastin, J., Calvin, S. & Montagne, G. (2006). Muscular proprioception contributes to the control of interceptive actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(4), 964 – 972.
- Bays, P. M. & Wolpert, D. M. (2007). Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *Journal of Physiology*, *578*, 387 – 396.
- Billon, M., Bard, C., Fleury, M., Blouin, J. & Teasdale, N. (1996). Simultaneity of two effectors in synchronization with a periodic external signal. *Human Movement Science*, *15*, 25 – 38.
- Bonnet, M. & MacKay, W. A. (1989). Changes in contingent-negative variation and reaction time related to precuing of direction and force of a forearm movement. *Brain, behavior and evolution*, *33*, 147 – 152.
- Boucher, L., Palmer, T. J., Logan, G. D. & Schall, J. D. (2007). Inhibitory control in mind and brain: An interactive race model of countermanding saccades. *Psychological Review*, *114*(2), 376 – 397.

- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R. & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, *382*, 252 – 255.
- Brebner, J. (1968). Continuing and reversing the direction of responding movements. *Journal of Experimental Psychology*, *78*(1), 120 – 127.
- Burdet, E., Osu, R., Franklin, D., Yoshioka, T., Milner, T. & Kawato, M. (2000). A method for measuring endpoint stiffness during multi-joint arm movements. *Journal of Biomechanics*, *33*, 1705 – 1709.
- Carson, R. G. (1993). Manual asymmetries: Old problems and new directions. *Human Movement Science*, *12*, 479 – 506.
- Corden, D. M., Lippold, O., Buchanan, K. & Morrington, C. (2000). Long-latency component of the stretch reflex in human muscle is not mediated by intramuscular stretch receptors. *Journal of Neurophysiology*, *84*, 184 – 188.
- Crago, P. E., Houk, J. C. & Hasan, Z. (1976). Regulatory actions of human stretch reflex. *Journal of Neurophysiology*, *39*(5), 925 – 935.
- Davidson, P. R. & Wolpert, D. M. (2003). Motor learning and prediction in a variable environment. *Current Opinions in Neurobiology*, *13*, 1 – 6.
- Deecke, L. (1996). Planning, preparation, execution, and imagery of volitional action. *Cognitive Brain Research*, *3*, 59 – 64.
- Deecke, L., Scheid, P. & Kornhuber, H. H. (1969). Distribution of readiness potential, pre-motion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements. *Experimental Brain Research*, *7*, 156 – 168.
- De Jong, R., Coles, M. G. H. & Logan, G. D. (1995). Strategies and mechanisms in nonselective and selective inhibitory motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*(3), 498 – 511.
- De Jong, R., Coles, M. G. H., Logan, G. D. & Gratton, G. (1990). In search of the point of no return : The control of response processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(1), 164 – 182.
- De La Mettrie, J. O. (1748). *L'homme machine*. Leiden: Elie Luzac.
- De Serres, S. J. & Milner, T. (1991). Wrist muscle activation patterns and stiffness associated with stable and unstable mechanical loads. *Experimental Brain Research*, *86*, 451 – 458.
- Desmurget, M. & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(11), 423 – 431.

