Koartikulation bei menschlichen Armbewegungen

Coarticulation in human arm movements

Dissertation zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
der Fakultät für Biologie und Biotechnologie
der Ruhr-Universität Bochum

Internationale Graduiertenschule Biowissenschaften
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Neuroinformatik

vorgelegt von

Eva Hansen

aus

Würzburg

Bochum

Juni 2017

Referent: Prof. Dr. Gregor Schöner, Ruhr-Universität Bochum

Korreferent: Prof. Dr. Klaus Funke, Ruhr-Universität Bochum

Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe verfasst, andere als die in ihr angegebene Literatur nicht benutzt und dass ich alle ganz oder annähernd übernommenen Textstellen sowie verwendete Grafiken und Tabellen kenntlich gemacht habe. Weiterhin erkläre ich, dass digitale Abbildungen nur die originalen Daten enthalten oder eine eindeutige Dokumentation von Art und Umfang der inhaltsverändernden Bildbearbeitung vorliegt. Außerdem versichere ich, dass es sich bei der von mir vorgelegten Dissertation (elektronische und gedruckte Version) um völlig übereinstimmende Exemplare handelt und die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form noch nicht anderweitig als Promotionsleistung vorgelegt und bewertet wurde.

Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet.

Die Dissertation wurde gemäß der Promotionsordnung und der Betreuungsvereinbarung angefertigt.

Bochum, den

_____

Eva Hansen

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und nicht zuletzt bei meinen Arbeitskollegen für die fachliche und persönliche Unterstützung beim Zustandekommen meiner Arbeit bedanken. Ihr ward mir eine große Hilfe.

Bei Prof. Dr. Gregor Schöner möchte ich mich nicht nur dafür bedanken, dass er es mir ermöglicht hat meine Arbeit über dieses spannende Thema zu schreiben, sondern auch vor allem dafür, dass er mir einerseits die Möglichkeit gegeben hat selbständig viele Dinge zu meiner Arbeit auszuprobieren, aber auch andererseits immer an meinen Ergebnissen interessiert war und daran, wie man noch mehr aus den Versuchen herausholen konnte. Vielen Dank für die hervorragenden gemeinsamen Diskussionen.

Prof. Dr. Klaus Funke möchte ich für die Übernahme der Zweitbegutachtung danken. Ich fand es sehr hilfreich, dass Sie mir immer die Möglichkeit gegeben haben mit Ihnen über meine Arbeit zu sprechen und Ihnen meine Ergebnisse zu präsentieren.

Liebe Arbeitskollegen, ihr seit wirklich ein wundervolles Team und mit eurem motivierenden und guten Arbeitsklima, den vielen fachliche Diskussionen und den erholsamen und lustigen Pausen habt ihr sicher viel zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Dr. Hendrik Reimann danke ich dafür, dass er mit kompetenten und spannenden Ideen meine Arbeit immer und sehr schnell unterstützte. Dr. Britta Grimme danke ich für das tolle und freundschaftliche Zusammenarbeiten im Bewegungslabor. Vielen Dank, dass du mich in die Bewegungsanalyse eingeführt hast und mir immer tatkräftig und voller Motivation zur Seite standest.

Meiner Familie möchte ich für die Geduld und die wundervolle Unterstützung danken. Ihr habt mich in meiner Arbeit immer motiviert.

Vielen Dank auch an all meine Probanden. Es hat Spaß gemacht und war sehr abwechslungsreich mit euch zusammenzuarbeiten.

Veröffentlichungen

Verschiedene Beobachtungen oder Ergebnisse, welche in dieser Dissertation beschrieben sind, sind bereits vorab in Zeitschriften oder auf Konferenzen veröffentlicht worden. Diese werden durch die Dissertation in einen größeren Kontext eingeordnet, erweitert und präzisiert.

Aus Experiment 1, 2a, 2b und 2c wurden bereits Beobachtungen und Ergebnisse vorab beschrieben. Die Veröffentlichungen sind im Folgenden gelistet. Ergebnisse aus den Experimenten 3a, 3b und 4 wurden bisher nicht veröffentlicht.

- In Submission: Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2017) Carry-over coarticulation is motor equivalent, but anticipatory coarticulation is not. Experimental Brain Research
- Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2015) Carry-over coarticulation in joint angles. Experimental Brain Research 233(9):2555–2569
- Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2015) Anticipatory and carry-over coarticulation in experiments with two sequential sub-movements. Progress in Motor Control X, Budapest, Hungary
- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2014) Coarticulation in sequential human arm movements. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, Göttingen, Germany
- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2014) Anticipatory and carry-over coarticulation in sequential human arm movements. In: Neuroscience Annual Meeting, Society for Neuroscience, Washington, DC, USA
- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2013) Direction-dependent carry-over coarticulation in joint angles. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, Tübingen, Germany
- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2013) Direction-dependent carry-over coarticulation in joint angles. Progress in Motor Control IX, Montreal, Canada
- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2012) Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. In: Neuroscience Annual Meeting, Society for Neuroscience, New Orleans, USA

- Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2012) Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, München, Germany

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen **ix**

1 Einleitung **1**

1.1 Natürliche Bewegung und Redundanz 2
1.2 Bewegungssequenzen, Koartikulation und motorische Äquivalenz 5
1.3 Planung, Regelung und Ausführung von Bewegungssequenzen 9
1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit 11

2 Methoden **15**

2.1 Datenerfassung 15
2.2 Das Prinzip von antizipatorischer und carry-over Koartikulation 16
2.3 Referenzkonfiguration für alle Marker bzw. Winkel 19
2.4 Berechnung der Gelenkwinkel 19
2.4.1 Transformation zu Sternum-Koordinaten 21
2.4.2 Berechnung der Rotationszentren bzw. Rotationsachsen 21
2.4.3 Berechnung der Winkel zwischen den starren Körpern und Optimierung der Gelenkwinkel 22
2.5 Ungeregelte Mannigfaltigkeit (UCM) 23
2.6 Motorische Äquivalenz (MEQ) 27
2.7 Statistische Vorgehensweise 28
2.8 Allgemeiner Versuchsaufbau 29

3 Ergebnisse **32**

3.1 Experiment 1 32
3.1.1 Versuchsaufbau 32
3.1.2 Kinematische Analyse der Bewegungen 34
3.1.3 Varianzanalyse der Uncontrolled manifold (UCM) 34
3.1.4 Endeffektortrajektorien 35
3.1.5 Gelenkwinkeltrajektorien 37
3.1.6 MEQ Analyse zur Koartikulationsdetektion 40
3.1.7 Untersuchung des Bias innerhalb der MEQ Analyse 43
3.1.8 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz 48
3.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 1 50

3.2 Experiment 2a, 2b und 2c 52
3.2.1 Versuchsaufbau 52
3.2.2 Kinematische Analyse der Bewegungen - Experiment 2a, 2b und 2c 55
3.2.3 Varianzanalyse der ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) - Experiment 2a 56
3.2.4 Endeffektor Trajektorien - Experiment 2a 58
3.2.5 Gelenkwinkeltrajektorien 59
3.2.6 Motorische Äquivalenz zur Koartikulationsdetektion 60
3.2.7 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz - Experiment 2a 63
3.2.8 Ergebnisse zu Experiment 2b 64
3.2.9 MEQ Analyse von Experiment 2c 68
3.2.10 Endeffektorposition am Zentrum - Experiment 2c 69
3.2.11 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 2a, 2b und 2c . 71
3.3 Experiment 3a und 3b 72
3.3.1 Versuchsaufbau 73
3.3.2 Kinematische Analyse der Bewegungen - Experiment 3a und 3b . 74
3.3.3 Varianzanalyse der ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) - Experiment 3a 75
3.3.4 MEQ zur Koartikulationsdetektion - Experiment 3a 75
3.3.5 Vergleich der MEQ Ergebnisse von Experiment 2a und 3a 77
3.3.6 MEQ Analyse von Experiment 3b 78
3.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 3a, 3b 80
3.4 Experiment 4 81
3.4.1 Versuchsaufbau - Experiment 4 82
3.4.2 Allgemeine Analyse der Bewegungen - Experiment 4 85
3.4.3 MEQ Analyse von Experiment 4 85
3.4.4 Vergleich von antizipatorischer und carry-over Koartikulation bei Experiment 4 und Experiment 2a 87
3.4.5 Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation bei Experiment 4 89
3.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 4 89

4 Diskussion **91**
4.1 Genauigkeit 92
4.2 Geschwindigkeit 94
4.3 Ungeregelte Mannigfaltigkeit - UCM 95
4.4 Endeffektor- und Gelenkwinkeltrajektorien 97

4.5 Analyse von Koartikulation durch die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ) 97
4.6 Auftreten von antizipatorischer und carry-over Koartikulation 100
4.6.1 Bewegungsplanung und antizipatorische Koartikulation 100
4.6.2 Bewegungsregelung, -planung und carry-over Koartikulation . . . 104
4.6.3 Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation 109
4.7 Das Zwischenziel - Zielposition *C* 109
4.8 Training, Lernen und Erschöpfung 110

5 Schlussfolgerung **115**

Zusammenfassung **117**

Summary **121**

Anhang **125**

Literaturverzeichnis **128**

Eigene Publikationen **135**

Lebenslauf **137**

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

Kürzel	vollständige Bezeichnung
BS	Bewegungssegment
Diff	Differenz
DoF	Freiheitsgrad (degree of freedom)
GWK	Gelenkwinkelkonfiguration
MEQ	Motorische Äquivalenz (motor equivalence)
ORT	Orthogonal zur ungeregelten Mannigfaltigkeit
UCM	Ungeregelte Mannigfaltigkeit (uncontrolled manifold) / parallel zur ungeregelten Mannigfaltigkeit
3D	UCM-Hypothese: Die dreidimensionale Position des Endeffektors ist für die Bewegung aufgabenrelevant
3D+Ori2	UCM-Hypothese: Die dreidimensionale Position des Endeffektors plus die für den Zylinder/Endeffektor relevante zweidimensionale Orientierung ist für die Bewegung aufgabenrelevant

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung
b	Anzahl der Bedingungen eines Experimentes
C	Zentrale Position in Experiment 1-3
C_1, C_2	Zentrale Positionen in Experiment 4
d	Anzahl der Freiheitsgrade
D	Verteilungskurve (Differenz aus zwei Bedingungen)
E	Projektionsmatrix
J	Jakobimatrix
MEQ	Normierter Differenzvektor der motorische Äquivalenz [rad/DoF]
n	Anzahl aller Freiheitsgrade
N	Anzahl der Wiederholungen
p	Dreidimensionale Endeffektorposition
$pMEQ$	Prozentuale motorische Äquivalenz [%]
V	Varianz [rad^2/DoF]

Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung
ϵ_i	Basisvektoren
γ	Winkel zwischen linearisierten Unterräumen der ungeregelten Mannigfaltigkeit
μ	Mittelwert
Θ	Gelenkwinkelkonfiguration
Θ_X	Gelenkwinkel X
$\overline{\theta}$	Gemittelte Gelenkwinkelkonfiguration
$\overline{\theta}^{(X)}$	Gemittelte Gelenkwinkelkonfiguration der Bedingung X

Indizes

Symbol	Beschreibung
$\|\|$	Parallel zur UCM, betrifft Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen
$\perp$	Orthogonal zur UCM, betrifft Gelenkwinkelkonfigurationen, durch welche der Endeffektor variiert wird
0	Referenz

1 Einleitung

Für die meisten von uns ist Bewegung eine der natürlichsten Sachen der Welt. Wir ziehen die Hand weg, wenn wir einen heißen Gegenstand berühren, wir nehmen das Glas Wasser vom Tisch und führen es mit der Hand zum Mund oder bewegen beim Sprechen die Lippen mit hoher Geschwindigkeit. All diese täglichen Bewegungen machen wir mit einer Leichtigkeit und ohne groß darüber nachzudenken. Dabei sind solche Bewegung gar nicht so leicht und einfach wie es dem Beobachter auf den ersten Blick erscheinen mag. Dies zeigt sich auch anhand der vielen Fehlversuche und großen Bemühungen einen Roboter mit menschenähnlichen Bewegungen und Verhalten zu konstruieren. Bisher ist es noch nicht gelungen auch nur annähernd die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von menschlichen Bewegungen nachzuahmen (Schaal, 2002). Doch was kennzeichnet natürliche menschliche Bewegungen und was macht ihre Komplexität aus?

In dieser Arbeit habe ich mich auf die Untersuchung von menschlichen Armbewegungen beschränkt. Viele Studien versuchen die grundlegenden Eigenschaften dieser Bewegungen zu ermitteln. Typische Eigenschaften lassen sich im Bewegungspfad, im Geschwindigkeitsprofil, in der Bewegungsdauer oder im Verhältnis von Geschwindigkeit und Form der Endeffektor-Bewegung feststellen. Als Endeffektor wird hierbei das letzte Glied einer kinematischen Kette (beschrieben durch den Arm) bezeichnet, dessen Position zielbezeichnend ist. Wird ein Objekt mit der Hand von einem Punkt zum nächsten bewegt, so wird das Objekt als Endeffektor bezeichnet. Bei Zeigebewegungen dagegen ist der Endeffektor in den meisten Fällen der Zeigefinger. Bewegt der Mensch ein Objekt von einer Position zur nächsten, so ist die Bewegung des Objektes meist geradlinig oder nur leicht gekrümmt (Abend et al, 1982). Auch werden, unter ähnlichen Voraussetzungen, willkürliche Bewegungen der Hand von einem Punkt zum nächsten in ähnlicher Zeit zurückgelegt, und das unabhängig von der Distanz zwischen den beiden Punkten (Isochronie-Prinzip, Fitts, 1954; Viviani und McCollum, 1983). Das Geschwindigkeitsprofil hat hierbei meist eine glockenförmige und recht symmetrische Form (Morasso, 1981; Soechting und Lacquaniti, 1981; Lacquaniti et al, 1983). Wird eine gebogene Endeffektortrajektorie beschrieben, so lässt sich in vielen Fällen ein klarer Zusammenhang zwischen der Krümmung des Endeffektorpfades und der aktuellen Geschwindigkeit („2/3 power law“, Lacquaniti et al, 1983) aufstellen.

All diese Eigenschaften schaffen es jedoch nicht eine menschliche Bewegung exakt zu beschreiben. Es treten hierbei nicht nur Variationen im Endeffektorpfad auf. Der mensch-

liche Arm und der gesamte menschliche Körper stellen ein redundantes System dar. Hierdurch ist es möglich ein und dieselbe Bewegung im Endeffektorraum durch verschiedenste Gelenkwinkelkonfigurationen zu beschreiben. Die Begründung für verschiedenste Gelenkwinkelkonfigurationen trotz gleicher Aufgabenstellung kann vielfältig sein. Wichtig ist es dabei eine Bewegung nicht isoliert zu betrachten. Jede Bewegung steht in einem bestimmten Kontext. Der Kontext kann zum Beispiel durch eine erst nachfolgende Aufgabe bestimmt sein. So verändert sich die Bewegungszeit zu einem Objekt in Abhängigkeit davon, ob man das Objekt danach wegwirft oder in eine enge oder in eine weite Nische stellt (Marteniuk et al, 1987; Ansuini et al, 2006). Zusätzlich hat auch die Zerbrechlichkeit des Objektes einen Einfluss auf die Bewegungszeit zum Objekt (Marteniuk et al, 1987). Ansuini et al (2008) zeigen außerdem, dass neben der Bewegungszeit zum Objekt auch die Art der Greifbewegung (unterschiedliche Fingergelenkskonfigurationen) durch die nachfolgende Handlung beeinflusst wird. Eine Wasserflasche wurde hier gegriffen und festgehalten, hochgehoben und in einen Pappkarton geworfen, neu platziert, an eine weitere Person übergeben, oder das Wasser darin wurde umgefüllt.

Weniger abstrakt als eine nachfolgende Aufgabe, aber nichtsdestotrotz kaum weniger komplex ist die Tatsache, dass eine natürliche Bewegung meist von weiteren Bewegungen flankiert wird. Man hat es meist mit einer Sequenz von Bewegungen zu tun. Woher eine Bewegung kommt und wohin eine Bewegung führt, kann die aktuelle Bewegung beeinflussen. Dieses Phänomen nennt man Koartikulation. Planung und Regelung einer Bewegung spielen hierbei eine große Rolle. Im Folgenden werden nun Redundanz und Koartikulation bei Bewegungssequenzen, wichtige Eigenschaften natürlicher Bewegungen, genauer beschrieben. Eine Untersuchung dieser Eigenschaften in meiner Studie soll helfen die Planung und Ausführung natürlicher Bewegungen besser zu verstehen.

1.1 Natürliche Bewegung und Redundanz

Wird eine Bewegung wieder und wieder durchgeführt, so fällt auf, dass sich die Wiederholungen zwar ähneln, aber keine dieser Bewegungen identisch sind. Der menschliche Bewegungsapparat ist ein redundantes System. Er besitzt also mehr Freiheitsgrade (DoF, degree of freedom) als für das Erreichen einer Aufgabe unbedingt nötig sind. Freiheitsgrade bezeichnen hier die unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten eines Systems. Zum Beispiel hat der menschliche Arm inklusive Schulter auf Gelenkwinkelebene zehn Freiheitsgrade. Soll ein Objekt (Endeffektor) translatorisch im dreidimensionalen Raum bewegt werden, sind lediglich drei Freiheitsgrade nötig. Es sind also sieben zusätzliche

Freiheitsgrade vorhanden. Spielt die Orientierung des Objektes eine Rolle, reduziert sich zwar die Anzahl der zusätzlichen Freiheitsgrade. In jedem Fall bleibt aber eine sehr hohe Anzahl an Bewegungsmöglichkeiten. Zusätzlich kann man die hier beschriebene Redundanz auf Gelenkwinkelebene auch auf die Ebene der Muskeln oder sogar auf die Ebene der einzelnen Muskeleinheiten ausweiten (Schaal, 2002). Dies würde die ohnehin schon hohe Anzahl an Bewegungsmöglichkeiten bis ins Unvorstellbare ausdehnen.

Aber wie wählt das Nervensystem aus diesen scheinbar unzähligen Möglichkeiten die tatsächliche Bewegung aus? Als einer der ersten beschrieb der Physiologe und Biomechaniker Nikolai Alexandrowitsch Bernstein diesen Sachverhalt (Bernstein, 1967). Dieses Problem der Redundanz wird daher auch häufig als das Bernstein-Problem bezeichnet. Verschiedenste Lösungsmöglichkeiten wurden bereits publiziert. Sie lassen sich im Wesentlichen in drei Gruppen unterteilen (Latash et al, 2007): Reduzierung der Freiheitsgrade, Optimierung der Bewegung durch Minimierung der Kosten und Ausführung der Bewegung mit Hilfe von Synergien.

Die wohl einfachste Lösung des Bernstein-Problems ist eine Reduzierung der Freiheitsgrade. Ein Beispiel hierzu ist unter dem Namen *Donders Gesetz* bekannt. Drei Freiheitsgrade (horizontal, vertikal, torsional) beschreiben die Bewegung des Auges. Donders (1847) zeigt in dem nach ihm benannten Gesetz, dass die Orientierung/Stellung des Auges für eine bestimmte Blickrichtung (Endeffektor) gleich ist. Unter bestimmten Bedingungen kann das Gesetz jedoch auch verletzt werden, wie beim Vestibulookulären Reflex (Crawford und Vilis, 1991). Bei plötzlichen Kopfbewegungen ermöglicht dieser Reflex die visuelle Wahrnehmung durch ausgleichende Augenbewegungen stabil zu halten. Eine Übertragung von Donders Gesetz auf andere Bewegungen ist nicht ohne weiteres möglich. In Experimenten von Gielen et al (1997) und Soechting et al (1995) wird die Verletzung des Gesetzes bei redundanten Armbewegungen beschrieben. Die Gelenkwinkelstellung des Armes wird nicht allein durch die Endeffektorposition bestimmt.

Anstatt die Freiheitsgrade einfach zu reduzieren, kann die Redundanz des Systems auch genutzt werden. Zum Beispiel, um aus den vorhandenen Möglichkeiten die für die jeweilige Aufgabe optimale Bewegung auszuwählen. Es wurden bereits viele Hypothesen zu den vom zentralen Nervensystem verwendeten Optimierungskriterien aufgestellt. Eine möglichst glatte Endeffektortrajektorie (Minimierung von Beschleunigungen, Flash und Hogan, 1985), die Minimierung der Drehmomentänderung in den Gelenken (Uno et al, 1989), die Minimierung des benötigten Kraftaufwandes (Hasan, 1986) oder eine möglichst komfortable (mittige) Gelenkwinkelhaltung am Bewegungsende (*end-state-comfort*, Rosenbaum et al, 1996) sind nur wenige der bereits untersuchten Kriterien.

Thier (2006) berichtet sogar, dass eine Minimierung der neuronalen Aktivität als Optimierungskriterium erwogen wurde. Trotz aller Bemühungen kann jedoch bisher keines der vorgeschlagenen Optimierungsmodelle eine dreidimensionale Bewegung in all ihren Eigenschaften hinreichend beschreiben (Hermens und Gielen, 2004).

Eine weitere Möglichkeit die vielen Freiheitsgrade zu beherrschen ist die Annahme von Synergien. Es wird postuliert, dass Bewegung durch die Aktivierung von Muskelsynergien geregelt wird. Eine Synergie wird hier als das Zusammenwirken von Muskeln verstanden. Das zentrale Nervensystem muss also nicht jeden Muskel einzeln ansteuern, sondern ruft die Bewegung über eine Kombination von Muskelsynergien ab (Bernstein, 1967). Das Prinzip der Synergien muss jedoch nicht nur auf Muskeln beschränkt sein. Es kann ebenso angenommen werden, dass zum Beispiel Neuronen oder Gelenke zu funktionellen Einheiten verbunden werden. Eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden könnte somit auf unterschiedlichen Ebenen beherrscht und geregelt werden (Kelso, 2009).