- Desmurget, M. & Grafton, S. (2003). Feedback or feedforward control: End of a dichotomy. In: S. H. Johnson-Frey (Hrsg.), *Taking action: cognitive neuroscience perspectives on intentional acts*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Diedrichsen, J., Verstynen, T., Hon, A., Lehman, S. L. & Ivry, R. B. (2003). Anticipatory adjustments in the unloading task: is an efference copy necessary for learning? *Experimental Brain Research*, 148, 272 – 276.
- Dounskaia, N., Wisleder, D. & Johnson, T. (2005). Influence of biomechanical factors on substructure of pointing movements. *Experimental Brain Research*, 164, 505 – 516.
- Durup, H. & Requin, J. (1970). Hypothèses sur le rôle des probabilités conditionnelles du signal d'exécution dans le temps de réaction simple. *Psychologie Française*, 15(1), 37 – 46.
- Evarts, E. V. (1976). Relations of reflexes and intended movements. In: S. Homma (Hrsg.), *Understanding the stretch reflex*. Amsterdam: Elsevier.
- Fisk, J., Lackner, J. R. & DiZio, P. (1993). Gravitation force level influences arm movement control. *Journal of Neurophysiology*, 69(2), 504 – 511.
- Flanagan, J. R. & Lolley, S. (2001). The inertial anisotropy of the arm is accurately predicted during movement planning. *Journal of Neuroscience*, 21(4), 1361 – 1369.
- Flanders, M. & Soechting, J. F. (1990). Arm muscle activation for static force in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, 64(6), 1818 – 1837.
- Flash, T. & Mussa-Ivaldi, F. (1990). Human arm stiffness characteristics during the maintenance of posture. *Experimental Brain Research*, 82, 315 – 326.
- Fleury, M., Macar, F., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Lamarre, Y. et al. (1994). Production of short timing responses: A comparative study with a deafferented patient. *Neuropsychologia*, 32(11), 1435 – 1440.
- Franklin, D. W., Liaw, G., Milner, T. E., Osu, R., Burdet, E. & Kawato, M. (2007). End-point stiffness of the arm is directionally tuned to instability in the environment. *Journal of Neuroscience*, 27(29), 7705 – 7716.
- Franklin, D. W., Osu, R., Burdet, E., Kawato, M. & Milner, T. E. (2003). Adaptation to stable and unstable dynamics achieved by combined impedance control and inverse dynamics model. *Journal of Neurophysiology*, 96, 3270 – 3282.

- Gielen, C. C. A. M., Ramaekers, L. & van Zuylen, E. J. (1988). Long-latency stretch reflexes as co-ordinated functional responses in man. *Journal of Physiology*, *407*, 275 – 292.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., Cooper, S. E. & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements II. Systematic extent errors resulting from inertial anisotropy. *Experimental Brain Research*, *99*, 112 – 130.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F. & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements I: Independence of direction and extent variability. *Experimental Brain Research*, *99*, 97 – 111.
- Granit, R. (1981). Comments on history of motor control. In: V. B. Brooks (Hrsg.), *Handbook of physiology*. Bethesda, Maryland: American Physiological Society.
- Gribble, P. L., Mullin, L. I., Cothros, N. & Mattar, A. (2003). Role of cocontraction in arm movement accuracy. *Journal of Neurophysiology*, *89*, 2396 – 2405.
- Gribble, P. L. & Ostry, D. J. (2000). Compensation for loads during arm movements using equilibrium-point control. *Experimental Brain Research*, *135*, 474 – 482.
- Henry, F. M. & Harrison, J. S. (1961). Refractoriness of a fast movement. *Perceptual and Motor Skills*, *13*, 351 – 354.
- Herbort, O. & Butz, M. V. (2009). Anticipatory planning of sequential hand and finger movements. *Journal of Motor Behavior*, *41*(6), 561 – 569.
- Hinder, M. R. & Milner, T. E. (2005). Novel strategies in feedforward adaptation to a position-dependent perturbation. *Experimental Brain Research*, *165*, 239 – 249.
- Hommel, B. (1998). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(5), 1368 – 1384.
- Horstmann, G. (2003). The psychological refractory period of stopping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*(5), 965 – 981.
- Houk, J. C. (1979). Regulation of stiffness by skeletomotor reflexes. *Annual Review of Physiology*, *41*, 99 – 114.
- Kalenscher, T., Kalveram, K.-T. & Konczak, J. (2003). Effects of two different dynamic environments on force adaptation: Exposure to a new force but not the preceding force experience accounts for transition- and after-effects. *Motor Control*, *7*, 242 – 263.