Um die Generierung von Bewegungen besser zu verstehen, wurden Bewegungen meist auf ihre unveränderlichen Eigenschaften hin untersucht. Neben offensichtlichen Trajektorieneigenschaften und Gelenkwinkelstellungen gibt uns die Varianz innerhalb einer Bewegung ebenfalls interessante Hinweise darauf, welche Bewegungskriterien im Fokus des Zentralen Nervensystems stehen könnten. Die Hypothese der Ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) wurde von Schöner (1995) entwickelt und betont ebenfalls den Nutzen zusätzlicher Freiheitsgrade. Es wird angenommen, dass die Redundanz des Bewegungsapparates genutzt wird, um stabil und flexibel auf Störungen reagieren zu können. Die Hypothese besagt, dass nur solche Gelenkwinkelkonfigurationen geregelt werden, welche für die Aufgaben relevant sind. Beschreibt man mit seiner Fingerspitze (Endeffektor) einen Kreis, so ist die dreidimensionale Position der Fingerspitze relevant. Sind dagegen Gelenkwinkelkonfigurationen von einer Störung betroffen, welche keinen Einfluss auf die Bewegungsaufgabe haben, werden diese nicht eingeschränkt. Die Menge der Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Position des Endeffektors invariant lassen, werden hier als Mannigfaltigkeit bezeichnet. Da die redundanten Bewegungen auf Ebene des Endeffektors und auf Ebene der Gelenkwinkel wegen ihrer unterschiedlichen Dimensionalität nicht direkt miteinander verglichen werden können, wurde die Methode der Ungeregelten Mannigfaltigkeit entwickelt. Die Methode beruht auf einer Analyse der Varianz. Überschreitet die Varianz der Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabe nicht betreffen, die Varianz der Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabe betreffen, so kann man annehmen, dass erstere vom Nervensystem weniger geregelt werden. Dieser Unterschied beider Varianzen konnte inzwischen schon in den unterschiedlichsten Experimenten ge-

zeigt werden, wie beim Aufstehen (Scholz und Schöner, 1999), Aufstehen und Hinsetzen (Reisman et al, 2002), Zeigebewegungen (Tseng et al, 2002, 2003), Pistolenschießen (Scholz et al, 2000), Aufgaben mit beiden Händen (Domkin et al, 2002) oder Aufgaben, bei denen allein die Summe der Kräfte, die von mehreren Fingern ausgeübt wurde, ausschlaggebend war (Scholz et al, 2002).

1.2 Bewegungssequenzen, Koartikulation und motorische Äquivalenz

Setzt man sich morgens in ein Cafe und beobachtet die Bewegungen der anderen Cafebesucher beim Frühstück, so fällt auf, dass die meisten Bewegungen eine Folge gleicher und unterschiedlicher Einzelbewegungen sind: Die Hand wird zum Marmeladenglas geführt und dieses wird neben den Teller gestellt und dann aufgeschraubt. Der Brotkorb wird dem Tischnachbarn hingereicht und daraufhin wieder zurückgestellt. Der Löffel wird immer wieder von der Müslischüssel zum Mund geführt und zurück. Viele wissenschaftliche Studien beschäftigen sich dagegen mit Einzelbewegungen. Oft sind außerdem die Bewegungsräume oder die Bewegungsmöglichkeiten der Probanden eingeschränkt. Zum Beispiel untersuchte Morasso (1981) zweidimensionale Armbewegungen, um anhand von Zeitkurven des Endeffektors und der Gelenkwinkel Rückschlüsse auf die Art motorischer Befehle (Gelenkwinkel oder Endeffektortrajektorien) zu ziehen. Mit Hilfe eines Manipulandums waren Änderungen in zwei Gelenkwinkelrichtungen möglich und konnten aufgezeichnet werden. Es handelt sich hierbei also um ein nicht redundantes System. Bestimmte Eigenschaften von Bewegungen können jedoch durch zu starke Einschränkungen gar nicht erst beobachtet werden.

Eine weitere Schwierigkeit ist es überhaupt Anfang und Ende einer Bewegungssequenz zu erkennen. Die Bewegung einer Hand zur Kaffeetasse, kann als Gesamtheit gesehen werden. Betrachtet man allerdings die gesamte Szenerie, so wird klar, dass die Bewegung dort noch nicht endet, sondern, dass die Hand zusammen mit der Kaffeetasse daraufhin weiter zum Mund bewegt wird (Aivar et al, 2005). Die Intention die Kaffeetasse zum Mund zu führen, könnte bereits die Bewegung zur Tasse beeinflussen. Die Bewegung zum Mund könnte aber andererseits sogar davon beeinflusst sein, ob die Hand auf dem Weg zur Tasse dem Marmeladenglas ausweichen musste oder nicht. Eine solche Beeinflussung kann als Koartikulation bezeichnet werden.

Ganz allgemein beschreibt Koartikulation den Einfluss des Bewegungskontextes auf die Bewegung. Der Einfluss eines vorangehenden Bewegungssegmentes auf die nachfolgende Bewegung wird als carry-over Koartikulation bezeichnet. Den Einfluss des nachfolgenden Bewegungssegmentes auf vorangehende Segmente dagegen nennt man antizipatorische Koartikulation. In den Experimenten dieser Studie lässt sich eine Bewegung durch die vom Endeffektor nacheinander angesteuerten räumlichen Ziele in zeitlich aufeinander folgende Bewegungssegmente untergliedern.

Koartikulation ist vor allem aus der Sprache bekannt. Sprachproduktion ist nicht nur unheimlich schnell, sondern kann auch flexibel auf verschiedene Kontexte (laut, ironisch, ärgerlich oder mit Essen im Mund) angepasst werden (Schöner et al, 2008). Ein leicht erkennbares Beispiel ist hierzu das antizipatorische Runden der Lippen. Spricht man zum Beispiel das Wort *tulip* aus, so runden sich die Lippen für den Vokal *u* bereits bevor der Buchstabe *t* gesprochen wird, folgt dem Buchstaben *t* dagegen ein anderer Vokal, so kommt es nicht zu einer solchen Lippenrundung (Daniloff und Moll, 1968). Über Koartikulation bei Bewegung menschlicher Körperteile ist dagegen deutlich weniger bekannt (Grimme et al, 2011).

Ähnlich wie bei gesprochener Sprache findet sich aber auch in unserer Zeichensprache antizipatorische und carry-over Koartikulation (Jerde et al, 2003). Jerde et al (2003) untersuchten die auftretende Koartikulation im Hinblick auf Assimilation und Dissimulation. Bei Assimilation werden die Unterschiede zwischen benachbarten Sequenzen reduziert, was vor allem beim Handgelenk und Daumen auftritt. Bei Dissimulation dagegen werden die Unterschiede betont. Dies konnte bei den proximalen Interphalangealgelenken von Zeige- und Mittelfinger gezeigt werden. Diese Betonung der Unterschiede ist nachvollziehbar, da beide Finger eine tragende Rolle beim Verständnis der Fingerzeichen spielen. Assimilation und Dissimilation treten bei Zeichensprache sogar simultan auf. Ein weiteres Beispiel für antizipatorische Koartikulation ist das Klavierspielen (Engel et al, 1997). Bei bestimmten Tastenfolgen konnte bis zu 500 ms im Voraus eine antizipatorische Modifikation ermittelt werden. Deutlich weniger ausgeprägt erscheint antizipatorische Koartikulation dagegen beim Maschinenschreiben. Hier konnten nur in wenigen Fälle antizipatorische Modifikationen von maximal 20 ms im Voraus (Soechting und Flanders, 1992) gemessen werden. Klein Breteler et al (2003) untersuchten ebenfalls nur antizipatorische Koartikulation bei dreidimensionalen Punkt-zu-Punkt-Bewegungen aus ein, zwei und mehreren Bewegungssegmenten mit einem Stift. Hierfür wurde jeweils ein Marker an der Stiftspitze, der Schulter, am Ellenbogen, am Handgelenk und zwei weitere Marker zur Bestimmung der Rotation am Handgelenk herangezogen. Die Bewegungen

erfolgten mit hoher Geschwindigkeit. Bei Bewegungen aus zwei Bewegungssegmenten konnten keine signifikanten Unterschiede im Endeffektorpfad gefunden werden. Der in der Studie als Annäherungswinkel bezeichnete Winkel aus den letzten vier gemessenen Endeffektorpunkten und der horizontalen Ebene zeigte für die Hälfte der Tests signifikante Unterschiede. Die Haltung des Armes, welche über wenige Marker beschrieben wurde, dagegen ließ häufiger antizipatorische Koartikulation erkennen. Desweiteren wurden noch Bewegungen mit drei Zielpunkten durchgeführt, die fünfmal hintereinander ohne Pause angesteuert wurden. Der erste Zielpunkt wurde kontinuierlich während der Bewegung angezeigt, die anderen Punkte mussten die Probanden aus dem Gedächtnis ansteuern. Hierbei sammelten sich Änderungen in der Armhaltung im Verlauf der Wiederholungen an. Auch Unterschiede im Endeffektorpfad und im Annährungswinkel wurden festgestellt. Insgesamt wurde festgestellt, dass nicht alle Probanden die gleichen antizipatorischen Modifikationen zeigten, auf carry-over Koartikulation wurde in der Studie nicht eingegangen. In der von van der Wel et al (2007) durchgeführten Studie wurde sowohl antizipatorische als auch carry-over Koartikulation untersucht, dies geschah jedoch nur auf Ebene des Endeffektors. Der Proband setzte hier ein Objekt immer von einem Punkt zum nächsten und es wurde die vertikale Objektbewegung gemessen. Die Bewegungsgeschwindigkeit war durch ein Metronom vorgegeben. Befand sich ein Hindernis zwischen einem Zielpaar, führte dies von Bewegungsbeginn an zu insgesamt höheren vertikalen Objektbewegungen (antizipatoirische Koartikulation). Zusätzlich konnte auch carry-over Koartikulation beschrieben werden: Nach Überwindung eines Hindernisses (hohe vertikale Objektbewegung), waren auch die nachfolgenden vertikalen Objektbewegungen etwas stärker ausgeprägt und sanken langsam auf das Ausgangsniveau zurück.

Ist es noch relativ einfach Koartikulation auf Ebene des Endeffektors zu untersuchen, ist eine systematische Beschreibung von Bewegungen auf Ebene der Gelenkwinkel bei einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden deutlich schwieriger. Eine Anpassung der Methode der Ungeregelten Mannigfaltigkeit, die sogenannte Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ), gibt uns die Möglichkeit Koartikulation systematisch auf beiden Ebenen zu analysieren und diese miteinander zu vergleichen.

Motorische Äquivalenz, wie sie in meiner Arbeit verwendet wird, bezeichnet die Fähigkeit eines redundanten, motorischen Systems das gleiche Ziel auf unterschiedliche Weise zu erreichen. Ein bekanntes Beispiel, das gleichzeitig aber auch aufzeigt wie unterschiedlich motorische Äquivalenz gesehen wird, ist das Schreiben von Buchstaben (Bernstein, 1967; Lashley, 1933). Hier werden Lösungen als motorisch äquivalent bezeichnet, unabhängig davon, ob die Buchstaben mit der Hand und den Fingern auf ein Blatt Papier oder

mit dem ganzen Arm auf eine große Kreidetafel geschrieben werden. Es stimmt, dass sogar viele individuelle Charakteristika der persönlichen Schrift in all diesen Lösungen wiedergefunden werden können. In dem hier engeren Sinn von motorischer Äquivalenz unterscheiden sich die Lösungen jedoch im Bezug auf die Größe oder den verwendeten Endeffektor. Auch werden als motorisches System einerseits im Wesentlichen das Handgelenk und die Finger verwendet, andererseits wird der Arm in seiner Gesamtheit genutzt, während die Finger vor allem zum Festhalten der Kreide gebraucht werden.

Ein auch für die nachfolgenden Experimente passenderes Beispiel für motorisch äquivalente Bewegungen ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Hier ist die Skizze eines Menschen zu sehen, der mit dem rechten Arm ein Objekt an einer bestimmten Position hält. Das motorische System ist in diesem Fall also der Arm und die Aufgabe ist das Halten des Objektes an einer bestimmten Position. Um das Objekt an dieser Position zu halten, sind etliche Gelenkwinkelkonfigurationen möglich, von denen zwei in der Abbildung dargestellt sind. All diese Gelenkwinkelkonfigurationen sind zueinander motorisch äquivalent. Die Methode der UCM vergleicht die Varianz innerhalb einer sich wiederholenden Bewegung. Eine Weiterentwicklung dieser Methode, die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ), dagegen vergleicht verschiedene Bewegungen miteinander und unterscheidet, ob vor allem die Gelenkwinkel oder der Endeffektor von den veränderten Bedingungen betroffen sind. Genauer gesagt unterscheidet die Methode zwischen Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable nicht beeinflussen, und Konfigurationen, welche diese beeinflussen. Die Ergebnisse einer solchen Analyse können uns Einblicke in die Planung, Regelung und Ausführung von Bewegungen geben. Mattos et al (2011) untersuchten mit dieser Methode die Gelenkwinkelkonfigurationen des Armes bei Personen, deren Bewegung durch eine Störung beeinflusst wurde. Während die Personen auf ein Ziel zeigten, war an ihrem Arm ein elastisches Band so befestigt, dass es die Bewegung des Ellenbogens störte. Je nach Versuchsbedingung hatte das Band eine andere Elastizität. Mattos et al (2011) konnten mit dieser Methode nicht nur zeigen, dass motorische Äquivalenz während der gesamten Zeigebewegung auftrat, sondern auch, dass diese mit steigender Störung zunahm. Diese Ergebnisse können zusätzlich ein neuronales Modell untermauern, das bei der Regelung von Bewegung zwischen aufgabenrelevanten und aufgabenirrelevanten Konfigurationen unterscheidet (Martin et al, 2009).

Die Methode der MEQ wird in meinen Experimenten zur Analyse von Koartikulation herangezogen. Anstelle einer tatsächlichen Störung der Bewegung, wie beispielhaft oben beim Versuchsaufbau von Mattos et al (2011) beschrieben, werden innerhalb einer Bewegungssequenz einzelne Bewegungssegmente durch ihre angrenzenden Bewegungsseg-

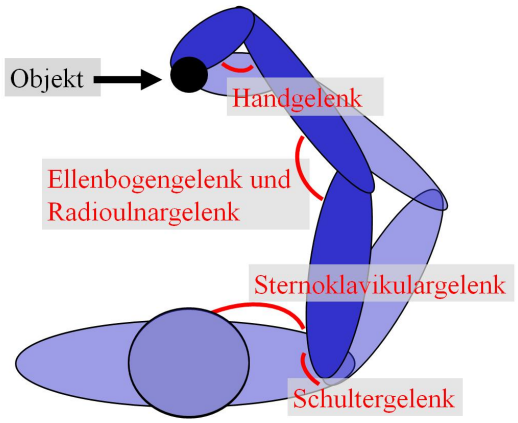

Abbildung 1.1: Darstellung zweier motorisch äquivalenter Gelenkwinkelstellungen des Armes.

mente beeinflusst. Ob und in welcher Weise Koartikulation auftritt kann nun auf Ebene des Endeffektors und auf Ebene der Gelenkwinkel systematisch analysiert werden.

1.3 Planung, Regelung und Ausführung von Bewegungssequenzen

Zeitweise ging man davon aus, dass Sequenzen einfach über das Feedback vorangegangener Bewegungen eingeleitet werden. Inzwischen wurden aber etliche Hinweise gefunden, die dieser Hypothese widersprechen (Brown und Rosenbaum, 2002). Lashley (1951) führte an, dass erlernte Bewegungssequenzen auch ohne sensorisches Feedback ausgeführt werden können. Außerdem konnte gezeigt werden, dass Aspekte zu Beginn einer Bewegung erst durch den späteren Verlauf einer Bewegung begründet werden können. Sternberg et al (1978) untersuchten zum Beispiel die Dauer der Bewegungsinitialisierung von professionellen Maschinenschreiberinnen bei Sequenzen mit bis zu fünf Anschlägen. Die Dauer nahm mit der Länge der erwarteten Bewegungssequenz zu. Dies deutet auf eine Planung der Bewegung vor Bewegungsstart hin. Ein etwas konkreteres Beispiel wird in der Studie von Cohen und Rosenbaum (2004) beschrieben. Hier war die Höhe, an der ein vertikaler Zylinder gegriffen wurde, indirekt proportional zur späteren Endposition des Objektes im Raum. Rosenbaum et al (Rosenbaum et al, 1996) bezeichnete das als „end-state comfort“, d.h. die Haltung zu Ende einer Bewegung ist besonders komfortabel, liegt also meist im mittleren Bereich zwischen den Gelenkgrenzen. Ähnlich ist es auch bei den bereits oben beschriebenen Experimenten von Marteniuk et al (1987) und Ansuini et al (2006), bei denen die Geschwindigkeit zum Objekt abhängig davon ist, was später mit

dem Objekt passiert. Das Objekt wird weggeschmissen oder in eine enge/weite Nische gestellt. Bewegungsplanung muss auch nicht auf einzelne Körperteile beschränkt sein, sondern kann auch den gesamten Körper betreffen (globale Bewegungsplanung), wie es in der Studie von van der Wel und Rosenbaum (2007) zu sehen ist. Probanden mussten hier bis zu vier Schritte zu einem Objekt gehen um dieses zu greifen und umzusetzen. Ob es einen bevorzugten Standfuß gab, war von der jeweiligen Aufgabe (Entfernung und Richtung der neuen Objektposition) abhängig. Es fand hier also nicht nur eine relativ frühe (antizipatorische) Planung statt, sondern auch eine, welche die gesamte Körperhaltung betraf.

Koartikulation in den unterschiedlichsten Bewegungen zeigt, dass die Begründungen hierzu vielfältig sein können. Bei Sprache ist die Verständlichkeit und die Schnelligkeit ein wichtiger Faktor für Koartikulation. Bei anderen Bewegungen könnte auch eine Optimierung des Endeffektorpfades oder der Gelenkwinkelkonfigurationen zugrunde liegen, welche zum Beispiel zu einer möglichst glatten Bewegung ohne großen Kraftaufwand führt (s. *1.1 Natürliche Bewegung und Redundanz*).

In den Experimenten meiner Studie wird nun ein Objekt über verschiedene Ziele transportiert. Die dabei resultierenden Bewegungssegmente können sich gegenseitig beeinflussen. Antizipatorische Koartikulation würde ein Vorausplanen der Bewegung zeigen, welches sich theoretisch auch über mehr als eine Bewegungssequenz erstrecken kann. Anders sieht es dagegen bei carry-over Koartikulation aus. Hier ist Planung möglich, aber nicht zwingend nötig. Allerdings würde ein Auftreten von carry-over Koartikulation eine passive oder aktive Nachverarbeitung (Regelung) der vorangehenden Bewegung oder Gelenkwinkelkonfiguration voraussetzen.

Sosnik et al (2004) gehen in ihren Experimenten zu Koartikulation bei Bewegungssequenzen sogar noch weiter und sehen Koartikulation als Möglichkeit zur Verschmelzung von Bewegungssegmenten. In ihrem Experiment werden im zweidimensionalen Raum möglichst schnelle Punkt-zu-Punkt-Bewegungen durchgeführt und über mehrere Tage hinweg trainiert. Zuerst sind die Endeffektorpfade von Punkt zu Punkt relativ geradlinig. Im Verlauf des Trainings wechselt die Endeffektorbewegung in eine gekrümmte Form. Diese Modifikation führt nicht nur zu einer insgesamt schnelleren Bewegung, sondern auch zu einem veränderten Geschwindigkeitsprofil der Gesamtbewegung. Ändern sich nach Erlernen einer Bewegungssequenz jedoch zu viele Parameter, fällt der Proband wieder in das alte Geschwindigkeitsprofil mit seinen geradlinigen Endeffektorpfaden zurück. Sosnik et al (2004) betonen bei Koartikulation daher nicht die Interaktion mit den Nachbarelementen, sondern würden in Koartikulation gerne den Zusammenschluss von

zwei oder mehr Bewegungseinheiten zu einer einzelnen und neuen Bewegungseinheit sehen.

1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Wie beeinflusst der Kontext einer Bewegung die Bewegung an sich? Dies ist die generelle Fragestellung meiner Arbeit. Genauer gesagt untersuche ich Sequenzen von Punkt-zu-Punkt-Armbewegungen mit unterschiedlichen Zielen und analysiere den Einfluss der einzelnen Bewegungssegmente aufeinander. Wie beeinflussen vorangehende Bewegungssegmente nachfolgende Bewegungssegmente (carry-over Koartikulation) und umgekehrt (antizipatorische Koartikulation)? Jedes Bewegungssegment einer Bewegungssequenz ist somit in den Kontext anderer Bewegungssegmente eingebunden.

Auch in der Literatur existiert die Frage nach dem Einfluss des Kontextes auf die Bewegung oder auf Sequenzen von Bewegungen. Es werden hierzu häufig sehr komplexe Szenarien entworfen, bei denen die unterschiedlichsten Objekte (Einfluss Zerbrechlichkeit) oder Nachfolgeaufgaben (Platzierung von Objekten in Nischen, Umfüllen von Wasserflaschen; Marteniuk et al, 1987; Ansuini et al, 2006) verwendet werden. Es gibt Versuche zu uni- und bimanuellen Bewegungen (Mason, 2007) oder Bewegungen, welche den gesamten Körper mit einbeziehen (van der Wel und Rosenbaum, 2007). In meiner Studie ist es mir dagegen wichtig möglichst alltägliche und natürliche Bewegungen zu untersuchen. Hierdurch könnte es leichter fallen gefundene Prinzipien auf andere Situationen zu projizieren. In meinen Experimenten wird daher immer dasselbe Objekt mit der Hand und dem Arm von einer Position zur nächsten transportiert. Die Länge der einzelnen Bewegungssegmente bleibt hierbei gleich. Was sich zwischen den Experimenten und Bedingungen verändert, sind vor allem die Anzahl und die Positionen der Start- und Zielpunkte.

In dieser Studie wird sowohl antizipatorische als auch carry-over Koartikulation gemeinsam innerhalb eines Experimentes oder mit dem gleichen Experimentaufbau untersucht. Dies ist in der Literatur eher eine Seltenheit. Jerde et al (2003) untersuchten in diesem Zusammenhang die Zeichensprache mit bestimmten Fingergelenkkonfigurationen. Hier ist Verständigung und Schnelligkeit ein übergeordnetes Ziel der Bewegung und muss bei der Interpretation der Ergebnisse mit berücksichtigt werden. Ein weiteres gutes Beispiel ist auch die Studie von van der Wel et al (2007). Hier wird aber lediglich die Bewegung des Endeffektors bei einer Sequenz von Bewegungen mit Hindernisvermeidung für

beide Koartikulationsarten analysiert. In vielen Studien wird jedoch zumeist nur antizipatorische Koartikulation untersucht (Maschinenschreiben, Klavierspielen, Soechting und Flanders, 1992; Engel et al, 1997; Punkt-zu-Punkt-Bewegungen im Raum, Klein Breteler et al, 2003). Man beachte jedoch, dass antizipatorische und carry-over Koartikulation zwei unterschiedliche Koartikulationsarten sind, welche unterschiedliche Voraussetzungen erfüllen müssen. Man kann davon ausgehen, dass bei antizipatorischer Koartikulation die nachfolgende Bewegung vorbereitet wird. Bei carry-over Koartikulation wird neben der Bewegungsplanung, die auch hier nicht ausgeschlossen werden kann, eine vorangehende Bewegung oder Gelenkwinkelkonfiguration nachbereitet. Werden nun beide Koartikulationsarten innerhalb eines Experimentes oder bei ähnlichem Versuchsaufbau direkt miteinander verglichen, so geben etwaige Unterschiede auch eine Möglichkeit Rückschlüsse über Bewegungsplanung, -regelung und -ausführung zu ziehen, welche bei einer einzelnen Betrachtung nicht möglich wären.

Auch wird in der Literatur häufig nur der Endeffektor mit seinen Eigenschaften oder der Endeffektor plus einzlne Punkte am Arm/Körper untersucht (Marteniuk et al, 1987; Klein Breteler et al, 2003; Ansuini et al, 2006; van der Wel et al, 2007). Dies liegt möglicherweise auch an eingeschränkten Aufnahme- und Analysemöglichkeiten in den Laboren. Wir haben mit unserem Bewegungslabor inzwischen sowohl eine gute Hardware und für die Analyse und Ermittlung von Gelenkwinkeln eine gute Software entwickelt, so dass die gesamte Bewegungsausführung des Armes inklusive der einzelnen Armgelenkwinkel sehr genau analysiert werden kann.

Bei den meisten natürlichen Bewegungen, die wir mit unserem Körper im Alltag ausführen, handelt es sich um redundante Bewegungen. Die Methode der UCM und die Methode der Motorischen Äquivalenz (MEQ) sind ein ausgezeichnetes Mittel, um solche Bewegungen genauer zu verstehen. Es kann hier zwischen aufgabenrelevanten Variablen (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren) und nicht-aufgabenrelevanten Variablen (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor unberücksichtigt lassen) unterschieden werden. In der Literatur wurden bisher bereits viele Studien gezeigt, welche bestimmte Bewegungen mit der UCM Methode analysieren (z.B. Scholz und Schöner, 1999; Scholz et al, 2000, 2002; Domkin et al, 2002; Reisman et al, 2002; Tseng et al, 2002, 2003; Yang et al, 2007). Die MEQ Methode dagegen wird bisher deutlich seltener bei der Analyse von Bewegung hinzugezogen (z.B. Scholz et al, 2007; Mattos et al, 2011, 2015). Es wurde, soweit mir bekannt, bisher weder antizipatorische noch carry-over Koartikulation jemals mit dieser Methode genauer untersucht. Auch hilft die Methode der MEQ die anfängliche Fragestellung zum Einfluss

des Kontextes auf die Bewegung präziser zu fassen: Wie beeinflussen sich vorangehende und nachfolgende Bewegungssegmente und in welchem Maß wirkt sich dieser Einfluss auf den Endeffektor (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche diesen variieren) und die Gelenkwinkel (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen) aus?

Mein Ziel ist es demnach möglichst natürliche, redundante aber auch möglichst einfach gehaltene Sequenzen von Armbewegungen zu untersuchen. Hierbei beschreibe ich Bewegungen sowohl im Hinblick auf den Endeffektor, als auch im Hinblick auf die Gelenkwinkel. Die Methode der MEQ verwende ich, um Gelenkwinkelkonfigurationen im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Aufgabenvariable zu beschreiben. Der Aufbau der Experimente ist so gewählt, dass entweder direkt antizipatorische und carry-over Koartikulation gemeinsam innerhalb eines Experimentes untersucht und verglichen werden können; oder der Aufbau des Experimentes gleicht den bisherigen Versuchen, so dass Vergleiche zwischen den verschiedenen Experimenten möglich sind. Bei jedem Versuch sitzt der Proband vor einem Monitor-Tisch, auf dem immer dasselbe Objekt von einer Position zur nächsten transportiert werden soll. Die Abstände zwischen den verschiedenen aufeinander folgenden Zielen sind hierbei immer gleich. Zwischen den Experimenten ändert sich im Wesentlichen und auch nur teilweise die Anzahl und Position der Start- und Zielpunkte, sowie bestimmte Instruktionen an die Probanden (z.B. Pause zwischen den Bewegungssequenzen). Hierzu habe ich insgesamt sieben Experimente entworfen.

Experiment 1 überprüft, ob der Experimentaufbau für meine Fragestellung geeignet ist. Kann ich einen Einfluss des Kontextes (Einfluss benachbarter Bewegungssegmente) innerhalb einer einfachen, redundanten und möglichst natürlichen Bewegung nachweisen und inwieweit sind die Methode der UCM und der MEQ zur Beantwortung meiner Fragestellung geeignet oder müssen diese weiterentwickelt und angepasst werden? Zusätzlich kann hier die bereits häufig bestätigte Hypothese der UCM (Scholz und Schöner, 1999; Reisman et al, 2002; Scholz et al, 2000, 2002) auch für die Experimente in dieser Doktorarbeit überprüft werden. Experiment 2a macht es mir möglich einen direkten Vergleich zwischen antizipatorischer und carry-over Koartikulation herzustellen. Verschiedene Ergebnisse zu antizipatorischer Koartikulation werden daraufhin in Experiment 2b und 2c genauer überprüft. Experiment 3a wiederum ermöglicht, genau wie Experiment 2a, eine gute Gegenüberstellung beider Koartikulationsarten. Durch leichte Veränderungen im Versuchsaufbau kann möglicherweise der Einfluss von Bewegungsplanung und Bewegungsgenerierung auf verschiedenen Ebenen (Endeffektor, Gelenkwinkel) verändert werden und hierdurch ein besseres Verständnis zu deren Bedeutung gegeben werden.

Nach den vorhergehenden zwei-Sequenz-Bewegungen zeigt Experiment 4 als Abschluss eine Bewegungssequenz aus drei Bewegungssegmenten. Die eventuelle Fortführung von Koartikulation über mehrere Segmente kann hierdurch untersucht werden. In diesem Experiment ist es zusätzlich auch möglich antizipatorische und carry-over Koartikulation innerhalb eines einzelnen Bewegungssegmentes zu analysieren.

2 Methoden

2.1 Datenerfassung

Die Bewegung der Probanden wurde im Bewegungslabor der Ruhr-Universität Bochum, Institut für Neuroinformatik, über das Visualeyez II (PhoeniX Technologies Incorporated) Motion-Capture-System VZ 4000 erfasst. Es wurden hierfür drei Kamerasysteme mit jeweils drei Kameras, welche die dreidimensionale Position von LED Markern im Raum erfassten, verwendet. Die Kamerasysteme waren um den Versuchsaufbau und den Probanden aufgebaut. Die ersten beiden Kamerasysteme waren schräg oberhalb der Szene angebracht und waren ca. 1,5 m bis 2 m vom Versuchsaufbau entfernt. Das dritte System stand ca. 120 cm über dem Boden und erfasste die Szene von rechts hinten. Jedes Kamerasystem konnte die Position der Marker im dreidimensionalen Raum erfassen. Die drei Kamerasysteme waren miteinander vernetzt und wurden vor jedem Versuch zueinander kalibriert.

Bei jedem Experiment waren 14 LED Marker im Einsatz. Die Platzierung der Marker findet sich in Abschnitt *2.4 Berechnung der Gelenkwinkel*. 13 der Marker wurden über Kabel mit Strom versorgt. Ein Marker war batteriebetrieben und war auf dem zu transportierendem Objekt platziert. Bei den Markern handelt es sich um sogenannte „self-identified markers“/SIMarker). Diese Marker werden über das System zentral und einzeln über ihre Identifikationsnummer angesteuert. Da hierbei zu jedem Zeitpunkt nur jeweils ein Marker aktiv ist, ist eine Verwechslung zwischen den Markern ausgeschlossen.

Während des Versuches saß der Proband auf einem 55 cm bis 60 cm hohen, fest stehenden Stuhl, welcher sich direkt vor einem Monitor-Tisch befand. Die Bewegungen zur Positionierung des Objektes erfolgten nur mit dem rechten Arm und der Schulter. Damit die Probanden ihren Torso nicht ungewollt mit bewegten, wurde dieser über einem Gurt am Stuhl fixiert. Der Gurt verlief vom Stuhl über die rechte Schulter bis zur linken Seite der Taille. Insgesamt wurde darauf geachtet, dass der rechte Arm und die rechte Schulter in ihren Bewegungen möglichst nicht eingeschränkt wurden. Der Proband sollte in der Lage sein möglichst natürliche Bewegungen auszuführen. Der Monitor-Tisch war auf eine Höhe von 82 cm eingestellt. Die Ausmaße des Tisches betrugen 72 cm x 120 cm, der Bildschirm selbst maß 65 cm x 113 cm. Während das Objekt von den Probanden von einer Position zur nächsten transportiert wurde, waren die für den Versuch nötigen

Positionen auf dem Bildschirm dargestellt. Das Objekt war ein Zylinder aus Styropor, der in der Mitte ein kleines hölzernes Zwischensegment hatte. Der Durchmesser des Objektes betrug 6 cm, die Höhe 15 cm.

Für die Messungen war der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems auf einen Punkt auf dem Bildschirm festgelegt worden. Dieser Punkt entsprach bei Experiment 1 bis 3 der Mitte von Zentrum C (Abbildung 3.1 und 3.17) und bei Experiment 4 der Mitte von Zentrum C_1 (Abbildung 3.44). Die x- und die y-Achse waren zunächst an den Kanten des Monitors ausgerichtet. Die z-Achse stand senkrecht zur Tischebene.

Die Trajektorien der Marker wurden mit einer Frequenz von 100 Hz bzw. 101 Hz gemessen. Außerdem wurde auf die Daten ein vorwärts und rückwärts gerichteter Butterworth Filter der zweiten Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 5,5 Hz angewandt. Dadurch sollten Phasenverzerrungen vermieden werden. Die Berechnung wurde mit Matlab (Matlab-Funktionen: *butter*, *filtfilt*) durchgeführt.

Das Transportieren des Objektes von einer auf dem Bildschirm dargestellten Position zur nächsten wird als Bewegungssegment bezeichnet. Der Anfang und das Ende jedes Bewegungssegmentes wurde mit Hilfe von Positions- und Geschwindigkeitsdaten ermittelt. Nach der kinematischen Analyse der Daten wurden die Trajektorien normalisiert (100 Datenpunkte pro Bewegungssegment) und alle folgenden Analysen beziehen sich auf die prozentualen Daten.

Jedes Experiment dauerte pro Proband ca. 1,5 Stunden. Zu jedem Zeitpunkt war es dem Probanden erlaubt Pausen einzulegen. Auch klagte während und nach der Messung keiner der Probanden über größere Ermüdungserscheinungen im Arm.

2.2 Das Prinzip von antizipatorischer und carry-over Koartikulation

In diesen Experimenten wird der Einfluss richtungsabhängiger Koartikulation untersucht. Antizipatorische Koartikulation beschreibt den Einfluss nachfolgender Bewegungssegmente auf vorangehende Segmente. Carry-over Koartikulation beschreibt den Einfluss vorangehender Bewegungssegmente auf nachfolgende Segmente. Um diese Koartikulationsarten genauer zu untersuchen wurde folgende Vorgehensweise angewandt:

Ein Objekt wurde von Zielposition *A* nach Zielposition *B* und *C* und teilweise auch nach Zielposition *D* transportiert. Die Länge der einzelnen Bewegungssegmente war hierbei

immer konstant. Die Wahl der Zielpositionen erlaubt es verschiedene Bewegungssegmente unterschiedlicher Bedingungen miteinander zu vergleichen. Bewegungssegmente unterschiedlicher Bedingungen werden verglichen, wenn sie die gleichen Zielpositionen aufweisen (Anfang und Ende), sich aber im vorangehenden oder nachfolgenden Bewegungssegment unterscheiden.

Abbildung 2.1a zeigt schematisch, wie antizipatorische Koartikulation untersucht werden kann. Die abgebildeten Pfeile stellen die Bewegungsverläufe dar. Hier wird das Objekt bei einer Bedingung von Position A nach Position B und von dort nach Position C_i transportiert (rote Pfeile). Bei einer zweiten Bedingung wird das Objekt dagegen von Position A und B nach Position C_{ii} transportiert (grüne Pfeile). Die Aufgaben sind für beiden Bedingungen im ersten Bewegungssegment (Bewegung von A nach B) gleich. Trotzdem wurden bei dieser Zeichnung unterschiedliche Pfeilverläufe verwendet. Dies geschah aus dem Grund, da sich bereits die Bewegungen des ersten Bewegungssegmentes unterscheiden können. Unterschiede die bereits im ersten Bewegungssegment auftreten (antizipatorische Koartikulation), können hier auf die unterschiedlichen nachfolgenden Bewegungssegment (von B nach C_i bzw. C_{ii}) zurückgeführt werden. Es wird hier also der Einfluss des nachfolgenden zweiten Bewegungssegmentes auf das vorangehende erste Bewegungssegment sichtbar. Die Unterschiede in den Bewegungsverläufen, symbolisiert durch die unterschiedlichen Pfeilverläufe, können sich auf verschiedene Bewegungseigenschaften, wie Objektposition, aber auch Gelenkwinkel des transportiertenden Armes, beziehen. Natürlich ist es ebenfalls möglich bei längeren Sequenzen und über mehrere gleiche Bewegungssegmente hinweg antizipatorische Koartikulation zu untersuchen. Abbildung 2.1b zeigt wie sich sowohl die Bewegungsverläufe des ersten und zweiten Bewegungssegmentes unterscheiden (unterschiedliche Pfeilverläufe in rot und grün), obwohl sich die durchzuführenden Bewegungen erst im dritten Bewegungssegment (unterschiedliche Zielpositionen) unterscheiden. Ob und in welcher Weise tatsächlich antizipatorische Koartikulation zu finden ist, soll mit den in dieser Arbeit vorgenommen Experimenten untersucht werden.

Abbildung 2.1c und d stellen die Möglichkeit vor, carry-over Koartikulation bei Bewegungen aus zwei bzw. drei Bewegungssegmenten zu untersuchen. Hier unterscheiden sich nur die Startpositionen der ersten Bewegungssegmente voneinander, alle anderen Positionen bleiben gleich. Trotzdem wurden für das zweite (Abbildung 2.1c) bzw. für das zweite und dritte (Abbildung 2.1d) Bewegungssegment unterschiedliche Pfeilverläufe (in rot und grün) skizziert. Dies zeigt einen möglichen Einfluss des ersten Bewegungssegmentes auf die nachfolgenden Bewegungssegmente (carry-over Koartikulation). In den hier nachfol-

genden Experimenten soll ebenfalls untersucht werden, ob und in welcher Weise dieser Einfluss zu finden ist.

Natürlich ist es ebenso möglich innerhalb eines Bewegungssegmentes eine Kombination aus beiden Koartikulationsarten zu analysieren (Abbildung 2.1e). Hierzu braucht es eine Bewegung aus (mindestens) drei Segmenten, in der sich sowohl das erste als auch das letzte Bewegungssegment (durch unterschiedliche Zielpositionen) voneinander unterscheiden. Die Auswirkungen selbst können dann im mittleren Segment untersucht werden und werden ebenfalls in dieser Arbeit behandelt.

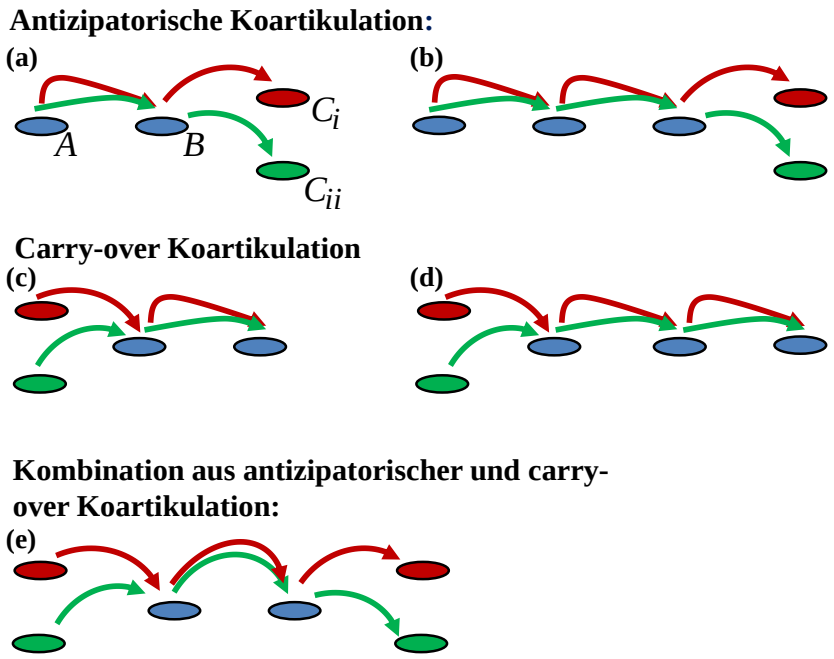

Abbildung 2.1: Ein Objekt soll von einer der dargestellten Positionen zur nächsten und weiter bewegt werden. Die Positionen für die Ausführung von jeweils zwei unterschiedlichen Bedingungen sind hier skizziert. Die Bewegungsverläufe von einer Position zur nächsten (ein Bewegungssegment) sind als Pfeile dargestellt. Pfeile gleicher Farbe stellen jeweils eine zusammenhängende Bewegung dar. Die Unterschiede in den Pfeilverläufen, trotz gleicher Zielpositionen (Anfang und Ende eines Bewegungssegmentes), lassen Koartikulation erkennen. (a, b) Prinzip von antizipatorischer Koartikulation: Einfluss der unterschiedlichen nachfolgenden Bewegungssegmente auf die vorhergehenden Bewegungssegmente. (c, d) Prinzip von carry-over Koartikulation: Einfluss der unterschiedlichen vorangehenden Bewegungssegmente auf die nachfolgenden Bewegungssegmente. (e) Kombination von antizipatorischer und carry-over Koartikulation für das mittlere Bewegungssegment.

In hiesigen Experimenten werden Bewegungen aus zwei (Experiment 1-3) und drei Bewegungssegmenten (Experiment 4) untersucht. Bei der Analyse von Koartikulation können

also immer nur ein bzw. zwei Bewegungssegmente einer Sequenz zwischen verschiedenen Bedingungen verglichen werden. Die anderen Segmente stellen den Kontext dar. Entsprechend fokussiert sich die Analyse der Ergebnisse auch vorwiegend auf diese entsprechenden Bewegungssegmente.

Untersuchungen zwischen den verschiedenen Bedingungen können zum Beispiel auf Ebene des Objektes/Endeffektors stattfinden. Das Objekt wird hier als Endeffektor bezeichnet, da es das letzte Element einer kinematischen Kette, den menschlichen Arm, darstellt. Die Trajektorie des Endeffektors kann direkt über den Marker am Objekt ausgelesen werden. Betrifft Koartikulation jedoch die Gelenkwinkel des Armes (mit oder ohne Einfluss auf die Endeffektortrajektorie), so sind genauere Berechnungen nötig. Analysen die auf Gelenkwinkel und Gelenkwinkelkonfigurationen beruhen, erfordern eine Transformation der verschiedenen Markerpositionen auf dem Arm zu den einzelnen Gelenkwinkeln des Armes.

2.3 Referenzkonfiguration für alle Marker bzw. Winkel

Für die späteren Berechnungen und die Beschreibung der Winkel wird eine Referenzkonfiguration aller Marker aufgenommen, aus welcher die Referenz-Gelenkwinkelkonfiguration Θ^0 aller Winkel des Armes berechnet werden kann. Alle Winkel dieser Referenz-Gelenkwinkelkonfiguration Θ^0 sind durch den Wert 0 beschrieben. Um die Referenzkonfiguration einzunehmen, hält der Proband das zylindrische Objekt nach oben gerichtet, während er den Arm waagrecht nach vorne streckt. Der Arm wird daraufhin um 90° im Ellenbogen nach oben gebeugt und kurz darauf wieder waagrecht ausgestreckt. Diese Vorgehensweise verbessert die gewollte Ausrichtung des Armes. Die Schulter wird nun nach hinten gedrückt. Ist diese Position eingenommen werden die Positionsdaten der Marker gemessen.

2.4 Berechnung der Gelenkwinkel

Um diese Gelenkwinkel anhand der dreidimensionalen Markerpositionen der 13 am Körper befestigten Marker zu berechnen, wurde folgende Vorgehensweise entwickelt. Jeweils drei Marker waren in einem fest definiertem Abstand auf runden und leicht gewölbten Thermoplastplättchen mit einem Durchmesser von ca. 5 cm angebracht. Die Plättchen mit den Markern werden auch „starre Körper“ (rigid bodies) genannt. Jeder starre Körper wird an einem Segment des Armes und an der Schulter befestigt, so dass über die

dort befindlichen drei Marker jeweils die Position und die Orientierung des Segmentes festgestellt werden kann. Zwölf der Marker werden auf den vier starren Körpern verteilt (Abbildung 2.2), ein weiterer am Oberkörper und einer am Objekt. Die folgende Auflistung beschreibt die genaue Positionierung der 14 verwendeten Marker. Alle Marker, bis auf den Objektmarker, werden für die Berechnung der Gelenkwinkel hinzugezogen.