- Kaluzny, P. & Wiesendanger, M. (1992). Feedforward postural stabilization in a distal bimanual unloading task. *Experimental Brain Research*, 92, 173 – 182.
- Kato, E., Nagano, H., Yamamura, S. & Ueda, M. (2003). Synthetic inhibitor of leaf-closure that reveals the biological importance of leaf-movements for the survival of leguminous plants. *Tetrahedron*, 59, 5909 – 5917.
- Keijzer, F. (2002). Representation in dynamical and embodied cognition. *Cognitive Systems Research*, 3, 275 – 288.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Kent, R. D. & Minifie, F. D. (1977). Coarticulation in recent speech production models. *Journal of Phonetics*, 5, 115 – 133.
- Klatzky, R. L. & Lederman, S. J. (2002). Touch. In: A. F. Healy & R. W. Proctor (Hrsg.), *Experimental psychology* (S. 147 – 176). New York: Wiley.
- Kornhuber, H. & Deecke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei willkürbewegungen und passiven bewegungen des menschen: Bereitschaftspotential und reafferente potentiale. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 284, 1 – 17.
- Kuhn, F. (1953). Über die mechanische impedanz des menschen bei der arbeit mit dem preßlufthammer. *Arbeitsphysiologie*, 15, 79 – 84.
- Lacquaniti, F., Licata, F. & Soechting, J. F. (1982). The mechanical behavior of the human forearm in response to transient perturbations. *Biological Cybernetics*, 44, 35 – 46.
- Lacquaniti, F. & Maioli, C. (1987). Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching. *Brain Research*, 406, 373 – 378.
- Lai, E. J., Hodgson, A. J. & Milner, T. E. (2003). Influence of interaction force levels on degree of motor adaptation in a stable dynamic force field. *Experimental Brain Research*, 153, 76 – 83.
- LaRue, J., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Paillard, J., Forget, R. et al. (1995). Is proprioception important for the timing of motor activities? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 73, 255 – 261.
- Latash, M. L. (2008). *Neurophysiological basis of movement* (2. Aufl.). Champaign: Human Kinetics.