- Marker 1: An der Oberseite des zylindrischen Objektes fixiert (Batteriebetrieben, wird nicht zur Gelenkwinkelberechnung hinzugezogen)
- Marker 2-4: Über einen starren Körper am rechten Schulterblatt fixiert
- Marker 5-7: Über einen starren Körper am Oberarm fixiert (lateral, nahe dem Ellenbogen)
- Marker 8-10: Über einen starren Körper am Unterarm fixiert (dorsal, nahe dem Handgelenk)
- Marker 11-13: Über einen starren Körper auf dem Handrücken fixiert
- Marker 14: Knapp über dem Sternum fixiert

Das redundante System des menschlichen Armes inklusive Schulter hat zehn Freiheitsgrade (DoF). Diese lassen sich auf zehn Gelenkwinkel, welche mehr oder weniger unabhängig voneinander bewegt werden können, aufteilen:

- Sternoklavikulargelenk mit drei DoF: Anheben und Absenken (Elevation und Depression), Vor- und Rückbewegung (Protraktion und Retraktion) sowie Rotation
- Schultergelenk mit drei DoF: Flexion und Extension (entspricht Anteversion und Retroversion), Abduktionen und Adduktion, sowie Innen- und Außenrotation der Schulter
- Ellenbogengelenk mit einem DoF: Flexion und Extension des Ellenbogens
- Radioulnargelenk mit einem DoF: Pronation und Supination des Unterarmes
- Handgelenk mit zwei DoF: Flexion und Extension, sowie Abduktion und Adduktion des Handgelenks

Um über die Positionsdaten der Marker die Gelenkwinkel des Armes zu berechnen, werden mehrere Schritte von der *Transformation zu Sternum-Koordinaten* (Abschnitt 2.4.1) bis zur *Berechnung der Winkel zwischen den starren Körpern und Optimierung der Gelenkwinkel* (Abschnitt 2.4.3) durchgeführt, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

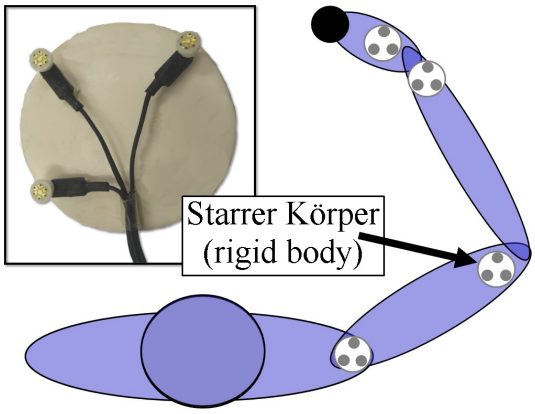

Abbildung 2.2: Anordnung der vier starren Körper mit jeweils drei Markern auf Schulter und Arm des Probanden zur Ermittlung der Gelenkwinkel.

2.4.1 Transformation zu Sternum-Koordinaten

Die im Bewegungslabor ermittelten Positionsdaten der Marker liegen als Weltkoordinaten vor. Der Nullpunkt $(0,0,0)$ wird durch einen bestimmten Punkt auf dem Monitor-Tisch beschrieben (s. Abschnitt *2.1 Datenerfassung*).

Diese Daten werden nun in Sternum-Koordinaten überführt. Obwohl der Proband angewiesen ist, seinen Oberkörper während des Versuches nicht mitzubewegen und er zusätzlich mit einem Gurt fixiert ist, kann eine gewisse Bewegung hier nie ausgeschlossen werden. Diese Oberkörperbewegungen werden mit Hilfe des Sternummarkers (Nr. 14, Abschnitt *2.4 Berechnung der Gelenkwinkel*) detektiert, so dass alle Markerpositionen nun im Hinblick auf die Sternumposition korrigiert werden können. Die so ermittelten Sternum-Koordinaten haben ihren Nullpunkt $(0,0,0)$ zu jedem Zeitpunkt auf der augenblicklichen Position des Sternummarkers. Alle weiteren Berechnungen werden mit diesen so transformierten Daten durchgeführt.

2.4.2 Berechnung der Rotationszentren bzw. Rotationsachsen

Jeder DoF rotiert um eine Achse. Gehören mehrere DoF zum gleichen anatomischen Gelenk, so schneiden sie sich in dieser Achse und bestimmen so das Rotationszentrum. Um die verschieden Rotationszentren im Arm zu bestimmen, führt jeder Proband zu Beginn des Experimentes verschiedene Referenzbewegungen mit der rechten Schulter und dem rechten Arm durch. Jede Einzelbewegung wird ca. fünf Mal wiederholt:

- Sternoklavikulargelenk: Der Proband hebt und senkt die Schulter (Elevation, Depression). Danach schiebt er die Schulter nach vorne und hinten (Protraktion, Retraktion).
- Schultergelenk: Der Arm des Probanden ist bei nachfolgenden Bewegungen durchgehend im Ellenbogengelenk um 90° gebeugt, damit er bei seinen Bewegungen nicht mit dem Tisch kollidiert. Der Proband hebt den Oberarm nach vorne bis in die Waagrechte und senkt ihn daraufhin wieder, so dass er senkrecht nach unten zeigt (Flexion, Extension). Der Oberarm wird nun seitlich bis in die Waagrechte abgespreizt und danach wieder an den Körper herangeholt (Abduktion, Adduktion).
- Ellenbogengelenk und Radioulnargelenk: Der Proband streckt den Arm vor sich aus und beugt und streckt daraufhin den Ellenbogen bis ca. 90° nach oben (Flexion, Extension). Nun lässt der Proband den Ellenbogen mit 90° gebeugt und dreht den Unterarm nach innen und außen (Pronation, Supination).
- Handgelenk: Der Arm wird waagrecht nach vorne gestreckt. Das zylindrische Objekt in der Hand des Probanden ist während der Bewegungen immer mehr oder weniger nach oben gerichtet. Zuerst wird das Objekt über das Handgelenk nach oben und unten gekippt (Flexion und Extension). Danach wird das Objekt über das Handgelenk nach links und rechts geschwenkt (Abduktion, Adduktion).

Die Rotationszentren wurden mit Hilfe obiger Bewegungen über den SCoRE Algorithmus von Ehrig et al (2006) ermittelt. Für die Ermittlung der Rotationsachsen des Sternoklavikulargelenks und des Schultergelenks mit jeweils drei DoF wurde auch die Methode der kleinsten Quadrate (Kugel-Approximation) angewandt (Leardini et al, 1999). Die Rotationsachse bei Flexion und Extension des Ellenbogens wird ebenfalls mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Es wird hier für jede der drei Marker-Trajektorien des starren Körpers am Oberarm (Markernummer 5-7, Abschnitt *2.4 Berechnung der Gelenkwinkel*) die Normale der Ebene berechnet. Über die gemittelte Normale wird die Achse für diese Bewegung geschätzt.

2.4.3 Berechnung der Winkel zwischen den starren Körpern und Optimierung der Gelenkwinkel

Die Schätzung der Gelenkwinkel über Rotationsmatrizen zwischen den starren Körpern, welche über die Gelenke verbunden sind, erfolgt nach der von Söderkvist und Wedin

(1993) beschriebenen Methode. Diese Methode geht jedoch nicht auf die Ungenauigkeiten ein, die bei einer Messung des menschlichen Armes auftreten. Die starren Körper auf der Haut können durch Kontraktion und Entspannung der Muskeln innerhalb gewisser Grenzen und unabhängig von der Gelenkstellung verschoben werden. Um dennoch die Gelenkwinkel möglichst genau zu bestimmen, wurde eine globale Optimierungsmethode angewandt. Dadurch wird die Abweichung der rekonstruierten Positionen, basierend auf einem geometrischen Modell des Armes, von den gemessenen Markerpositionen (Lu und O'Connor, 1999) minimiert. Die Implementierung für die Gelenkwinkelberechnung wurde von Dr. Hendrik Reimann mit Matlab vorgenommen.

2.5 Ungeregelte Mannigfaltigkeit (UCM)

Insgesamt erhalten wir für jede Bewegung zehn Gelenkwinkeltrajektorien sowie die Trajektorie des Endeffektors. Diese Datenmenge kann mit der Methode der Ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) analysiert werden. Mit dieser Methode lässt sich das redundante System des Armes strukturiert untersuchen (Scholz und Schöner, 1999; Scholz et al, 2000). Die Methode der UCM nimmt an, dass das Nervensystem die Redundanz innerhalb eines Systems nutzt, um Bewegungen sicher und flexibler gegenüber Störungen auszuführen. Konkret besagt die Hypothese, dass besonders solche Gelenkwinkelkonfigurationen vom Nervensystem geregelt werden, welche Einfluss auf die Aufgabenvariable haben. Für hiesige Versuche wird zum einen als Aufgabenvariable die 3D Position des Endeffektors im Raum (3D-Hypothese) betrachtet (vgl. Tseng et al, 2003). Zum anderen wird parallel als Aufgabenvariable die 3D Position des Endeffektors zusammen mit den zwei für den Zylinder relevanten Orientierungen hinzugenommen (3D+Ori2-Hypothese, vgl. Gera et al, 2010). Die Kombination aus der 3D Position des Endeffektors und seiner zweidimensionaler Orientierung lässt sich folgendermaßen erklären. Während der Bewegung ist die Orientierung des Endeffektors (Zylinders) zwar theoretisch flexibel, zu Ende jeder Bewegung ist jedoch auch die senkrechte Orientierung des Zylinders für die Aufgabe ausschlaggebend. Dies könnte sich auch auf die übrige Bewegung auswirken. Die Rotation des Zylinders in der waagrechten Ebene spielt für die Durchführung der Bewegung keine Rolle, daher werden nur die beiden anderen Orientierungen des Zylinders mit in die Hypothese aufgenommen. Diese Hypothese wird daher im Folgenden als 3D+Ori2-Hypothese bezeichnet. Die Methode der UCM unterscheidet daher zwischen Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition oder Endeffektorposition plus die zweidimensionale Orientierung nicht beeinflussen ($GWK_{||}$) und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche zu Variation in der Endeffektorposition oder zur Variation in der

Endeffektorposition und/oder zweidimensionaler Orientierung führen ($GWK_{\perp}$). $GWK_{||}$ und $GWK_{\perp}$ und auch andere den verschiedenen Hypothesen zugeordneten Variablen werden bei Bedarf mit den Kürzeln 3D bzw. 3D+Ori2 gekennzeichnet. Bei hiesigen Experimenten können Armbewegungen mit zehn Freiheitsgraden ausgeführt werden. Bei der 3D-Hypthese sind somit drei der Freiheitsgrade für die Bewegung relevant und sieben redundant. Bei der 3D+Ori2-Hypthese sind fünf der Freiheitsgarde für die Bewegung relevant und immerhin noch fünf redundant. Die Methode der UCM wertet die Varianz innerhalb dieser beiden Konfigurationen aus. Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition oder Endeffektorpositon plus zweidimensionale Orientierung nicht beeinflussen ($GWK_{||}$), sollten weniger stark geregelt werden als Gelenkwinkelkonfigurationen, welche diese beeinflussen ($GWK_{\perp}$). Eine genaue Beschreibung der UCM findet sich bei Scholz und Schöner (1999); Scholz et al (2000) und Schöner und Scholz (2007). Im Folgenden wird die Methode der UCM noch ausgeführt. Bei erklärenden Beispielen wird zumeist die Position des Endeffektors als aufgabenrelevant beschrieben. Genauso gut können jedoch je nach Aufgabenstellung auch andere Eigenschaften, wie die Orientierung des Endeffektors, eine Rolle spielen.

Ein Raum wird aus allen möglichen Gelenkwinkelkonfigurationen Θ aufgespannt. Bei zehn Gelenkwinkeln bzw. zehn DoF ist der Raum zehndimensional. Gelenkwinkelkonfigurationen die zur gleichen Endeffektorposition führen ($GWK_{||}$) bilden eine Mannigfaltigkeit. Da diese Gelenkwinkelkonfigurationen vom Nervensystem nicht geregelt werden müssen, kann man diese Mannigfaltigkeit auch als ungeregelte Mannigfaltigkeit bezeichnen.

Die Mannigfaltigkeit ist kein linearer, sondern ein gekrümmter Raum. Da das Konzept der Varianz jedoch linear ist, wird diese basierend auf der Jacobi-Matrix der Referenzkonfiguration $J\Theta^0$ linearisiert. Dies ist zulässig, solange die Vorwärtskinematik, welche den Gelenkwinkelkonfigurationen ihre Endeffektorpositionen zuweist, in dem untersuchten Bereich annähernd linear ist. Über die Jacobi-Matrix werden kleinere Abweichungen der Gelenkwinkelkonfigurationen Θ von der Referenzkonfiguration Θ^0 (s. Abschnitt *2.3 Referenzkonfiguration für alle Marker bzw. Winkel*) beschrieben. In Abbildung 2.3 findet sich dazu eine vereinfachte Darstellung mit drei Winkeln Θ_1, Θ_2 und Θ_3. Entlang jeder durchgezogenen Kurve/Mannigfaltigkeit verändert sich die hier zweidimensional dargestellte Endeffektorposition nicht. Die gestrichelten Linien stellen jeweils die Linearisierung jeder der drei abgebildeten Mannigfaltigkeiten dar, sie werden im Folgenden als UCM-Unterräume bezeichnet. Der dazu jeweils orthogonale Unterraum, innerhalb welchem sich die Endeffektorposition verändert, wird als ORT-Unterraum bezeichnet.

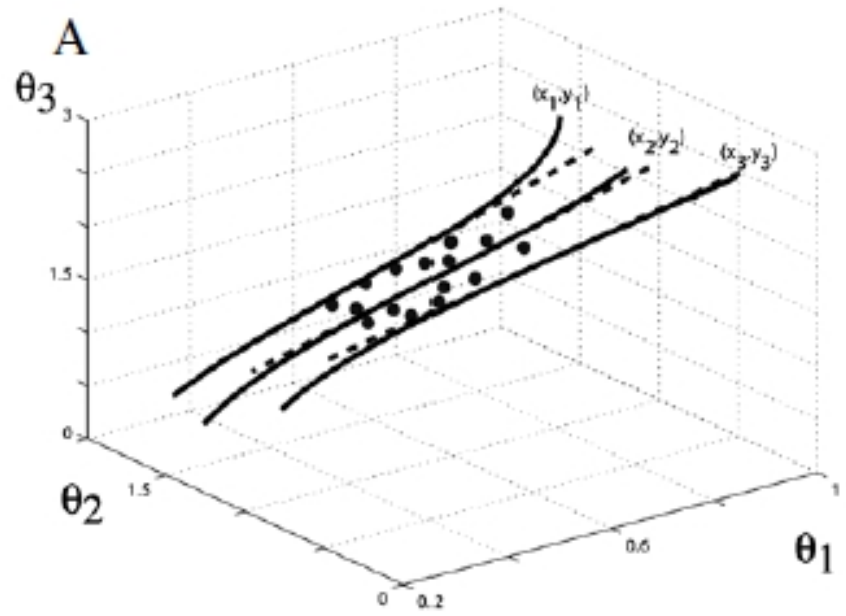

Abbildung 2.3: Darstellung von drei verschiedenen Mannigfaltigkeiten (gekrümmt, durchgezogenen Linie) aus drei Winkeln Θ_1, Θ_2 und Θ_3 und deren Linearisierung (gestrichelte Linie). Entlang jeder dieser drei Mannigfaltigkeiten verändert sich die Endeffektorposition (mit hier zwei DoF) nicht. Die einzelnen Punkte sind beispielhafte Gelenkwinkelkonfigurationen. (Abbildung aus Schöner und Scholz, 2007)

Allgemein kann die lineare Vorwärtskinematik um die Referenz-Gelenkwinkelkonfiguration Θ^0 folgendermaßen beschrieben werden:

$$p - p^0 = J(\Theta^0) \cdot (\Theta - \Theta^0) \tag{2.1}$$

Bei der 3D-Hypothese entspricht p dem Wert der augenblicklichen Endeffektorposition (x,y,z) und p^0 dem Wert der Referenz-Endeffektorposition. Die Jacobi-Matrix der Referenz-Gelenkwinkelkonfiguration $J(\Theta^0)$ ist eine d x n Matrix, wobei d der Anzahl der DoF des Endeffektors und n der Gesamtanzahl der DoF (in hiesigen Versuchen 10) entspricht.

Der Nullraum der Jacobi-Matrix (entspricht dem UCM-Unterraum) repräsentiert die Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor nicht verändern. Er wird durch die Basisvektoren ϵ_i aufgespannt. Es gibt $n - d$ Basisvektoren. Dementsprechend hat der UCM-Unterraum in Fall der 3D-Hypothese $10 - 7 = 3$ Dimensionen und im Fall der 3D+Ori2-Hypothese $10 - 5 = 5$ Dimensionen. Es gilt hierbei:

$$0 = J(\Theta^0) \cdot \epsilon_i \tag{2.2}$$

Nun wird für jeden Zeitpunkt die mittelwertfreie Gelenkwinkelkonfiguration $\Theta - \Theta^0$ in eine Komponente parallel zum UCM-Unterraum ($\Theta_{||}$) aufgeteilt, welche den Endeffektor invariant lässt und eine Komponente orthogonal zum UCM-Unterraum ($\Theta_{\perp}$), welche zu Variationen des Endeffektors führt (ORT-Unterraum). Die beiden Komponenten können folgendermaßen beschrieben werden (Scholz und Schöner, 1999):

$$\Theta_{||} = \sum_{i=1}^{n} \epsilon_i \cdot (\Theta - \Theta^0) \tag{2.3}$$

$$\Theta_{\perp} = (\Theta - \Theta^0) - \Theta_{||} \tag{2.4}$$

Die Abbildungen 2.4A und B verdeutlichen graphisch die beiden Komponenten mit einer vereinfachten Anordnung aus drei Winkeln Θ_1, Θ_2 und Θ_3.

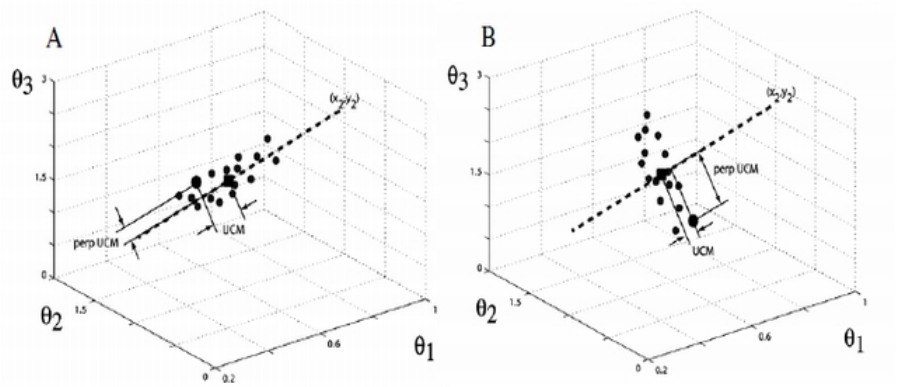

Abbildung 2.4: Die Projektion der Komponenten $\Theta_{||}$ und $\Theta_{\perp}$ in die Unterräume UCM und ORT-Unterraum ist hier für jeweils einen Punkt (größerer schwarzer Punkt) dargestellt. Die gestrichelte Linie stellt die linearisierte Mannigfaltigkeit/den UCM-Unterraum dar. Das schwarze Quadrat beschreibt den Mittelpunkt. $\Theta_{||}$ (A) bzw. $\Theta_{\perp}$ (B) ist besonders stark ausgeprägt. (Abbildung aus Schöner und Scholz, 2007)

Die Varianz für die beide Komponenten $V_{||}$ bzw. $V_{\perp}$ kann über folgende Gleichungen ermittelt werden. N beschreibt hier die Anzahl der Wiederholungen jeder Bewegung, n die Anzahl aller Freiheitsgrade und d die Anzahl der Freiheitsgrade des Endeffektors (Scholz und Schöner, 1999):

$$V_{||} = (n-d)^{-1} \cdot N^{-1} \cdot \sum \Theta_{||}^2 \tag{2.5}$$

$$V_{\perp} = d^{-1} \cdot N^{-1} \cdot \sum \Theta_{\perp}^2 \tag{2.6}$$

Die Hypothese der UCM geht davon aus, dass die Varianz pro Freiheitsgrad parallel zum UCM-Unterraum größer ist und demnach vom Nervensystem weniger geregelt wird als die Varianz pro Freiheitsgrad orthogonal hierzu. Dies entspricht der Ungleichung

$$V_{||} > V_{\perp}. \tag{2.7}$$

2.6 Motorische Äquivalenz (MEQ)

Die Methode der UCM gibt uns die Möglichkeit redundante Systeme mit vielen DoF strukturiert zu untersuchen. Dabei wird jedoch immer nur eine Bewegung mit ihren Wiederholungen analysiert. Eine Adaptation der UCM Methode, die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ, motor equivalence; Schöner et al, 2008; Scholz et al, 2011), gibt uns die Möglichkeit den Unterschied zwischen zwei Bewegungen im Hinblick auf Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition oder Endeffektorposition plus zweidimensionale Orientierung nicht beeinflussen ($GWK_{||}$), und Gelenkwinkelkonfigurationen welche die Endeffektorposition oder Endeffektorposition und/oder zweidimensionale Orientierung beeinflussen ($GWK_{\perp}$), zu untersuchen. Es kann analysiert werden, in welchem Maß dieser Unterschied auf beide Komponenten verteilt ist.

Für jeden einzelnen Zeitpunkt t von 1 - 100 % wird für jeden Probanden die gemittelte Differenz $\Delta\theta(t)$ von zwei zu vergleichenden und gemittelten Gelenkwinkelkonfigurationen $\overline{\theta}$ berechnet. Dazu wird jeweils die gemittelte Gelenkwinkelkonfiguration der ersten Bedingung $\overline{\theta}^{(B1)}(t)$ und die gemittelte Gelenkwinkelkonfiguration der zweiten Bedingung $\overline{\theta}^{(B2)}(t)$ herangezogen:

$$\Delta\theta(t) = \overline{\theta}^{(B1)}(t) - \overline{\theta}^{(B2)}(t) \tag{2.8}$$

Dieser Differenzvektor $\Delta\theta(t)$ wird nun parallel zum UCM-Unterraum (die Aufgabenvariable bleibt konstant) und auf den dazu orthogonal Unterraum (ORT-Unterraum, die Aufgabenvariable variiert) projiziert. Hieraus erhält man $\Delta\theta_{||}(t)$ und $\Delta\theta_{\perp}(t)$:

$$\Delta\theta_{||}(t) = E_{||}(t)E_{||}^{T}(t)\Delta\theta(t) \tag{2.9}$$

$$\Delta\theta_{\perp}(t) = E_{\perp}(t)E_{\perp}^{T}(t)\Delta\theta(t) \tag{2.10}$$

Die Projektion basiert auf den Projektionsmatrizen $E_{\parallel}(t) \in \mathbb{R}^{n\times(n-d)}$, und $E_{\perp}(t) \in \mathbb{R}^{n\times d}$. Wobei n wiederum die Gesamtanzahl der DoF des Systems und d die Anzahl der DoF des Endeffektors bezeichnet. Verwendet man die 3D-Hypothese, so entspricht $n = 10$ und $d = 3$. Die zueinander orthogonalen Vektoren spannen den UCM-Unterraum und den dazu orthogonalen ORT-Unterraum auf. Bestimmt wird dies durch die Jacobi Matrix $J(t)$, welche durch Singulärwertzerlegung festgelegt wird. p entspricht hierbei der dreidimensionalen Objektposition in Kartesischen Koordinaten.

$$J(t) = \frac{\partial}{\partial\theta}\left(p\left(\frac{\overline{\theta}^{(B1)}(t) + \overline{\theta}^{(B2)}(t)}{2}\right)\right) \tag{2.11}$$

Um die beiden Differenzvektoren $\Delta\theta_{\parallel}$ und $\Delta\theta_{\perp}$ gut vergleichen zu können, werden diese normiert und durch die Dimension ihres Unterraumes geteilt. Die projizierten und normierten Differenzvektoren werden als $MEQ_{\parallel}$ und $MEQ_{\perp}$ bezeichnet.

$$MEQ_{\parallel} = \frac{1}{n-d}\|\Delta\theta_{\parallel}\| \tag{2.12}$$

$$MEQ_{\perp} = \frac{1}{d}\|\Delta\theta_{\perp}\| \tag{2.13}$$

2.7 Statistische Vorgehensweise

Die zwischen den Versuchsbedingungen und Probanden ermittelten Unterschiede wurden auf ihre Signifikanz hin überprüft. Für die UCM Analyse wurde hierbei mit Hilfe des Programmes SPSS eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen, ANOVAs, durchgeführt. Kam es hierbei zu einer Verletzung der Sphärizitäts-Voraussetzung, wurde eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser vorgenommen. Beim nachfolgenden post-hoc Test wurde auf einen Angleich der p-Werte durch die Bonferroni-Korrektur geachtet. Das Signifikanzniveau α war auf 0,05 festgelegt. Im Folgenden werden neben den Mittelwerten häufig auch ihre Standardabweichungen (SD) angegeben.

Die statistische Signifikanz von mehrdimensionalen Trajektorienunterschieden sowie eine genauere Untersuchung der Ergebnisse der motorischen Äquivalenz Analyse wurden in Matlab über MANOVAs (multivariate Varianzanalysen) durchgeführt. Auch hier wurde

beim post-hoc Test eine Bonferroni-Korrektur angewandt und das Signifikanzniveau α lag bei 0,05.

Beim Vergleich von zwei Bedingungen wird bei der Berechnung der MEQ eine Projektion des Differenzvektors aus diesen Bedingungen auf die beiden Unterräume UCM und ORT vorgenommen. Über eine dieser beiden Bedingungen wird auch die linearisierte UCM-Basis für diese Projektion erstellt. Eine Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist daher eine annähernd ähnliche Basis zwischen den zu vergleichenden Bedingungen. Diese Voraussetzung wurde durch die Berechnung des Winkels γ überprüft. Dieser Winkel γ beschreibt den Winkel zwischen den (linearisierten) UCM-Unterräumen zweier zu vergleichender Bedingungen. Der Winkel γ war für die Vergleiche klein. Eine Zusammenstellung der γ-Werte für die einzelnen Experimente zur 3D-Hypothese findet sich in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Der Winkel γ wird zwischen den linearisierten UCM-Unterräumen zweier zu vergleichenden Bedingungen gebildet. Die Angabe der Werte erfolgt in [rad] und bezieht sich auf die 3D-Hypothese.

Experimentnr.	γ, Mittelwert	SD	Maximum
1	0.0336	0.0204	0.1672
2a	0.0351	0.0220	0.1482
2b	0.0134	0.0071	0.0408
2c	0.0155	0.0088	0.0643
3a	0.0365	0.0239	0.1862
3b	0.0132	0.0066	0.0391
4	0.0357	0.0251	0.1594

2.8 Allgemeiner Versuchsaufbau

An jedem Experiment nahmen zehn Probanden teil. Alle Probanden waren nach eigenen Angaben Rechtshänder bzw. schrieben mit der rechten Hand, gesund, ohne neurologische Vorerkrankungen und, sofern nicht anders angegeben, naiv im Hinblick auf den Versuchsaufbau. Die Probanden waren zwischen 19 und 38 Jahren alt. Ebenso waren die Probanden normalgewichtig oder hatten nur leichtes Übergewicht. Sie standen nach eigenen Angaben nicht unter Drogen- oder Alkoholeinfluss.

Auf dem Bildschirm waren die Positionsangaben für die einzelnen Bedingungen als Kreise (Durchmesser 6 cm) dargestellt. Diese werden als Zielpositionen bezeichnet. Jedes

Bewegungssegment begann bei einer Zielposition und endete bei der nachfolgenden Zielposition. Der Abstand dieser aufeinander folgenden Zielpositionen war vom Mittelpunkt aus gemessen immer 15 cm. Die erste Zielposition einer Sequenz wird auch als Startposition bezeichnet und die letzte als Endposition. Die möglichen Positionsanordnungen für Experiment 1 finden sich in Abbildung 3.1. Bekam der Proband eine Bewegungssequenz präsentiert (Ablauf für Experiment 1 in Abbildung 3.2), so wurde die Startposition immer als grüner Kreis, markiert mit dem Wort „Start“, dargestellt. In einer Zweier-Sequenz war die darauffolgende Zielposition (Zentrum C) gelb und mit der Nummer 1 und die Endposition rot und mit der Nummer 2 gekennzeichnet. Die Zielposition (Zentrum C) lag mittig zwischen den anderen Zielpositionen. In einer Dreier-Sequenz war die Zielposition nach der Startposition (Zentrum C_1) ebenfalls gelb und mit der Nummer 1 markiert. Die nachfolgende Position (Zentrum C_2) war orange und mit der Nummer 2 markiert. Die Endposition wiederum war rot und mit der 3 gekennzeichnet. Zentrum C_1 und C_2 lagen mittig zwischen den anderen Zielpositionen, wobei C_1 sich rechts von C_2 befand. Als Bewegungssegment wird die Bewegung von einer Zielposition zur nächsten bezeichnet. In den Experimenten 1 bis 3 wurden Zweier-Sequenzen untersucht, also Bewegungen aus zwei Bewegungssegmenten. Experiment 4 dagegen beinhaltete eine Dreier-Sequenz.

Ein Durchgang ist definiert als das einmalige Bewegen des Objektes von der Startposition über das Zentrum bzw. die Zentren C bis zur Endposition. Bei b verschiedene Bedingungen und N Wiederholungen enthielt das gesamte Experiment für einen Probanden $b \cdot N$ Durchgänge. Die Gesamtheit aller Durchgänge eines Probanden wird als Probandensatz bezeichnet. Alle Bedingungen wurden in pseudo-randomisierter Reihenfolge gezeigt und dies wurde N mal wiederholt (jeweils in anderer pseudo-randomisierter Reihenfolge). Da bei allen Experimenten die mittlere Zielposition gleich war bzw. die mittleren Zielpositionen gleich waren, lässt sich jede Bewegung durch die Angabe von Start- (S) und Endposition (E) definieren. Die Zielpositionen sind durchnummeriert. Die Bedingung S1-E2 beschreibt also eine Bewegung von Startposition S1 über ein bis zwei festgelegte Zielpositionen (C bzw. C_1 und C_2) zur Endposition 2. Werden in der Analyse zwei Bedingungen miteinander verglichen, werden die unterschiedlichen Positionsangaben der beiden Bedingungen durch das Symbol „/“ getrennt. S1-E2/4 bezeichnet demnach den Vergleich einer Bedingung mit Startposition S1 und Endposition E2 mit einer Bedingung ebenfalls beginnend bei Startposition S1 zu Endposition E4.

Vor Beginn jedes Durchgangs leuchtete ein mittig positionierter Kreis in grauer Farbe auf dem Bildschirm. Er befand sich an der Position des Zentrums C bzw. C_1. Hier positionierte der Proband das Objekt. Das Objekt wurde hierzu mit allen Fingern der Hand

umschlossen. Zu diesem Zeitpunkt war die nachfolgende Bedingung noch unbekannt. Der Griff am Objekt durfte ab diesem Zeitpunkt nicht mehr geändert werden, damit der Proband seinen Griff nicht auf die nachfolgende Bewegungssequenz abstimmen konnte. Zuerst wurde nun die Startposition auf dem Bildschirm eingeblendet und der graue Kreis ausgeblendet. Nachdem der Proband das Objekt auf der Startposition positioniert hatte, bekam er alle Zielpositionen der aktuellen Bedingung in entsprechenden Farben und mit entsprechender Kennzeichnung zu sehen. Das Objekt wurde, entsprechend den Anweisungen zu den jeweiligen Experimenten, vom Probanden von einer zur nächsten Position transportiert. War die Startposition identisch mit der Endposition (möglich in Experiment 1 bis 3) so überschrieb der rote Kreis der Endposition den grünen Kreis der Startposition. Das Objekt befand sich also zu Beginn des Durchganges sowohl auf der Start- als auch auf der Endposition. Der rote Kreis schien unter dem Objekt hervor und der Durchgang wurde ohne Unterschied zu den anderen Durchgängen ausgeführt. Alle Bewegungen sollten mit einer für den Probanden komfortablen Geschwindigkeit ausgeführt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Experiment 1

In diesem Versuch wurden die grundlegenden Eigenschaften von sequenzieller Bewegung bei richtungsabhängigem Kontext untersucht. Sowohl carry-over Koartikulation als auch antizipatorische Koartikulation können hier analysiert werden, wobei die Betonung dieses Experimentes auf carry-over Koartikulation liegt. Anhand dieses Experimentes werden die notwendigen Grundlagen zur Analyse der Bewegungsdaten entwickelt und im Bezug auf ihre Aussagekraft untersucht.

3.1.1 Versuchsaufbau

Das Experiment bestand darin das Objekt von einer Position auf dem Monitor-Tisch zu zwei weiteren Positionen zu bewegen. Die Start- und Endpositionen variierten während des Versuches. Es nahmen sechs Frauen und vier Männer im Alter zwischen 20 und 30 Jahren an diesem Experiment teil. Bis auf zwei Teilnehmer waren alle Probanden naiv im Bezug auf den Zweck des Versuches.

In Abbildung 3.1 sind alle möglichen Zielpositionen für den Versuch aufgezeichnet. Sechs Kreise (1-6) sind kreisförmig um einen mittleren Kreis (Zentrum C) angeordnet. Alle Positionen sind 15 cm von der mittleren Position (gemessen von Mittelpunkt zu Mittelpunkt) entfernt und ebenfalls 15 cm von ihren jeweiligen Nachbarpositionen innerhalb des Kreises. Die Kreise 1-6 waren mögliche Startpositionen und werden als S1 bis S6 bezeichnet. Die Kreise 2, 4 und 6 waren mögliche Endpositionen und werden mit E2, E4 und E6 beschrieben. Jeder Durchgang bestand aus einer Zweier-Sequenz Bewegung. Pro Durchgang wurde das Objekt von einer der sechs Startpositionen über das Zentrum C (erstes Bewegungssegment/BS 1) und vom Zentrum C zu einer der drei Endpositionen bewegt (zweites Bewegungssegment/BS 2). Danach begann der nächste Durchgang mit anderen Start- und Endpositionen. Das Experiment enthielt 18 verschiedene Bedingungen (6 *Startpositionen* $*$ 3 *Zielpositionen*) mit jeweils zehn Wiederholungen ($N = 10$). Ein Probandensatz bestand somit aus 180 Durchgängen.

Die Abfolge der verschiedenen Positionen auf dem Monitor-Tisch ist in Abbildung 3.2 für einen Durchgang dargestellt. Zuerst wurde der graue Kreis (Zentrum C) auf dem

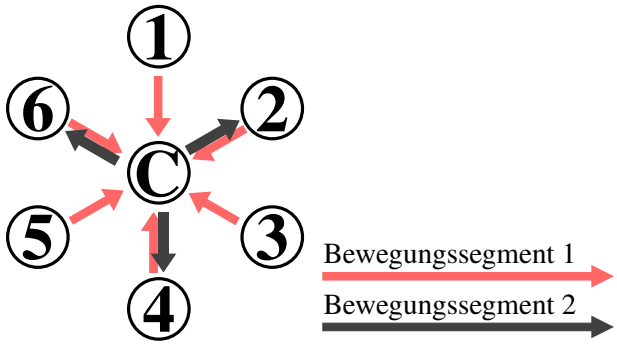

Abbildung 3.1: Anordnung aller möglichen Start- (1-6) und Endpositionen (2, 4 und 6) um das Zentrum C bei Experiment 1.

Bildschirm dargestellt, dann die Startposition S. Nachdem der Proband dort sein Objekt positioniert hatte, begann die eigentliche Messung für diesen Durchgang. Die Kreise für den ersten und zweiten Teil der Bewegungssequenz wurden dargestellt (Abbildung 3.2c). Sah der Proband diese beiden Positionen, bewegte er das Objekt sofort und mit komfortabler Geschwindigkeit zum ersten Kreis und, nachdem er diesen mit dem Objekt kurz angetippt hatte, weiter zum zweiten Kreis. Dort verharrte er wenige Sekunden. Der Durchgang war beendet und der graue Kreis aus Abbildung 3.2a erschien wieder auf dem Monitor und der nächste Durchgang konnte beginnen.

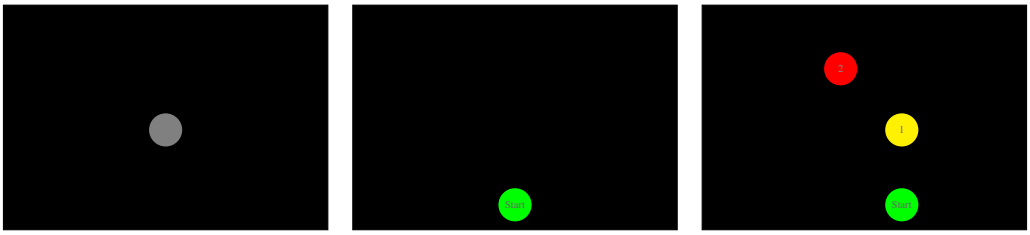

Abbildung 3.2: Darstellung eines Durchgangs von Experiment 1 auf dem Monitor (Bedingung S4-E6). (Bild links) Das Objekt wurde vom Probanden zunächst auf dem Zentrum C (grauer Kreis) platziert. (Bild Mitte) Das Objekt wurde auf der abgebildeten grünen Startposition platziert. (Bild rechts) Das Objekt wurde über das Zentrum (gelb) zur Endposition (rot) bewegt.

Alle ermittelten Daten wurden im Bezug auf ihre Vollständigkeit kontrolliert. Durch verdeckte Marker, Reflexionen oder Ähnliches konnte es hierbei zu Ausfällen kommen. 8,8 % der Trajektorien konnten daher nicht für die Analyse verwendet werden.

3.1.2 Kinematische Analyse der Bewegungen

Das erste Bewegungssegment wurde im Mittel in einer Zeit von 0,64 s, das zweite Segment in 0,57 s zurückgelegt. Die Durchschnittliche Geschwindigkeit betrug 0,28 m/s mit einer Standardabweichung von ±0,030 m/s (BS 1) bzw. 0,29 m/s mit einer Standardabweichung von ±0,033 m/s (BS 2). Für das erste Segment lag die maximale Geschwindigkeit bei 0,55 m/s ($SD = \pm 0{,}075$ m/s) und beim zweiten Segment lag die maximale Geschwindigkeit leicht darunter mit 0,53 m/s ($SD = \pm 0{,}071$ m/s).

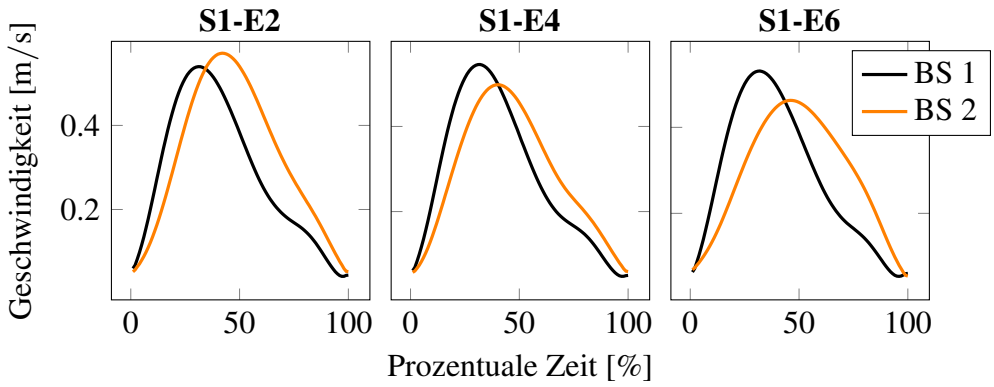

Abbildung 3.3: Über Probanden gemittelter Geschwindigkeitsverlauf für drei Bedingungen über die prozentuale Zeit für das erste und zweite Bewegungssegment. (Experiment 1)

Betrachtet man den Verlauf der Geschwindigkeit der beiden Bewegungssegmente (Abbildung 3.3), so sieht man für jedes der beiden Bewegungssegmente eine Struktur mit einem deutlichen Maximum. Bis auf das letzte Drittel zeigt sich vor allem im ersten Bewegungssegment eine sehr konstante Geschwindigkeitszu- bzw. abnahme. Eine minimale Abweichung im letzten Drittel lässt sich möglicherweise durch visuelles Feedback erklären. Die aktuelle Position des Objektes und die Zielposition (Zentrum C bzw. Zielposition E) könnten zu Ende des Segmentes besser aufeinander angepasst werden und führen so möglicherweise zu einer kurzzeitigen Veränderung (vor allem Verlangsamung) der Geschwindigkeit.

3.1.3 Varianzanalyse der Uncontrolled manifold (UCM)

Zuerst wurde die Varianz innerhalb der Gelenkwinkelkonfigurationen für die 3D-Hypothese und alle 18 Bedingungen und beide Bewegungssegmente untersucht. Dies wurde für die beiden Komponenten, im UCM-Unterraum (UCM) bzw. im dazu

orthogonalen Unterraum (ORT) analysiert. Es wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen (repeated measures ANOVA) mit den drei Faktoren Zeit, Bedingung und der UCM/ORT Komponente durchgeführt. Innerhalb beider Bewegungssegmente wurden jeweils die Zeitpunkte 1, 25, 50, 75 und 100 % untersucht.

Es zeigt sich, dass für das erste Bewegungssegment der Wert der UCM Komponente immer signifikant größer ist als der der dazugehörigen orthogonalen Komponente ($F_{1,9} = 16{,}009$, $P = 0{,}003$). Hierbei wurde eine Interaktion zwischen den Faktoren Zeit und der UCM/ORT Komponente festgestellt ($F_{1.145,10.308} = 10{,}126$, $P < 0{,}008$). Eine weitere ANOVA (mit Messwiederholungen) für jeden einzelnen der fünf Zeitpunkte konnte allerdings nochmals zeigen, dass die UCM Komponente zu jedem dieser Zeitpunkte die ORT Komponente signifikant übersteigt.

Ähnliche Ergebnisse konnten auch für das zweite Bewegungssegment ermittelt werden. Die UCM Komponente übersteigt signifikant die ORT Komponente ($F_{1,9} = 16{,}062$, $P = 0{,}003$). Auch hier wurde eine Interaktion zwischen Zeit und der UCM/ORT Komponente festgestellt ($F_{1.557,14.014} = 5{,}633$, $P = 0{,}001$). Daher wurde für jeden einzelnen der fünf Zeitpunkte eine gesonderte ANOVA durchgeführt. Diese zeigt ebenfalls, dass zu jedem einzelnen Zeitpunkt die UCM Komponente signifikant über der ORT Komponente liegt.

In Abbildung 3.4 wurde dieser deutliche UCM-Effekt nochmals für jeweils sechs der 18 Bedingungen und beide Bewegungssegmente aufgezeichnet. Für die restlichen zwölf Bedingungen sieht der Verlauf beider Komponenten ähnlich aus. Die hier gezeigten Bedingungen beginnen bei jedem der sechs möglichen Startpositionen S1-S6 und enden jeweils in der Endposition E2. Parallel zu den Ergebnissen, welche sich auf die 3D-Hypothese beziehen, werden hier zusätzlich die UCM-Ergebnisse für die 3D+Ori2-Hypothese dargestellt. Auch hier zeigt sich für die verschiedenen Bedingungen ein UCM-Effekt. $V_\perp$ bei der 3D+Ori2-Hypothese ist im Vergleich zu $V_\perp$ bei der 3D-Hypothese um durchschnittlich 0,0018 $\mathrm{rad}^2/\mathrm{DoF}$ (BS 1) bzw. 0,0016 $\mathrm{rad}^2/\mathrm{DoF}$ (BS 2) erhöht.

3.1.4 Endeffektortrajektorien

In diesem Experiment kann richtungsabhängige Koartikulation für das erste Bewegungssegment untersucht werden (antizipatorische Koartikulation). Bedingungen, welche im ersten Segment übereinstimmen (gleiche Startposition), aber im zweiten Segment unterschiedlich sind, werden hier verglichen. Entsprechend kann carry-over Koartikulation innerhalb des zweiten Bewegungssegmentes analysiert werden. Bedingungen, welche im

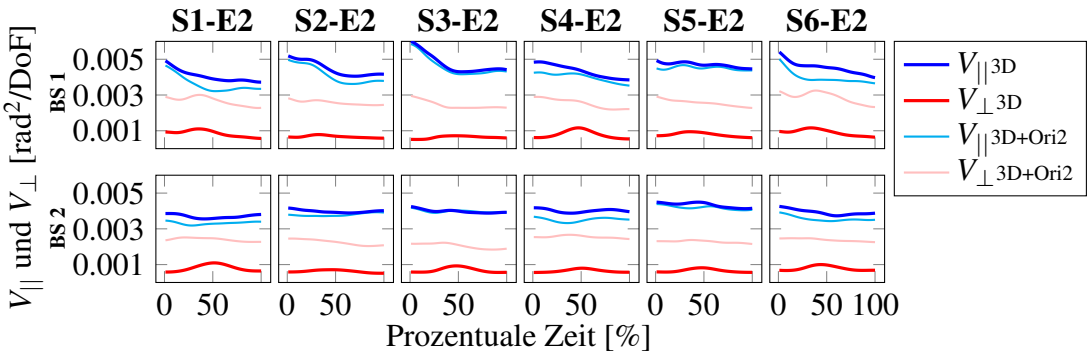

Abbildung 3.4: Ergebnisse der UCM-Varianzanalyse für sechs Bedingungen (S_i-E2 und beide Bewegungssegmente (BS). Es ist jeweils die Varianz der Gelenkwinkel über die prozentuale Zeit für die 3D- und die 3D+Ori2-Hypothese aufgetragen. (Experiment 1)

zweiten Bewegungssegment übereinstimmen, aber im ersten Segment unterschiedliche Startpositionen haben, werden verglichen.