- Libet, B. (1999). Do we have free will? *Journal of Consciousness Studies*, 6(8 – 9), 47 – 57.
- Libet, B. (2006). Reflections on the interaction of mind and brain. *Progress in Neurobiology*, 78, 233 – 326.
- Liu, J. & Reinkensmeyer, D. J. (2007). Motor adaptation to a small force field superimposed on a large background force. *Experimental Brain Research*, 178, 402 – 414.
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm. In: D. Dagenbach (Hrsg.), *Inhibitory processes in attention, memory and language*. San Diego: Academic Press.
- Logan, G. D. & Burkell, J. (1986). Dependence and independence in responding to double stimulation: A comparison of stop, change, and dual-task paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(4), 549 – 563.
- Logan, G. D. & Cowan, W. B. (1984). On the ability to inhibit thought and action: A theory of an act of control. *Psychological Review*, 91(3), 295 – 327.
- Los, S. A., Knol, D. L. & Boers, R. M. (2001). The foreperiod effect revisited: conditioning as a basis for nonspecific preparation. *Acta Psychologica*, 106, 121 – 145.
- Los, S. A. & Van den Heuvel, C. E. (2001). Intentional and unintentional contributions to nonspecific preparation during reaction time foreperiods. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 370 – 386.
- Luttmann, A. (1996). Physiological basis and concepts of electromyography. In: S. Kumar & A. Mital (Hrsg.), *Electromyography in ergonomics*. London: Taylor & Francis.
- MacFarlane, M., Rosen, J., Hannaford, B., Pellegrini, C. & Sinanan, M. (1999). Force-feedback grasper helps restore sense of touch in minimally invasive surgery. *Journal of Gastrointestinal Surgery*, 3(3), 278 – 285.
- Magill, J., Anderson, B., Anderson, G., Hess, P. & Pratt, S. (2004). Multi-axis mechanical simulator for epidural needle insertion. In: S. Cotin & D. Metaxas (Hrsg.), *Medical Simulation: International Symposium, ISMS 2004, Cambridge, MA, USA, June 17 – 18, 2004. Proceedings* (S. 267 – 276). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- McGarry, T. & Franks, I. M. (2000). Inhibitory motor control in stop paradigms: comment on band and van boxtel. *Acta Psychologica*, 105, 83 – 88.
- McIntyre, J. & Bizzi, E. (1993). Servo-hypothesis for the biological control of movement. *Journal of Motor Behavior*, 25(3), 193 – 202.
- Miles, T. S. & Madigan, M. L. (1983). Programming of antagonist muscle stiffness during masticatory muscle unloading in man. *Archives of Oral Biology*, 28(10), 947 – 951.
- Milner, T. E. (2002a). Adaptation to destabilizing dynamics by means of muscle cocontraction. *Experimental Brain Research*, 143, 406 – 416.
- Milner, T. E. (2002b). Contribution of geometry and joint stiffness to mechanical stability of the human arm. *Experimental Brain Research*, 143, 515 – 519.
- Milner, T. E. (2004). Accuracy of internal dynamics models in limb movements depends on stability. *Experimental Brain Research*, 159, 172 – 184.
- Milner, T. E. & Cloutier, C. (1993). Compensation for mechanically unstable loading in voluntary wrist movement. *Experimental Brain Research*, 94, 522 – 532.
- Milner, T. E. & Franklin, D. W. (1998). Characterization of multijoint finger stiffness: Dependence on finger posture and force direction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 45(11), 1363 – 1375.
- Milner, T. E. & Franklin, D. W. (2005). Impedance control and internal model use during the initial stage of adaptation to novel dynamics in humans. *Journal of Physiology*, 567(2), 651 – 664.
- Morein-Zamir, S., Chua, R., Franks, I., Nagelkerke, P. & Kingstone, A. (2006). Measuring online volitional response control with a continuous tracking task. *Behavior Research Methods*, 38(4), 638 – 647.
- Morein-Zamir, S., Chua, R., Franks, I., Nagelkerke, P. & Kingstone, A. (2007). Predictability influences stopping and response control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(1), 149 – 162.
- Morein-Zamir, S., Nagelkerke, P., Chua, R., Franks, J. & Kingstone, A. (2004). Inhibiting prepared and ongoing responses: Is there more than one kind of stopping? *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(6), 1034 – 1040.
- Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (1996). Die Steuerung von Handlungen. In: G. Roth & W. Prinz (Hrsg.), *Kopf-Arbeit – Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.

- Mutha, P. M., Boulinguez, P. & Sainburg, R. L. (2008). Visual modulation of proprioceptive reflexes during movement. *Brain Research*, 1246, 54 – 69.
- Nagano, A., Komura, T., Himeno, R. & Fukashiro, S. (2003). Optimal digital filter cutoff frequency of jumping kinematics evaluated through computer simulation. *International Journal of Sport and Health Science*, 1(2), 196 – 201.
- Nakazawa, K., Yamamoto, S.-I. & Yano, H. (1997). Short- and long-latency reflex responses during different motor tasks in elbow flexor muscles. *Experimental Brain Research*, 116, 20 – 28.
- Newell, K. M. & Houk, J. C. (1983). Speed and accuracy of compensatory responses to limb disturbances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(1), 58 – 74.
- Nichols, T. R. (1985). Is “the mass-spring model” a testable hypothesis? *Journal of Motor Control*, 17(4), 499 – 500.
- Nielson, J. & Kagamihara, Y. (1993). The regulation of presynaptic inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *Journal of Physiology*, 464, 575 – 593.
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 200 – 246.
- Nowak, D. A. & Hermsdörfer, J. (2006). Predictive and reactive control of grasping forces: on the role of the basal ganglia and sensory feedback. *Experimental Brain Research*, 173, 650 – 660.
- Okamura, A. M. (2008). Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Current Opinion in Urology*, 18, 1 – 6.
- Orliaguet, J.-P., Kandel, S. & Boe, L. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: Influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905 – 912.
- Osu, R., Hirai, S., Yoshioka, T. & Kawato, M. (2004). Random presentation enables subject to adapt to two opposing forces on the hand. *Nature Neuroscience*, 7(2), 111 – 112.
- Paillard, J. (1948). Quelques données psychophysiologiques relatives au déclenchement de la commande motrice. *Année Psychologique*, 46 – 47, 28 – 46.

- Paltsev, E. I. & Aggashyan, R. V. (1980). System for stabilization of the position of the human hand upon slight perturbation: Role of viscoelasticity of the forearm muscles. *Mechanics of Composite Materials*, 15(6), 757 – 762.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220 – 244.
- Pearson, K. & Gordon, J. (2000a). Locomotion. In: E. R. Kandel, J. H. Schwartz & T. M. Jessell (Hrsg.), *Principles of neural science* (4. Aufl.). New York: McGraw-Hill.
- Pearson, K. & Gordon, J. (2000b). Spinal reflexes. In: E. R. Kandel, J. H. Schwartz & T. M. Jessell (Hrsg.), *Principles of neural science* (4. Aufl.). New York: McGraw-Hill.
- Peirs, J., Clijnen, J., Reynaerts, D., van Brussel, H., Herijgers, P., Corteville, B. et al. (2004). A micro optical force sensor for force feedback during minimally invasive robotic surgery. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115(2 – 3), 447 – 455.
- Pezzulo, G. (2008). Coordinating with the future: The anticipatory nature of representation. *Minds & Machines*, 18, 179 – 225.
- Pillariseti, A., Anjum, W., Desai, J. P., Friedman, G. & Brooks, A. D. (2005). Force feedback interface for cell injection. In: *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (S. 319 – 400). Washington, D.C.: IEEE Computer Society.
- Requin, J. (1978). Spécificité des ajustements préparatoires à l'exécution du programme moteur. In: H. Hécaen & M. Jeannerod (Hrsg.), *Du contrôle moteur à l'organisation du geste*. Paris: Masson.
- Requin, J., Brener, J. & Ring, C. (1991). Preparation for action. In: J. R. Jennings & M. G. H. Cohen (Hrsg.), *Handbook of cognitive psychology: Central and autonomic nervous system approaches* (S. 357 – 448). Oxford: John Wiley & Sons.
- Reynolds, R. F. & Bronstein, A. M. (2003). The broken escalator phenomenon. aftereffect of walking onto a moving platform. *Experimental Brain Research*, 151(3), 301 – 308.
- Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction, and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(4), 444 – 474.
- Sainburg, R. L. & Schaefer, S. Y. (2004). Interlimb differences in control of movement extent. *Journal of Neurophysiology*, 92, 1374 – 1383.

- Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., Burden, A. M. & Bartlett, R. M. (1992). The role of predictive visual temporal information in the coordination of muscle activity in catching. *Experimental Brain Research*, *89*, 223 – 228.
- Schabowsky, C. N., Hidler, J. M. & Lum, P. S. (2007). Greater reliance on impedance control in the nondominant arm compared with the dominant arm when adapting to a novel dynamic environment. *Experimental Brain Research*, *182*, 567 – 577.
- Scheidt, R. A., Dingwell, J. B. & Mussa-Ivaldi, F. A. (2001). Learning to move amid uncertainty. *Journal of Neurophysiology*, *86*, 971 – 995.
- Schmidt, R. A. (1968). Anticipation and timing in human motor performance. *Psychological Bulletin*, *70*(6), 631 – 646.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: a behavioral emphasis* (3. Aufl.). Champaign, Lower Mitcham, Windsor, Auckland, Leeds: Human Kinetics.
- Schmitz, C., Martin, N. & Assaiante, C. (2002). Buiding anticipatory postural adjustment during childhood: a kinematic and electromyographic analysis of unloading in children from 4 to 8 years of age. *Experimental Brain Research*, *142*, 354 – 364.
- Schöner, G. & Kelso, J. A. S. (1988). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of theoretical Biology*, *135*, 501 – 524.
- Searle, J. R. (1987). Minds and brains without programs. In: C. Blakemore & S. Greenfield (Hrsg.), *Mindwaves – thoughts on intelligence, identity and consciousness*. Oxford: Basil Blackwell Ltd.
- Searle, J. R. (1990, January). Is the brain's mind a computer program? *Scientific American*, 20 – 25.
- Searle, J. R. (1992). *The rediscovery of the mind*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, *14*(5), 3208 – 3224.
- Shiratori, T. & Aruin, A. (2007). Modulation of anticipatory postural adjustments associated with unloading perturbation: effect of characteristics of a motor action. *Experimental Brain Research*, *178*, 206 – 215.
- Sosnik, R., Shemesh, M. & Abeles, M. (2007). The point of no return in planar hand movements: an indication of the existence of high level motion primitives. *Cognitive Neurodynamics*, *1*, 341 – 358.