Als ersten Schritt werden die Vergleiche der Endeffektortrajektorien durchgeführt. Besonders interessant erscheinen hier Abweichungen in horizontaler Ebene, da die Bedingungen innerhalb dieser Ebene variieren (richtungsabhängig). In Abbildung 3.5 ist diese Ebene dargestellt (Draufsicht auf den Monitor). In Abbildung 3.5a sind farbcodiert (gleiche Endposition mit gleicher Farbe) jeweils die Endeffektorpfade des ersten Bewegungssegmentes dargestellt. Es lassen sich visuell kaum Unterschiede zwischen den drei Endeffektorpfaden mit gleicher Startposition feststellen. Das gleiche scheint für das zweite Bewegungssegment zu gelten (Abbildung 3.5b). Hier sind die Endeffektorpfade mit jeweils der gleichen vorausgehenden Startposition mit gleicher Farbe dargestellt.

In Abbildung 3.6 sind zusätzlich noch die drei Kartesischen Komponenten der Endeffektortrajektorien zusammen mit der Standardabweichung über die Zeit und gemittelt über die Probanden aufgetragen. Abbildung 3.6a zeigt die Trajektorien für drei Vergleiche im ersten Bewegungssegment (S1-E2/4/6) und Abbildung 3.6b zeigt die Trajektorien für sechs Vergleiche im zweiten Bewegungssegment (S1/2/3/4/5/6-E2). Hier sieht man sehr deutlich, dass die Unterschiede innerhalb beider Abbildungen zu jedem Zeitpunkt innerhalb der Standardabweichung liegen. Anhand der bisherigen Analyse können die Endeffektordaten noch keine Hinweise auf antizipatorische oder carry-over Koartikulation geben.

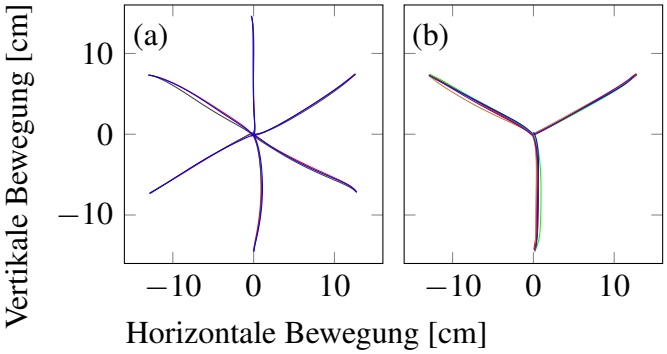

Abbildung 3.5: Über alle Wiederholungen und Probanden gemittelte Endeffektorpfade von Experiment 1 sind auf die Monitorfläche projiziert und für alle 18 Bedingungen aufgetragen. Die Endeffektorpfade ähneln sich bei gleicher Startposition (a, BS 1) bzw. Endposition (b, BS 2) sehr.

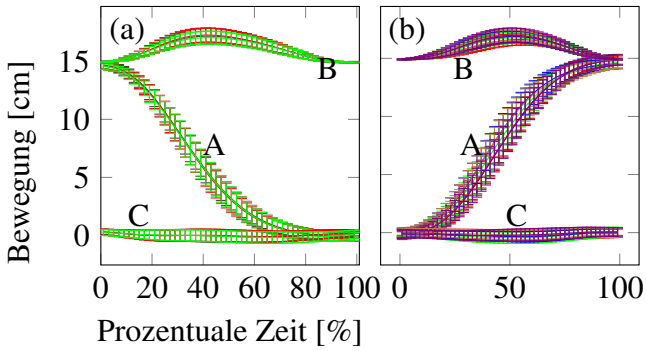

Abbildung 3.6: Endeffektortrajektorien mit Standardabweichung für das erste (a) und zweite (b) Bewegungssegment. Die Trajektorien der Bedingungen S1-E2/4/6 (a) bzw. S1/2/3/4/5/6-E2 (b) sind dargestellt. Kartesische Komponenten: A: Die Koordinatenachse zeigt vom Bewegungsstart (Startposition bzw. Zentrum) zur Zielposition (Zentrum bzw. Endposition); B: Die Koordinatenachse zeigt vertikal nach oben; C: Die Koordinatenachse befindet sich senkrecht zu den Achsen aus A und B. (Experiment 1)

3.1.5 Gelenkwinkeltrajektorien

Neben der Analyse der Endeffektortrajektorien werden im Folgenden die Trajektorien der Gelenkwinkel untersucht. Der Arm inklusive Schulter besitzt zehn Freiheitsgrade. Dementsprechend können zehn Gelenkwinkeltrajektorien untersucht werden. Wiederum werden jeweils die Bedingungen miteinander vergleichen, welche Hinweise auf antizipatorische (im ersten Bewegungssegment) bzw. carry-over Koartikulation (im zweiten Bewegungssegment) geben können.

Abbildung 3.7 zeigt den Verlauf von zwei Gelenkwinkeln über die Zeit. Abduktion und Adduktion der Schulter und Flexion und Extension des Ellenbogens sind dargestellt. Der Verlauf der anderen acht Gelenkwinkeltrajektorien ist den hier abgebildeten sehr ähnlich. Eine Aufzeichnung aller zehn Gelenkwinkel befindet sich im Anhang in Abbildung 5.1.

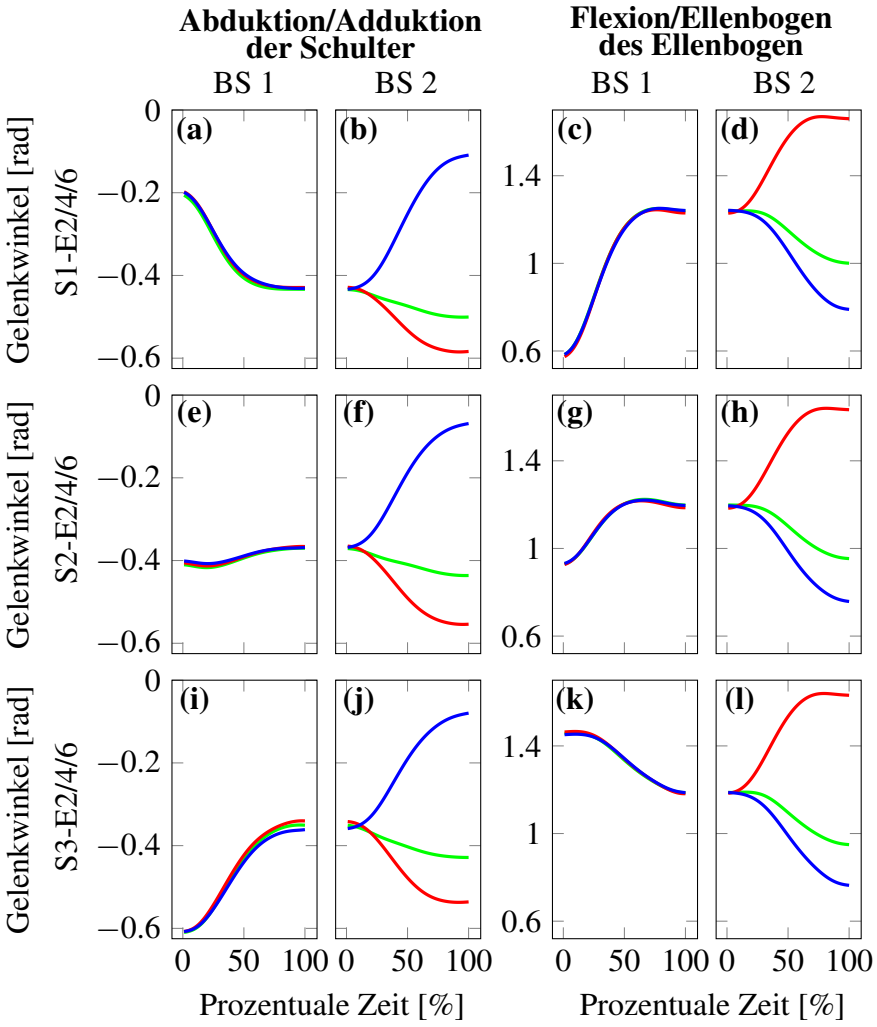

Abbildung 3.7: Über Probanden und Bedingungen gemittelte Gelenkwinkeltrajektorien der Winkel zur Abduktion/Adduktion der Schulter und Flexion/Extension des Ellenbogens über beide Bewegungssegmente (BS) sind für die Vergleiche S1-E2/E4/E6, S2-E2/E4/E6, S3-E2/E4/E6 dargestellt um antizipatorische Koartikulation zu untersuchen. Farbcode: Grün: E2, rot: E4, blau: E6. (Experiment 1)

Das erste Bewegungssegment ist das jeweils linke der abgebildeten Paare. Hier ist die Startposition jeweils gleich. Die aufgezeichneten Trajektorien lassen sich kaum unterscheiden. Im rechten der abgebildeten Paare (S1-E2/4/6, S2-E2/4/6 und S3-E2/4/6) gehen die Trajektorien auseinander, da hier jeweils unterschiedliche Endpositionen angesteuert werden. Eine Änderung der Trajektorien der ersten Bewegungssegmente in Vorbereitung

auf das nachfolgende Segment (antizipatorische Koartikulation) kann in dieser Abbildung nicht sicher gezeigt werden. Höchstens in Abbildung 3.7i unterschieden sich die aufgezeigten Trajektorien minimal.

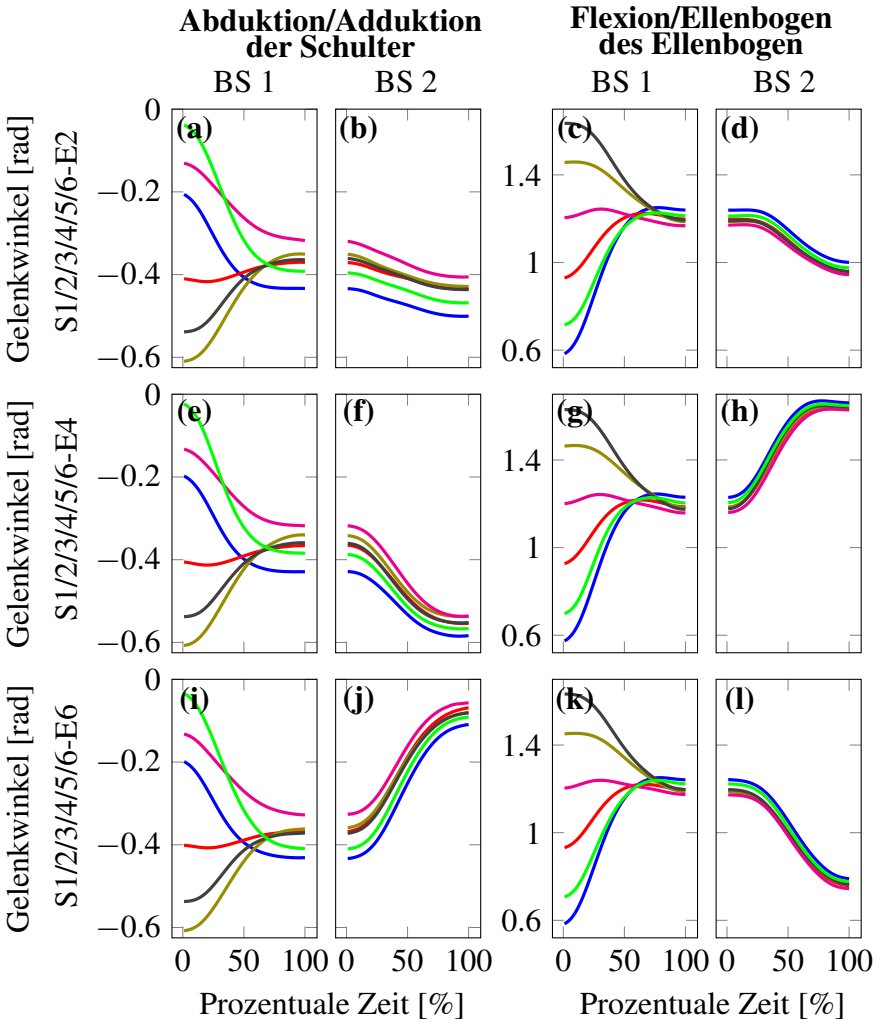

Abbildung 3.8: Über Probanden und Bedingungen gemittelte Gelenkwinkeltrajektorien der Winkel zur Abduktion/Adduktion der Schulter und Flexion/Extension des Ellenbogens sind für die Vergleiche S1/2/3/4/5/6-E2, S1/2/3/4/5/6-E4 und S1/2/3/4/5/6-E6 in Experiment 1 dargestellt und farblich codiert (blau: S1, rot: S2, olivgrün: S3, schwarz: S4, magenta: S5, grün: S6). Eine Abhängigkeit des Verlaufes vom ersten zum zweiten Bewegungssegment, welche im zweiten Bewegungssegment bestehen bleibt, ist sichtbar (carry-over Koartikulation).

Etwas anders sieht es dagegen bei der Untersuchung von carry-over Koartikulation aus. In Abbildung 3.8 sind ebenfalls die beiden Winkel Abduktion/Adduktion der Schulter und Flexion/Extension des Ellenbogens dargestellt. Der Verlauf dieser beiden Winkel über die Zeit für die verschiedenen Vergleichsgruppen (S1/2/3/4/5/6-E2, S1/2/3/4/5/6-E4,

S1/2/3/4/5/6-E6) zeigt recht gut die Nachverarbeitung vom ersten Bewegungssegment zum zweiten Bewegungssegment. Der Unterschied der Trajektorien der nach dem ersten Bewegungssegment am Zentrum C noch zwischen den Bedingungen besteht, setzt sich deutlich im zweiten Bewegungssegment fort. Dieser Unterschied bleibt über das gesamte zweite Bewegungssegment bestehen und scheint sich lediglich und in manchen Fällen etwas über die Zeit zu verringern. Ähnliche Verläufe finden sich auch für die anderen acht Gelenkwinkel, welche mit den obigen zwei Gelenkwinkelverläufen zusammen in Abbildung 5.2 des Anhangs zu finden sind. Insgesamt ist dies ein deutliches Zeichen für carry-over Koartikulation. Der Verlauf der Gelenkwinkeltrajektorien aus dem ersten Bewegungssegment hat einen Einfluss auf den Verlauf der Trajektorien im zweiten Bewegungssegment.

Bei der Analyse von Endeffektor- und Gelenkwinkeltrajektorien sollte man allerdings beachten, dass beide Trajektorienarten nicht unabhängig voneinander sind. Eine Änderung im Endeffektor geht zwangsläufig mit einer Änderung der Gelenkwinkel einher. Eine Trennung von Gelenkwinkelkonfigurationen in Konfigurationen, welche den Endeffektor beeinflussen und Konfigurationen, welche den Endeffektor nicht beeinflussen, kann mit Hilfe der UCM Methode und der daran angepassten MEQ Analyse durchgeführt werden. Eine solche Trennung erscheint auch im Hinblick auf die Hypothese der UCM sinnvoll. Diese besagt, wie anfangs erwähnt, dass das Nervensystem vor allem die Gelenkwinkelkonfigurationen regelt, welche für die jeweilige Aufgabe (Endeffektorposition bzw. Endeffektorposition plus zweidimensionale Orientierung des Endeffektors) relevant sind.

3.1.6 MEQ Analyse zur Koartikulationsdetektion

Es ist sehr aufwendig anhand von Endeffektor- und Gelenkwinkeltrajektorien den Einfluss von Koartikulation innerhalb des komplexen und redundanten Systems des Armes mit seinen zehn Freiheitsgraden systematisch zu untersuchen. Mit der MEQ Analyse kann das System systematisch anhand von Gelenkwinkelkonfiguration analysiert werden. Man unterscheidet hier zwischen Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable (Position des Endeffektors bzw. Position des Endeffektors und dessen zweidimensionale Orientierung) nicht beeinflussen und Konfigurationen, welche diese beeinflussen.

Um antizipatorische Koartikulation zu untersuchen, wird jeweils die Trajektorie der mittleren Gelenkwinkelkonfiguration im ersten Bewegungssegment (welche später zur Endposition E_i verläuft) mit der Trajektorie der mittleren Gelenkwinkelkonfiguration (welche später zur Endposition E_j verläuft) verglichen. Für den Vergleich wird der Differenzvektor

zu jedem Zeitpunkt berechnet und in den UCM-Unterraum und den dazu orthogonalen Raum (ORT-Unterraum) projiziert. Im UCM-Unterraum ist die Aufgabenvariable, z.B. die Endeffektorposition invariant. Im ORT-Unterraum variiert die Aufgabenvariable. Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionalität dieser beiden Unterräume (3 (3D-Hypothese) / 5 (3D+Ori2-Hypothse) DoF im ORT-Unterraum und 7 / 5 DoF im UCM-Unterraum) wird die Länge des Differenzvektors in jedem Unterraum durch die Anzahl der DoF geteilt und damit normalisiert. Daraus resultieren $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ (s. *2.6 Motorische Äquivalenz (MEQ)*). Ist $MEQ_{||}$ im Vergleich zu $MEQ_{\perp}$ hoch, würde dies zeigen, dass sich der Unterschied zwischen den verglichenen Bedingungen vorwiegend auf Gelenkwinkelebene abspielt - also, z.B. bei der 3D-Hypothese vor allem Gelenkwinkelkonfigurationen betrifft, welche die Endeffektorposition nicht beeinflussen. Motorische Äquivalenz wäre sichtbar. Ist dagegen besonders der Wert von $MEQ_{\perp}$ hoch, weist dies auf Gelenkwinkelkonfigurationen hin, welche zur Variation der Endeffektorposition führen. Koartikulation findet dann vorwiegend auf Ebene des Endeffektors statt. Sind sowohl $MEQ_{||}$ als auch $MEQ_{\perp}$ hoch, könnte damit Koartikulation auf beiden Ebenen gezeigt werden, auf Ebene der Gelenkwinkel und auf der Ebene des Endeffektors.

Abbildung 3.9 zeigt die Ergebnisse der MEQ Analyse für das erste Bewegungssegment und für die 3D- und 3D+Ori2-Hypothese. Hier wurden alle möglichen Vergleiche durchgeführt, welche auf antizipatorische Koartikulation hinweisen können. $MEQ_{||3D}$ liegt bei ca. 0,02 rad/DoF und $MEQ_{\perp 3D}$ bei 0,01 rad/DoF. In den meisten Vergleichen gilt $MEQ_{||3D} > MEQ_{\perp 3D}$. Nur in zwei Fällen (S6-E2/4 und S6-E4/E6) übertrifft $MEQ_{\perp 3D}$ kurzzeitig und ca. in der Mitte des Bewegungssegmentes $MEQ_{||3D}$. Den Anstieg von $MEQ_{\perp 3D}$ im mittleren Teil des Bewegungssegmentes ist in deutlich geringerem Maße auch bei den übrigen Vergleichen zu sehen. Dies könnte teilweise auch auf leichten zeitlichen Versatz der Einzelbewegungen zurückzuführen sein. Dieser wäre bei hohen Geschwindigkeiten und demnach in der Bewegungsmitte am stärksten ausgeprägt. Für $MEQ_{||3D+Ori2}$ sieht es ähnlich aus. $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt im Durchschnitt um 0,0060 rad/DoF höher als $MEQ_{\perp 3D}$. Insgesamt zeigt sich aber auch bei dieser Hypothese, dass $MEQ_{||3D+Ori2}$ über $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt. Ausnahme ist hier lediglich der Vergleich S6-E4/E6 in der Segmentmitte und der Vergleich S3-E2/E4, bei dem $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ tatsächlich über $MEQ_{||3D+Ori2}$ liegt.

Das zweite Bewegungssegment wird mit Hilfe der MEQ Analyse auf carry-over Koartikulation untersucht (Abbildung 3.10). Es wurden hierfür alle möglichen Vergleiche dargestellt. Hier übersteigt $MEQ_{||3D}$ zu jedem Zeitpunkt deutlich $MEQ_{\perp 3D}$. $MEQ_{||3D}$ reicht von 0,02 bis 0,06 rad/DoF und $MEQ_{\perp 3D}$ von 0,01 bis 0,02 rad/DoF . Auch hier ist, ähnlich zur

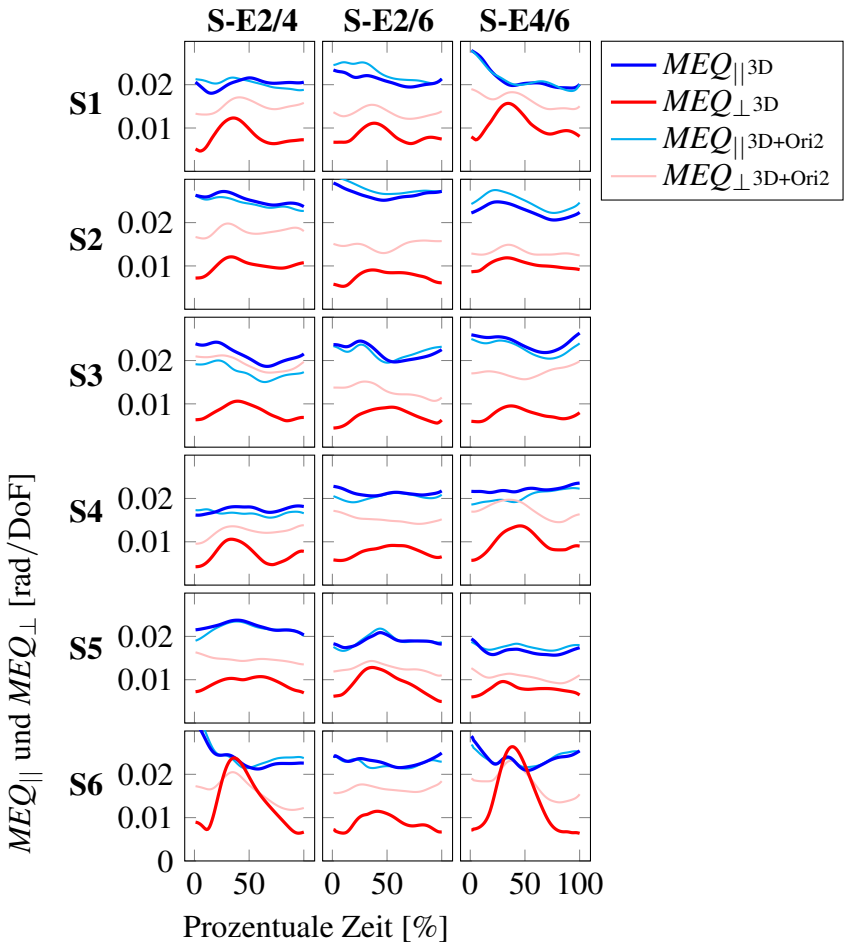

Abbildung 3.9: Über alle Probanden gemittelten Werte für $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ für alle möglichen Vergleiche zur Untersuchung von antizipatorischer Koartikulation sind für beide Hypothesen aufgelistet. Dargestellt ist jeweils das erste Bewegungssegment über die Zeit. Die Spalten beschreiben jeweils drei verschiedene Vergleiche und die dazugehörigen Startpositionen sind zu Beginn jeder Zeile angeschrieben - zumeist gilt $MEQ_{||} > MEQ_{\perp}$. (Experiment 1)

Analyse im ersten Bewegungssegment (Abbildung 3.9), für jeden Vergleich bei $MEQ_{\perp 3D}$ ein Maximum in der Mitte des Bewegungssegmentes zu sehen. Diese Spitze könnte wiederum auf einen leichten zeitlichen Versatz der Einzelbewegungen hindeutet. Ähnlich sieht es für $MEQ_{||3D+Ori2}$ und $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ uns, auch hier übersteigt $MEQ_{||3D+Ori2}$ konstant $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$. $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt jedoch auch ähnlich wie bei der MEQ Analyse des ersten Bewegungssegmentes immer etwas über $MEQ_{\perp 3D}$ (durchschnittlich 0,012 rad/DoF).