- Stapp, H. P. (1999). Attention, intention, and will in quantum physics. *Journal of Consciousness Studies*, 6, 143 – 164.
- Stenneken, P., Prinz, W., Cole, J., Paillard, J. & Aschersleben, G. (2006). The effect of sensory feedback on the timing of movements: Evidence from deafferented patients. *Brain Research*, 1084, 123 – 131.
- Struppler, A., Landau, W. M. & Mehls, O. (1969). Analyse des entlastungsreflexes am menschen. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 313, 155 – 167.
- Takahashi, C. D., Scheidt, R. A. & Reinkensmeyer, D. J. (2001). Impedance control and internal model formation when reaching in a randomly varying dynamical environment. *Journal of Neurophysiology*, 86, 1047 – 1051.
- Thoroughman, K. A. & Shadmehr, R. (1999). Electromyographic correlates of learning an internal model of reaching movements. *Journal of Neuroscience*, 19(19), 8573 – 8588.
- Turvey, M. T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Movement Science*, 26, 657 – 697.
- Ulrich, R., Leuthold, H. & Sommer, W. (1998). Motor programming of response force and movement direction. *Psychophysiology*, 35, 721 – 728.
- Van der Lubbe, R. H. J., Los, A., S., Jaśkowski, P. & Verleger, R. (2004). Being prepared on time: on the importance of the previous foreperiod to current preparation, as reflected in speed, force and preparation-related brain potentials. *Acta Psychologica*, 116, 245 – 262.
- Verbruggen, F. & Logan, G. D. (2009). Proactive adjustments of response strategies in the stop-signal paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(3), 835 – 854.
- Vince, M. A. (1948). The intermittency of control movements and the psychological refractory period. *British Journal of Psychology: General Section*, 38(3), 149 – 157.
- Vince, M. A. & Welford, A. T. (1967). Time taken to change the speed of a response. *Nature*, 213, 532 – 533.
- Vint, P. F. & Hinrichs, R. N. (1996). Endpoint error in smoothing and differentiating raw kinematic data: an evaluation of four popular methods. *Journal of Biomechanics*, 29(12), 1637 – 1642.

- Wagner, C. R. & Howe, R. D. (2005). Mechanisms of performance enhancement with force feedback. In: *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (S. 21 – 29). Washington, D.C.: IEEE Computer Society.
- Wagner, C. R. & Howe, R. D. (2007). Force feedback benefit depends on experience in multiple degree of freedom robotic surgery task. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6), 1235 – 1240.
- Wagner, C. R., Stylopoulos, N., Jackson, P. G. & Howe, R. D. (2007). The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 16(3), 252 – 262.
- Walsh, E. & Haggard, F. (2007). The internal structure of stopping revealed by a sensory detection task. *Experimental Brain Research*, 183, 405 – 410.
- Welford, A. T. (1952). The “psychological refractory period and the timing of high-speed performance” – A review and a theory. *British Journal of Psychology*, 43, 2 – 19.
- Williams, L. R. T. (1974). Effects of number of alternatives on the psychological refractoriness of an extended movement. *Journal of Motor Behavior*, 8, 227 – 234.
- Williams, L. R. T. (1971). Refractoriness of a long movement. *Research Quarterly of the AAHPER*, 42(2), 212 – 219.
- Wise, A. K., Gregory, J. E. & Proske, U. (1998). Detection of movements of the human forearm during and after co-contractions of muscles acting at the elbow joint. *Journal of Physiology*, 508(1), 325 – 330.
- Wolpert, D. M. & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11, 1317 – 1329.
- Woodrow, H. (1914). The measurement of attention. *Psychological Monographs*, XVII(5), 1 – 156.
- Zago, M., McIntyre, J., Senot, P. & Lacquaniti, F. (2009). Visuo-motor coordination and internal models of object interception. *Experimental Brain Research*, 192, 571 – 604.
- Zhou, M., Perreault, J., Schweitzberg, S. D. & Cao, C. G. L. (2008). Effects of experience on force perception threshold in minimally invasive surgery. *Surgical Endoscopy*, 22(2), 510 – 515.

Abbildungsverzeichnis

- 2.1 Die Versuchspersonen hielten den Stift des Roboterarmes in etwa so wie man ein Schreibgerät hält: fest zwischen Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen. Während eines Durchganges durften sie ihren Arm nicht auf der Tischplatte aufstützen. Auf dem Brett unten sieht man links die Markierung für die Pausenstellung und rechts diejenige für die Wartestellung. Die Startposition befand sich 10 cm oberhalb der Wartestellung. 29
- 2.2 Die Kraft wurde anhand logistischer Funktionen aufgeschaltet um Vibrationen beim Aufschalten der Kraft zu vermeiden. Von den neun verwendeten Kraftfeldern sind hier drei beispielhaft dargestellt (siehe Legende). 33
- 2.3 Darstellung gefilterter und ungefilterter Daten einer einfachen Zeigebewegung. Oben: Position in mm; in der Mitte: Geschwindigkeit in mm/s; unten: Beschleunigung in mm/s². Deutlich Erkennbar ist die glättende Wirkung des Filters (hier ein Butterworth-Filter 4. Grades mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz). 34
- 2.4 Darstellung gefilterter und ungefilterter Daten einer unter abrupter dynamischer Transformation ausgeführten Bewegung. Oben: Position in mm; in der Mitte: Geschwindigkeit in mm/s; unten: Beschleunigung in mm/s². Links die ungefilterten Daten, rechts die mit Butterworth-Filtern 4. Grades und Grenzfrequenzen von 10 und 50 Hz gefilterte Daten. Gut zu erkennen ist das Einschwingen der Filter vor dem Austritt aus dem Kraftfeld (bei $t_0 = 0$ s). 36
- 2.5 Darstellung von fünf einzelnen Geschwindigkeitsprofilen (oben, Geschwindigkeit in mm/s, Zeit in s) und des aus der Mittelung von 263 Einzelbewegungen erhaltenen Geschwindigkeitsprofils (unten). Alle Profile gehören zu Kraftfeldern mit einer räumlichen Ausdehnung von 50 mm und einer Stärke von 2 N. Der Zeitpunkt $t_0 = 0$ s markiert den Austritt aus dem Kraftfeld. 37

- 2.6 Darstellung der gemittelten Geschwindigkeitsdaten (Geschwindigkeit in mm/s, Zeit in s) eines Testexperimentes mit Federwaagen. Oben sind die Ergebnisse für zwei Federwaagen mit einer Federkonstante von 60 N/m dargestellt, unten die für zwei steiferen Federwaagen mit einer Federkonstante von 100 N/m. Die Rauten markieren die Maxima der Geschwindigkeit der je 100 Testdurchläufe. 39
- 2.7 Draufsicht der Positionsdaten aller Bewegungen einer Versuchsperson zu 10 verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. 41
- 2.8 Draufsicht auf die Trajektorien einer Faktorstufenkombination, beispielhaft dargestellt anhand der Daten dreier Versuchspersonen. Positionsangaben in mm. 42
- 2.9 Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N), Tiefe des Kraftfeldes (40, 50 und 60 mm) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Tiefe der Kraftfelder innerhalb eines Blockes). 43
- 2.10 Radiale Distanz zum Maximum des Azimuths. Darstellung des Interaktionseffektes zwischen den Faktoren Vorhersagbarkeit_{Kraftfeld} und Tiefe_{Kraftfeld} ($F(2, 22) = 4.7, p < 0.05$). 47
- 2.11 Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfeldtiefen, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfeldtiefen. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet. 50
- 3.1 Draufsicht der Positionsdaten aller Bewegungen einer Versuchsperson zu 10 verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. 54
- 3.2 Draufsicht auf die Trajektorien einer Faktorstufenkombination, beispielhaft dargestellt anhand der Daten dreier Versuchspersonen. Positionsangaben in mm. 55
- 3.3 Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Stärke des Kraftfeldes (1, 2 und 4 N) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Stärke der Kraftfelder innerhalb eines Blockes). 56