Vergleicht man die gesamten Ergebnisse der motorischen Äquivalenz-Analyse für antizipatorische Koartikulation (Abbildung 3.9) mit denen für carry-over Koartikulation (Abbildung 3.10), so zeigt sich nicht nur, dass die Werte von $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ im ersten

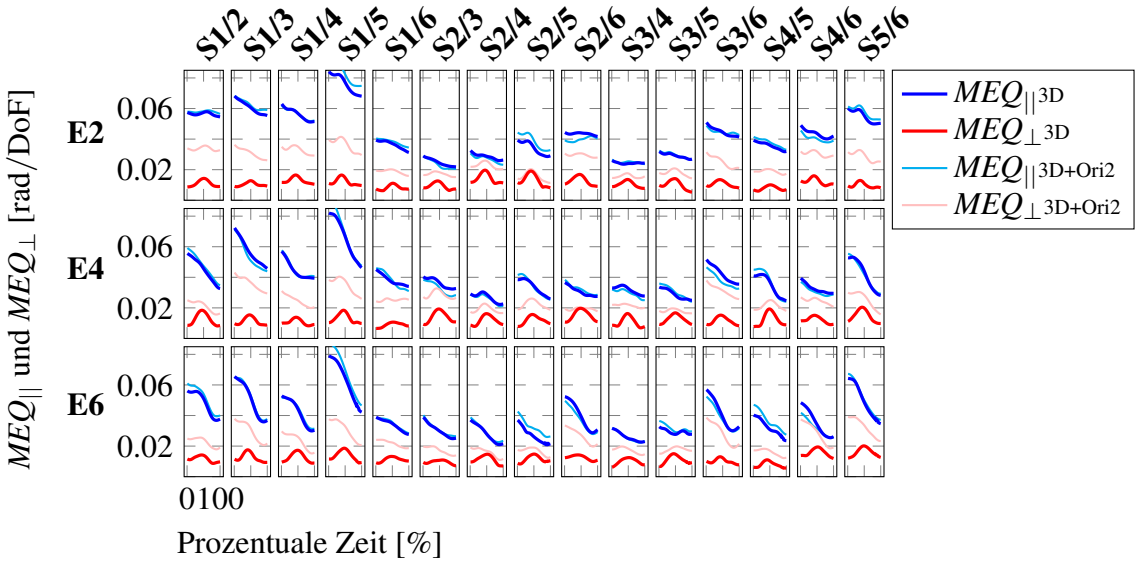

Abbildung 3.10: Über alle Probanden gemittelten Werte für $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$, für alle möglichen Vergleiche zur Untersuchung von carry-over Koartikulation, sind für beide Hypothesen aufgelistet. Dargestellt ist das zweite Bewegungssegment. Die Spalten beschreiben verschiedene Vergleiche. Die dazugehörigen Endpositionen sind zu Beginn jeder Zeile aufgelistet. Es gilt $MEQ_{||} > MEQ_{\perp}$. (Experiment 1)

Fall kleiner sind, sondern auch, dass der Abstand zwischen den beiden Komponenten im ersten Fall geringer ist. Insgesamt zeigen sich hier nur schwache Anzeichen für antizipatorische Koartikulation auf beiden Ebenen, wobei carry-over Koartikulation besonders auf der Ebene der Gelenkwinkel ($GWK_{||}$) zu finden ist. Besonders letzteres konnte bereits im Hinblick auf die Analyse der Gelenkwinkeltrajektorien in Abbildung 3.8 vermutet werden.

3.1.7 Untersuchung des Bias innerhalb der MEQ Analyse

Die MEQ Analyse berechnet die Differenz zwischen den Mittelwerten zweier Bewegungs-Bedingungen. Die Differenz wird in $\Delta\theta_{||}$ und $\Delta\theta_{\perp}$ unterteilt, welche parallel (UCM-Unterraum) bzw. orthogonal (ORT-Unterraum) zum Nullraum liegen. Abbildung 3.11 zeigt dies in einer vereinfachten zweidimensionalen Darstellung für zwei Bedingungen. Neben den zwei Datensätzen und ihren Mittelwerten erkennt man deren Projektion parallel $\Delta\theta_{||}$ und orthogonal $\Delta\theta_{\perp}$ zur Mannigfaltigkeit (linearisierter Bereich). Aus $\Delta\theta_{||}$ und $\Delta\theta_{\perp}$ werden durch Normierung bezüglich der jeweiligen Dimensionen die beiden Komponenten $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$.

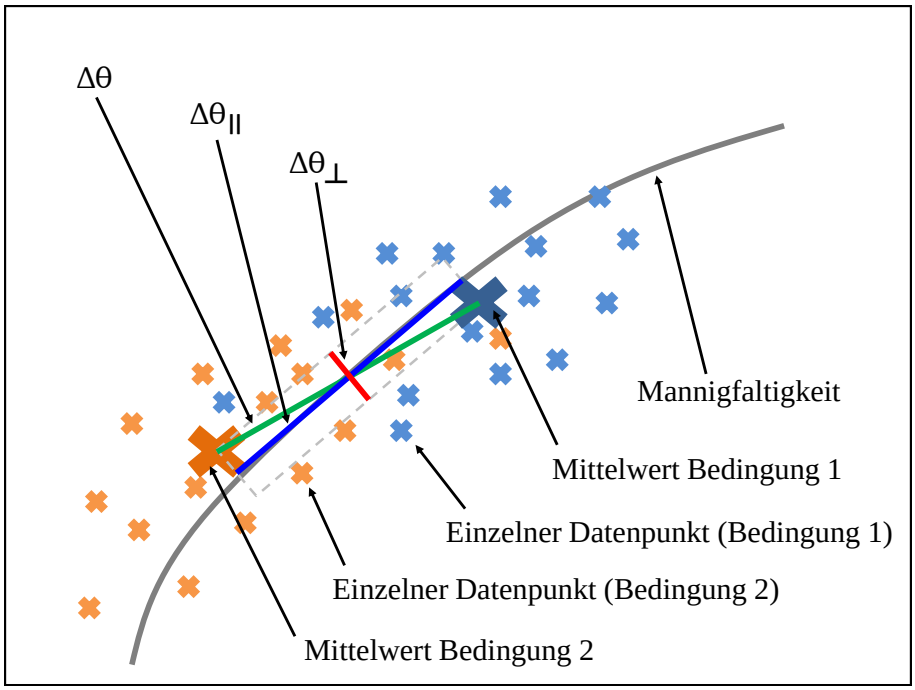

Abbildung 3.11: Auf zwei Dimensionen reduzierte Skizze zweiter möglicher Datensätze. Die Differenz der Mittelwerte beider Datensätze ist für die dargestellten Mannigfaltigkeit auf die beiden Unterräume UCM und ORT aufgeteilt ($\Delta\theta_{\parallel}$ und $\Delta\theta_{\perp}$).

Abbildung 3.12 stellt Obiges, mit angenommener Normalverteilung, aus Gründen der Übersicht nur 1-dimensional dar. Die Varianz der jeweiligen Bedingung geht aus der Breite der jeweiligen Glockenkurve hervor. Die dazugehörigen Mittelwerte sind über die Werte μ_1 und μ_2 gekennzeichnet. Die dritte und grün dargestellte Glockenkurve mit dem Mittelwert μ_{Diff} stellt die Differenz aus beiden Bedingungen dar und hat dementsprechend eine höhere Varianz, da sich die Varianzen beider Bedingungen addieren. Es gilt:

$$\mu_1 - \mu_2 = \mu_{Diff} \tag{3.1}$$

Ist μ_{Diff} ungleich 0 so unterscheiden sich beide Bedingungen voneinander.

Was bei der MEQ Analyse aber tatsächlich gemessen wird ist nicht μ_{Diff} sondern ein Wert, den ich hier als $\mu_{Diff}{}^*$ bezeichne. Über den Vergleich von Mittelwerten kann in diesem Fall nur eine positive Länge gemessen werden. Abbildung 3.13 zeigt den Unterschied zwischen μ_{Diff} und $\mu_{Diff}{}^*$. Die Verteilung der Differenz zwischen den beiden Bedingungen aus Abbildung 3.12 (grüne Kurve) ist 1-dimensional anhand einer normalverteilten Kurve dargestellt. Über die Kurve wird μ_{Diff} ermittelt. Werden nun alle negativen Werte

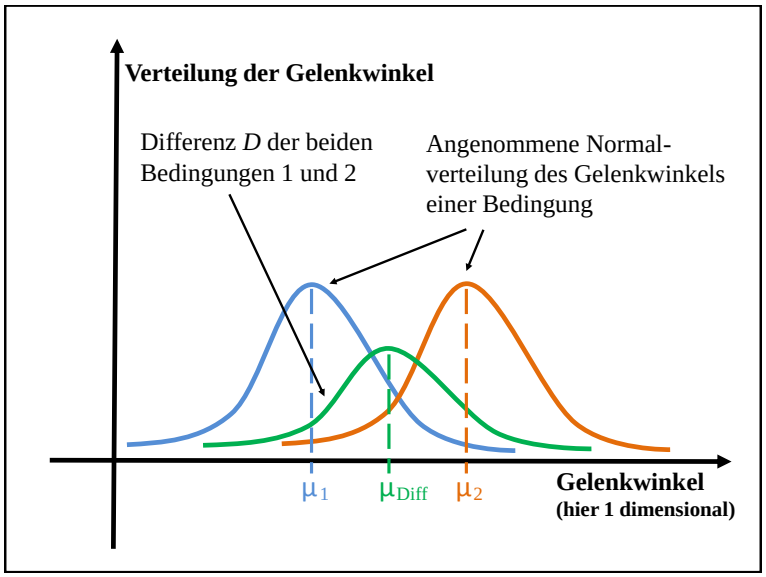

Abbildung 3.12: Auf eine Dimension reduzierte Skizze der Verteilung der Gelenkwinkel(-konfigurationen) zweier Bedingungen mit angenommener Normalverteilung und ihrer Differenz *D*.

als positive Längen gemessen, so ändert sich die Verteilung von der hellgrünen zur dunkelgrün dargestellten Kurve. Der Mittelwert $\mu_{Diff}{}^*$ dieser Kurve ist im Bezug zu μ_{Diff} nach rechts verschoben. Die Differenz zwischen μ_{Diff} und $\mu_{Diff}{}^*$ ergibt das Bias, das bei der MEQ Berechnung entstehen kann.

Die Größe des Bias ist von folgenden Komponenten abhängig und in Abbildung 3.14 graphisch dargestellt:

- **Unterschied zwischen den Vergleichsbedingungen:** Je größer die Differenz zwischen den Bedingungen, desto kleiner das Bias, da der negative Bereich der Verteilungskurve schrumpft (Abbildung 3.14a-c).
- **Varianz:** Die Varianz der beiden Bedingungen ist von Bedeutung. Je größer die Varianz, desto breiter ist ihre Verteilungskurve. Dadurch kann sich der ins Negative reichende Bereich der Kurve vergrößern, ohne dass sich dabei deren Mittelwert μ verschiebt (Abbildung 3.14d).

$\mu_{Diff}{}^*$ wird nun in die beiden Unterräume UCM und ORT unterteilt. Genau an dieser Stelle muss aber die Abhängigkeit des Bias von der Varianz beachtet werden. Die UCM Varianzanalyse von Experiment 1 (Abbildung 3.4) zeigt einen deutlichen UCM-Effekt ($V_{||} > V_{\perp}$) für alle 18 gemessenen Bedingungen. Dementsprechend könnte dann auch $MEQ_{||}$ stärker als $MEQ_{\perp}$ vom Bias betroffen sein. Dies trifft vor allem zu, wenn die

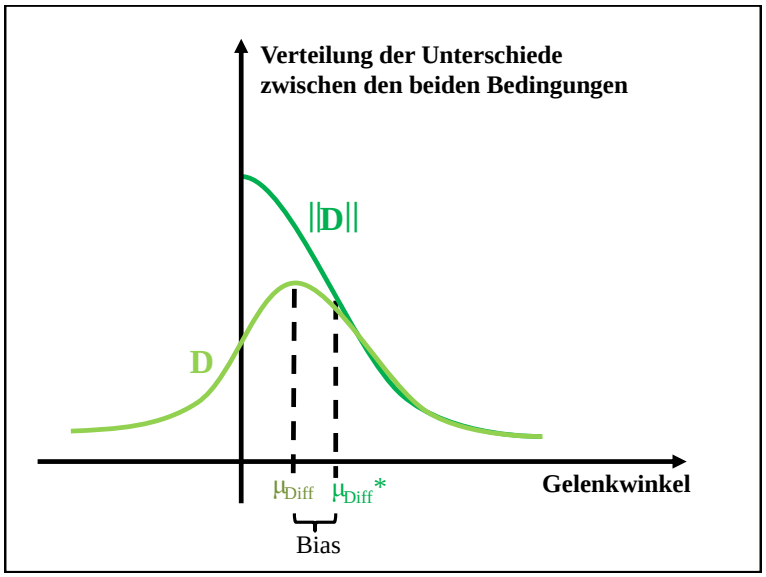

Abbildung 3.13: Verteilungskurve D (Differenz aus Bedingung 1 und 2) mit dem Mittelwert μ_{Diff} und $||D||$ sind abgebildet. Die Kurve $||D||$ wurde an der 0-Linie der Y-Achse gefaltet und enthält keine negativen Werte. Nur der Mittelwert dieser Kurve $\mu_{Diff}{}^*$ kann durch die MEQ Analyse ermittelt werden. Das Bias ist die Differenz zwischen μ_{Diff} und $\mu_{Diff}{}^*$.

Unterschiede zwischen beiden Bedingungen gering sind, was das Bias für $MEQ_{\perp}$ und auch $MEQ_{||}$ noch weiter vergrößert.

Um die MEQ Ergebnisse trotz dieses Bias sinnvoll zu interpretieren, werden hier drei Lösungsmöglichkeiten aufgestellt:

Die erste Möglichkeit beschreibt eine experimentelle Ermittlung des Bias. Jede Bedingung eines Experimentes muss zweimal mit der gleichen Anzahl an Wiederholungen durchgeführt werden (Bedingung C1 und C1'). Eine Normalverteilung der ermittelten Werte wird angenommen. Über den Vergleich von Bedingung C1 und Bedingung C1' kann das Bias geschätzt werden. Er entspricht hier dem Wert $\mu_{Diff}{}^*$ und sollte im Idealfall $\mu_{Diff}{}^*$ beim Vergleich von Bedingung C2 und C2' entsprechen. Bei größeren Abweichungen ist das Ergebnis nicht mehr aussagekräftig. Das so geschätzte Bias kann beim Vergleich von Bedingung C1 und C2 vom Ergebnis abgezogen werden. Um mit diesem Lösungsweg genaue Ergebnisse zu erzielen, ist jedoch eine relativ hohe Anzahl von Wiederholungen pro Bedingung erforderlich.

Die zweite Möglichkeit ist es das Bias über die Varianz zu schätzen. Das Bias ist sowohl von der Größe der Varianz als auch von der Differenz zwischen den Bedingungen abhängig. Der Teil, der von der Differenz zwischen den beiden Bedingungen herrührt, kann

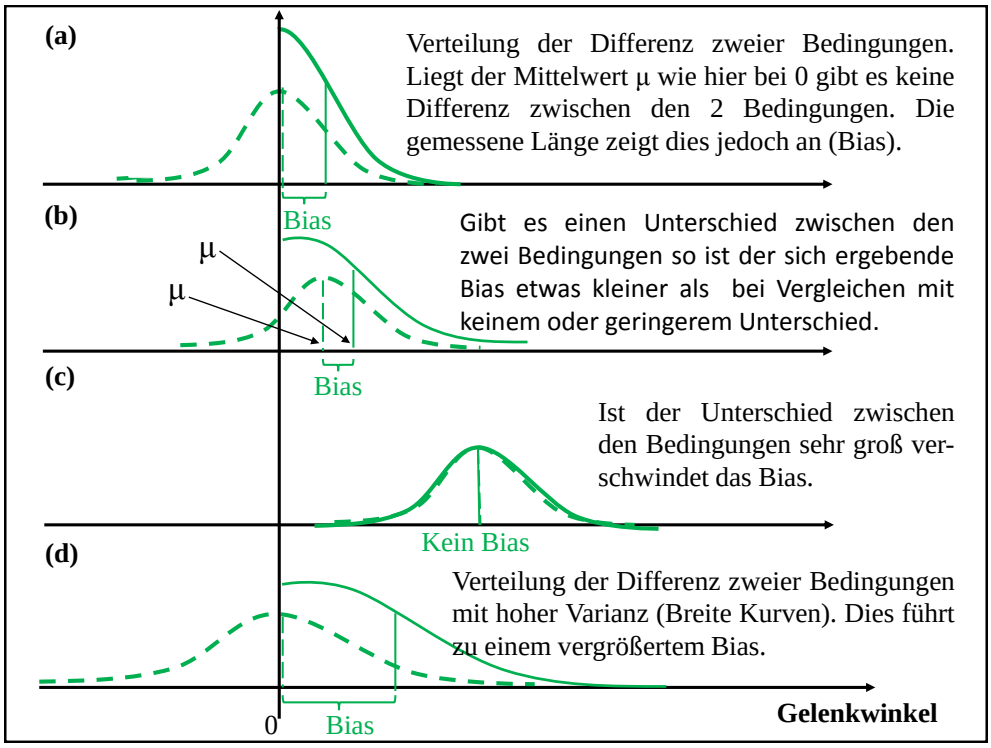

Abbildung 3.14: (a) Bias, wenn kein Unterschied zwischen den beiden Vergleichsbedingungen vorhanden ist. (b) Bias, wenn nur ein kleiner Unterschied zwischen beiden Bedingungen auftritt. (c) Es entsteht kein Bias, wenn zwischen den Vergleichsbedingungen ein sehr großer Unterschied besteht. (d) Vergrößerung des Bias, bei zunehmender Varianz und gleichem Mittelwert μ_{Diff}.

kaum geschätzt werden, da diese Differenz überhaupt erst durch die hier durchgeführten Experimente gemessen werden soll. Den Teil, der von der Varianz abhängt, kann jedoch geschätzt werden. Da sich die Varianzen für jeden Probanden unterscheiden, ist es sinnvoll die Schätzung für jeden Probanden einzeln durchzuführen. Hierfür kann die Differenz zwischen zufälligen Paaren aus den Probandendatensätzen von Bedingung C1 und C2 gemessen werden. Hierdurch erhält man ein Histogramm zur Differenz zwischen den Bedingungen unter Berücksichtigung der Varianz ($\mu_{Diff,\ Varianzgeschätzt}$, Abbildung 3.15). Eine Berechnung des Bias ist auf Grund der Mehrdimensionalität der Daten kaum möglich. Das Bootstrap-Verfahren erlaubt es jedoch durch eine hohe Anzahl solcher Vergleiche („bootstrap samples“) den Mittelwert zu schätzen. Das Verfahren wird für Daten in den Unterräumen UCM und ORT durchgeführt. Die so ermittelbaren Werte $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ können mit den im ursprünglichen Verfahren ermittelten Werten verglichen werden. Ihre Differenz ist das durch die Varianz begründete Bias. Der Teil des Bias, welcher durch den Unterschied beider Bedingungen (Abbildung 3.14a-c) induzierte wurde, bleibt erhalten.

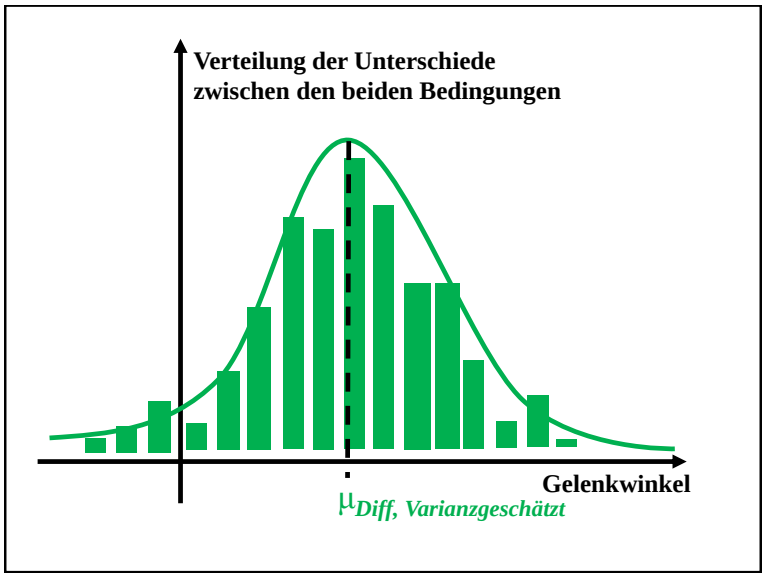

Abbildung 3.15: Geschätzte Verteilungskurve *D* der Differenz zwischen den beiden Bedingungen, welche mit Hilfe des Bootstrap-Verfahrens analysiert werden können.