-
- 3.4 Fisher-Z-Werte der Korrelationen zwischen den radialen Distanzen 10 ms vor und 200 ms nach Austritt aus dem Kraftfeld. Ein Fisher-Z-Wert von 1.0 (0.6, 0.4) entspricht dabei einer Korrelation von $r = 0.76$ (0.54, 0.38). 58
- 3.5 Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfeldstärken, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfeldstärken. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet. 60
- 4.1 Draufsicht der Positionsdaten der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° und 180° zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. Zu erkennen sind (a) die Rückbewegung, (b) die Erhöhung der Variabilität der Bewegungen über die Zeit und (c) die höhere Variabilität der Bewegungen nach Kraftfeldern, die aus seitlichen Richtungen (0° und 180°) kamen. 68
- 4.2 Draufsicht auf die mittleren Trajektorien der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° und 180° , Positionsdaten in mm. 69
- 4.3 Radiale Distanz nach 200 ms für alle Faktorstufen: Richtung des Kraftfeldes (180 , 135 , 90 , 45 und 0°), Dauer des Kraftfeldes (200, 500 und 800 ms) und Vorhersagbarkeit des Kraftfeldes (variable versus konstante Dauer der Kraftfelder innerhalb eines Blockes). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an. 71
- 4.4 Darstellung des Lernverlaufes innerhalb der Blöcke. Rot mit ausgefüllten Kreisen dargestellt sind die Blöcke mit konstanten Kraftfelddauern, blau mit offenen Kreisen die Blöcke mit variablen Kraftfelddauern. Die Kurvenanpassungen sind in schwarz eingezeichnet. 74

-
- 5.1 Draufsicht der Positionsdaten der Bewegungen einer Versuchsperson mit der linken Hand nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° , 180° und -90° zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Die Positionsdaten (in mm) wurden bezüglich des Austrittspunktes aus dem Kraftfeld (rot dargestellt) relativiert. Zu erkennen sind (a) die Rückbewegung, (b) die Erhöhung der Variabilität der Bewegungen über die Zeit, (c) die höhere Variabilität der Bewegungen nach Kraftfeldern, die aus seitlichen Richtungen (0° und 180°) kamen und (d) die Auswirkungen der Asymmetrie der Hand beziehungsweise der Handhaltung 81
- 5.2 Draufsicht auf die mittleren Trajektorien der Bewegungen einer Versuchsperson nach Kraftfeldern aus Richtung 0° , 90° , 180° und -90° , Positionsdaten in mm. Links die Daten für die linke Hand, rechts die Daten für die rechte Hand. 82
- 5.3 Radiale Distanz nach 200 ms für die Faktorstufen Richtung des Kraftfeldes (180 , 90 und 0°) und Aufgabenvariante (linke Hand, rechte Hand, rechte Hand unter maximaler Kokontraktion). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an. 83
- 5.4 Radiale Distanz nach 200 ms für die Faktorstufen Richtung des Kraftfeldes (180 , 90 und 0°), Aufgabenvariante (linke Hand, rechte Hand) und Sequenz (linke Hand zuerst, rechte Hand zuerst). Vertikale Linien zeigen die 95%-Konfidenzintervalle an. Deutlich sichtbar ist der asymmetrische Transfer zwischen der rechten und linken Hand. 89