Die dritte Möglichkeit MEQ weitgehend unabhängig vom beschriebenen Bias zu betrachten, wird über eine statistische Analyse erreicht. Hierbei wird der Vergleich zwischen den Bedingungen direkt über die mehrdimensionalen Gelenkwinkelkonfigurationen der beiden Unterräume UCM und ORT (ohne Bias) berechnet. Für jeden möglichen Vergleich wird daher eine multivariante Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt. Es wird untersucht in welchem Maß sich die Differenzvektoren der Gelenkwinkelkonfigurationen innerhalb der beiden Unterräume signifikant unterscheiden. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen zwei Möglichkeiten muss hier weder die Anzahl der Messungen/Wiederholungen erhöht werden, noch beschränkt man sich auf den durch Varianz begründeten Teil des Bias. Die nachfolgenden Experimente werden daher mit dieser dritten Methode genauer analysiert. Die genaue Vorgehensweise wird im nachfolgenden Abschnitt genauer beschrieben.

3.1.8 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz

Für die statistische Analyse werden die Gelenkwinkel in den UCM und den ORT-Unterraum projiziert. Man unterscheidet demnach Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable nicht beeinflussen ($GWK_{||}$) und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable beeinflussen ($GWK_{\perp}$). Diese Vektoren werden als abhängige Variablen durch MANOVAs analysiert. Als Aufgabenvariable wird einerseits die dreidimensionale Position des Endeffektors bezeichnet (3D-Hypothese). Parallel

dazu werden alle Daten auf eine weitere mögliche Aufgabenvariable untersucht - die dreidimensionale Position des Endeffektors kombiniert mit der für den Endeffektor relevanten zweidimensionalen Orientierung (3D+Ori2-Hypothese). Es ist zu beachten, dass die Richtungen, welche die UCM- und ORT-Unterräume definieren, zwischen den verschiedenen Probanden variieren. Daher muss für jeden Probanden eine gesonderte MANOVA durchgeführt werden. Für die Analyse von antizipatorischer Koartikulation wurden MANOVAs für jeden Probanden, fünf Zeitpunkte (1, 25, 50, 75 und 100 % des ersten Bewegungssegmentes) und für jede der sechs Startpositionen S1 bis S6 durchgeführt. Der Faktor war die Endposition aus dem zweiten Bewegungssegment E2, E4 oder E6. Zur Berechnung von carry-over Koartikulation wurden entsprechende MANOVAS für jeden Probanden, fünf Zeitpunkte aus dem zweiten Bewegungssegment (1, 25, 50, 75 und 100 %) und jede der drei Endpositionen E2, E4 und E6 durchgeführt. Der Faktor war in diesem Fall die Startposition S1 bis S6 aus dem ersten Bewegungssegment. Die P-Werte wurden mit der Bonferroni Korrektur angepasst und der Wert Alpha wurde auf $P = 0{,}05$ gesetzt.

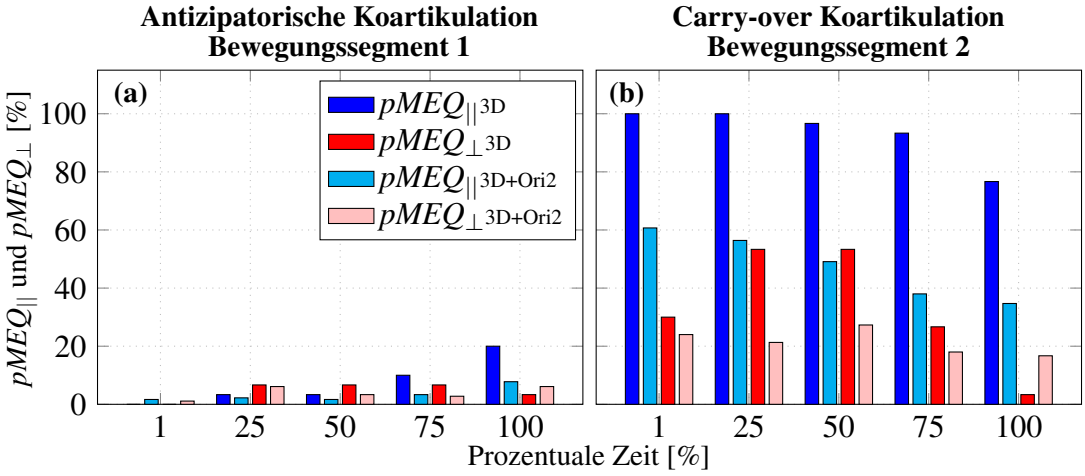

Abbildung 3.16: (a) $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ weisen im ersten Bewegungssegment kaum auf antizipatorische Koartikulation hin. (b) Im zweiten Bewegungssegment kann jedoch carry-over Koartikulation (besonders auf Gelenkwinkelebene, s. $MEQ_{||}$) deutlich gezeigt werden. $pMEQ_{||}{}^{3D}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ fallen meist stärker aus als die entsprechenden Komponenten der 3D+Ori2-Hypothese. (Experiment 1)

In Abbildung 3.16a und b ist der Prozentsatz der signifikant positiven Ergebnisse für die einzelnen Zeitpunkte aufgetragen. Liegt zum Beispiel einer dieser Werte für einen Zeitpunkt bei 100 %, so bedeutet dies, dass für alle möglichen Vergleiche aller Probanden entsprechend signifikante Unterschiede zu diesem Zeitpunkt gemessen wurden. Liegt der Wert dagegen bei 0 %, so gilt dies für keinen der Vergleiche irgendeines Probanden.

Dieser Prozentsatz wird im Folgenden mit $pMEQ_{||}$ bzw. $pMEQ_{\perp}$ beschrieben. Für die 3D-Hypothese bedeutet dies, dass $pMEQ_{||}$ die Ebene der Gelenkwinkel, d.h. Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition nicht beeinflussen, beschreibt und $pMEQ_{\perp}$ die Ebene des Endeffektors beschreibt, also hier Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition beeinflussen. Bei der 3D+Ori2-Hypothese ist die Aufgabenvariable die Endeffektorposition plus die zwei für den Zylinder relevanten Orientierungen im Raum. Es ist in der Abbildung sofort ersichtlich, dass antizipatorische Koartikulation auf Gelenkwinkelebene ($pMEQ_{||}$) und auf Endeffektorebene ($pMEQ_{\perp}$) sehr gering ausfallen (Abbildung 3.16a). Dagegen finden sich deutlich größere Effekte für carry-over Koartikulation (Abbildung 3.16b). $pMEQ_{||}$ im ersten Bewegungssegment, was auf antizipatorische Koartikulation hinweist, steigt bei der 3D-Hypothese von 0 % auf immerhin 20,00 % (Abbildung 3.16a). Der kleine Anstieg erfolgt allerdings auch erst zum Ende des Bewegungssegmentes. $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ dagegen bleibt über die Zeit zwischen 0 % und 6,67 %. Für die 3D+Ori2-Hypothese liegt der höchste Wert dagegen für $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ nur bei 7,78 %.

Carry-over Koartikulation ist deutlich auffälliger (Abbildung 3.16b). $pMEQ_{||}{}^{3D}$ liegt zu den ersten Zeitpunkten 1 % und 25 % noch bei 100 % und sinkt dann langsam bis 76,67 %. Carry-over Koartikulation auf der Ebene des Endeffektors ($pMEQ_{\perp}{}^{3D}$) fällt im Vergleich dazu deutlich geringer aus und liegt zwischen 3,33 % und 53,33 %. $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ fallen hier bis auf eine Ausnahme ($pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ bei Zeitpunkt 100 %) geringer aus als die entsprechenden Werte der 3D-Hypothese. Im Durchschnitt liegt die Differenz bei 45,6 % ($pMEQ_{||}{}^{3D} - pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$) bzw. bei 11,9 % ($pMEQ_{\perp}{}^{3D} - pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$).

3.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 1

Innerhalb dieses Experimentes wurde das Verhalten bei einer Punkt-zu-Punkt-Bewegung mit zwei Bewegungssegmenten (Zweier-Sequenz) untersucht.

Die Varianzanalyse der einzelnen Bedingungen zeigt innerhalb der 3D-Hypothese einen deutlichen UCM-Effekt. Innerhalb einer Bewegung ist die Varianz der Gelenkwinkelkonfigurationen höher, welche den Pfad des Endeffektors nicht verändern. Gelenkwinkelkonfigurationen, welche Einfluss auf den Endeffektor nehmen, scheinen stärker kontrolliert zu werden ($V_{||} > V_{\perp}$). Auch für die 3D+Ori2-Hypothese lässt sich ein guter UCM-Effekt erkennen. $V_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ ist jedoch im Vergleich zu $V_{\perp}{}^{3D}$ erhöht und dies zeigt sich über alle Bedingungen und den gesamten Zeitraum. $V_{||}$ zeigt dagegen für beide Hypothesen einen

ähnlichen Verlauf und ähnliche Werte. Beides spricht dafür, dass der UCM-Effekt nicht grundsätzlich auf der (zweidimensionalen) Endeffektor-Orientierung beruht.

Es ist sehr schwierig ein redundantes System wie den Arm nur anhand von Trajektorien sinnvoll zu analysieren. Mit Hilfe der MEQ Methode ist es möglich Koartikulation, den Einfluss eines Bewegungssegments auf benachbarte Segmente, strukturiert zu untersuchen. Das Bias, das beim Vergleich von sehr ähnlichen Bedingungen auftritt, wird durch eine statistische Analyse der Gelenkwinkelkonfigurationen unter Einbeziehung von MANOVAs berücksichtigt. Es konnten kleine Effekte von antizipatorischer Koartikulation, sowohl auf der Ebene des Endeffektors ($pMEQ_{\perp}$) als auch auf der Ebene der Gelenkwinkel ($pMEQ_{||}$) beschrieben werden. Es erscheint jedoch sinnvoll diese Effekte durch weitere Experimente zu verifizieren. Carry-over Koartikulation ließ sich dagegen gut für das zweiten Bewegungssegment nachweisen. Besonders die Werte $pMEQ_{||}$ fielen hier relativ groß aus. Diese Effekte fallen für die 3D+Ori2-Hypothese, vor allem im Bezug auf carry-over Koartikulation, jedoch etwas geringer aus als bei der 3D-Hypothese.

Es zeigt sich, dass richtungsabhängige Koartikulation anhand dieses Experimentaufbaues gut untersucht werden kann. Um zusätzlich antizipatorische und carry-over Koartikulation gut miteinander vergleichen zu können, erscheint es jedoch sinnvoll den Aufbau so zu verändern, dass die Anzahl an Vergleichsbedingungen für beide Koartikulationsarten gleich ist. Auch ist es möglich, dass das Auftreten antizipatorische Koartikulation durch den gewählten Versuchsablauf unterdrückt wurde. Der Proband wurde dazu angehalten das Objekt sofort nach Bekanntgabe der verschiedenen Zielpositionen zu bewegen. Dadurch könnte die Anpassung auf die gesamte Bewegungssequenz, besonders zu Anfang der Bewegung, stark eingeschränkt sein. Ebenso bestand für den Probanden keine direkte Notwendigkeit den kompletten Bewegungspfad vor Beginn bzw. innerhalb des ersten Bewegungssegmentes zu registrieren, da alle Zielpositionen bis zum Schluss für den Probanden sichtbar blieben. Es zeigt sich, dass richtungsabhängige Koartikulation anhand dieses Experimentaufbaues gut untersucht werden kann. Um zusätzlich antizipatorische und carry-over Koartikulation gut miteinander vergleichen zu können, erscheint es jedoch sinnvoll den Aufbau so zu verändern, dass die Anzahl an Vergleichsbedingungen für beide Koartikulationsarten gleich ist. Auch ist es möglich, dass das Auftreten antizipatorische Koartikulation durch den gewählten Versuchsablauf unterdrückt wurde. Der Proband wurde dazu angehalten das Objekt sofort nach Bekanntgabe der verschiedenen Zielpositionen zu bewegen. Dadurch könnte die Anpassung auf die gesamte Bewegungssequenz, besonders zu Anfang der Bewegung, stark eingeschränkt werden. Ebenso besteht für den Probanden keine direkte Notwendigkeit den kompletten Bewegungspfad vor Beginn bzw.

innerhalb des ersten Bewegungssegmentes zu registrieren, da alle Zielpositionen bis zum Schluss für den Probanden sichtbar bleiben.

3.2 Experiment 2a, 2b und 2c

In diesem Experiment wird darauf Wert gelegt, dass sowohl antizipatorische Koartikulation als auch carry-over Koartikulation in ähnlichem Maße auftreten könnten. Ein Vergleich beider Koartikulationsarten innerhalb eines Experimentes bzw. innerhalb eines ähnlichen Versuchsaufbaues soll Rückschlüsse auf die Natur der dahinter stehenden motorischen Regelung ermöglichen. Koartikulation wird wiederum anhand einer aus zwei Sequenzen bestehenden Bewegung in einem richtungsabhängigen Kontext untersucht.

Experiment 2a untersucht detailliert beide Arten der Koartikulation. In Experiment 2b und c werden Ergebnisse zur antizipatorischen Koartikulation, welche in Experiment 2a gefunden wurden, nochmals gesondert untersucht. Hierbei werden Versuche mit besonders vielen Wiederholungen, aber weniger Bedingungen, analysiert.

3.2.1 Versuchsaufbau

Fünf Frauen und fünf Männer zwischen 22 und 35 Jahren ($\mu = 27$, $SD = \pm 4{,}53$) nahmen an Experiment 2a teil. Weitere fünf Frauen und fünf Männer zwischen 20 und 33 Jahren ($\mu = 26$, $SD = \pm 4{,}46$) nahmen an Experiment 2b teil und zwei Frauen sowie acht Männer zwischen 25 und 34 Jahren ($\mu = 29$, $SD = \pm 3{,}05$) waren Teilnehmer in Experiment 2c. Alle waren gesund, rechtshändig (nach eigenen Angaben) und, bis auf einen Teilnehmer in Experiment 2c, naiv im Hinblick auf den Zweck des Versuches.

Anders als in Experiment 1 bestand der Aufbau nur noch aus fünf verschiedenen, kreisförmigen Zielpositionen. Es gab neben der zentralen Position C noch vier weitere Positionen, welche mit einem Abstand von 15 cm zum Zentrum C (gemessen vom Mittelpunkt zum Mittelpunkt) kreuzförmig und parallel zu den Monitorachsen ausgerichtet waren (Abbildung 3.17). Der Durchmesser jeder Zielposition betrug wie auch in ersten Experiment 6 cm.

Experiment 2a bestand aus 16 verschiedenen Bedingungen. Die äußeren vier Positionen waren sowohl mögliche Startpositionen (S1-S4) als auch mögliche Endpositionen (E1-E4). Der zentrale Kreis stellte, wie bereits im vorherigen Experiment, wieder die zeitlich

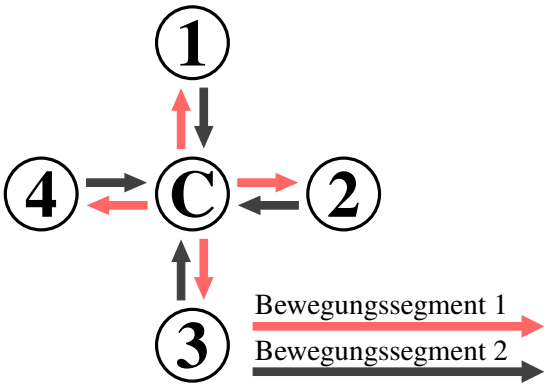

Abbildung 3.17: Versuchsaufbau: Probanden bewegten ein zylindrisches Objekt von einer der vier äußeren Zielpositionen 1-4 (Experiment 2a) bzw. von Zielposition 3 (Experiment 2b und 2c) zum Zentrum C (erstes Bewegungssegment) und von dort weiter zu einer der vier äußeren Zielpositionen 1-4 (zweites Bewegungssegment).

mittlere Zielposition dar. Jede Bedingung wurde innerhalb des Versuches 12-mal wiederholt ($N = 12$). Ein Probandensatz enthielt demnach 192 Durchgänge, welche in pseudorandomisierter Reihenfolge dargestellt wurden.

Die Experimente 2b und 2c enthielten ebenfalls alle hier aufgelisteten fünf Zielpositionen. Im Unterschied zu Experiment 2a war die direkt vor den Probanden liegende Zielposition 3 (Abbildung 3.17) die alleinige Startposition (S3). Demzufolge gab es hier also nur 4 verschiedene Bedingungen. Jede Bedingung wurde pro Proband 50-mal in pseudorandomisierter Reihenfolge dargestellt. Jeder Probandensatz enthielt somit 200 Durchgänge.

In Experiment 2a kann im gleichen Maße antizipatorische Koartikulation im ersten Bewegungssegment sowie carry-over Koartikulation im zweiten Bewegungssegment analysiert werden. Innerhalb des Experimentes 2b bzw. 2c lässt sich lediglich antizipatorische Koartikulation im ersten Bewegungssegment untersuchen. Der Vorteil ist hierbei jedoch, dass 50 Wiederholungen möglich waren, obwohl die Experimente ähnlich wie Experiment 2a nur ca. 1,5 Stunden dauerten. Somit war auch hier noch nicht mit größeren Ermüdungserscheinungen zu rechnen.

Desweiteren wurde in jedem dieser drei Experimente darauf geachtet, dass der Proband Zeit hatte alle nachfolgenden Positionen des kommenden Durchlaufes nach Positionierung des Objektes auf der Startposition zu sehen. Zusätzlich wurde mit diesem Versuchsaufbau sichergestellt, dass der Proband sich diese Position auch merkte. Dazu wurde die Durchführung eines Durchganges (Abbildung 3.18) zu Experiment 1 leicht verändert.

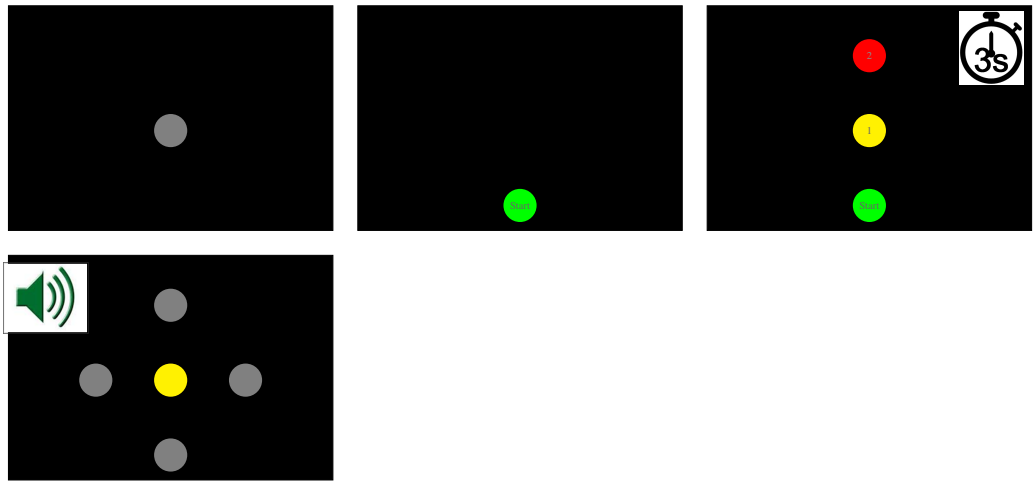

Abbildung 3.18: Abfolge eines Durchganges: (Bild oben links) Das Objekt wurde zunächst mittig auf dem grauen Kreis platziert und festgehalten. (Bild oben Mitte) Startposition wurde in grün angezeigt und der Proband platzierte das Objekt dort. (Bild oben rechts) Die Zielpositionen Zentrum C (gelb) und Endposition (rot) wurden für 3 Sekunden dargestellt. (Bild unten links) Alle möglichen Endpositionen wurden in Experiment 2a und b in grauer Farbe dargestellt, das Zentrum C in Gelb. Bei Experiment 2c wurde dem Probanden hier lediglich ein schwarzer Bildschirm gezeigt. Der Proband bewegte nun nach einem Ton das Objekt zu den vorher angegebenen Zielpositionen.

Vor Beginn jedes Durchlaufes wurde ein grauer Kreis an der Position des Zentrums C gezeigt. Nachdem der Proband das Objekt dort platziert hatte, durfte er den Griff am Objekt, wie auch bereits bei Experiment 1, nicht mehr verändern (Abbildung 3.18 links oben). Dann stellte der Proband das Objekt auf die nun angezeigte grüne Startposition, welche mit dem Wort „Start“ markiert war (Abbildung 3.18 oben Mitte). Im nächsten Schritt wurden für drei Sekunden auf dem Bildschirm alle für diesen Durchgang nötigen Zielpositionen in den Farben grün, gelb (markiert mit der Nummer 1) und rot (markiert mit der Nummer 2) abgebildet (Abbildung 3.18, oben rechts). Nach Ablauf dieser Zeitspanne wurde das Bild durch ein neues ersetzt. Hier unterschieden sich Experiment 2a und b (Abbildung 3.18 unten links) von Experiment c. Bei ersteren wurden nun alle möglichen Endpositionen E1-E4 als graue Kreise auf dem Bildschirm abgebildet. Das Zentrum C behielt seine gelbe Farbe. Bei Experiment 2c wurde lediglich ein schwarzer Bildschirm dargestellt. Es gab nun keine visuellen Hinweise mehr über die Zielpositionen. Der weitere Verlauf der verschiedenen Experimente blieb gleich. Es ertönte nun ein Signalton. Danach begann der Proband mit seiner Bewegung zu den vorher gezeigten Positionen. Diese Bewegung wurde von den Kameras aufgezeichnet. Danach erschien wieder der graue Kreis aus Abbildung 3.18 (oben links) und ein neuer Durchgang begann.

Alle ermittelten Daten wurden in Bezug auf ihre Vollständigkeit kontrolliert. Durch verdeckte Marker, Reflexionen, falsch erinnerte Zielpositionen oder Ähnliches konnte es hierbei zu Ausfällen kommen. 9.16% der Trajektorien aus den Experimenten 2a, 2b und 2c konnten daher nicht für die Analyse verwendet werden.

3.2.2 Kinematische Analyse der Bewegungen - Experiment 2a, 2b und 2c

In Experiment 2a brauchten die Probanden im Durchschnitt für das erste Bewegungssegment 0,55 s mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,34 m/s ($SD = \pm 0{,}036$ m/s). Die maximale Geschwindigkeit (über Probanden gemittelt) in diesem Segment lag bei 0,59 m/s ($SD = \pm 0{,}069$ m/s). Für das zweite Bewegungssegment wurden durchschnittlich 0,53 s gebraucht. Die mittlere Geschwindigkeit lag bei 0,33 m/s ($SD = \pm 0{,}033$ m/s) und die maximale Geschwindigkeit bei 0,56 m/s ($SD = \pm 0{,}057$ m/s). Die Geschwindigkeitsverläufe sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

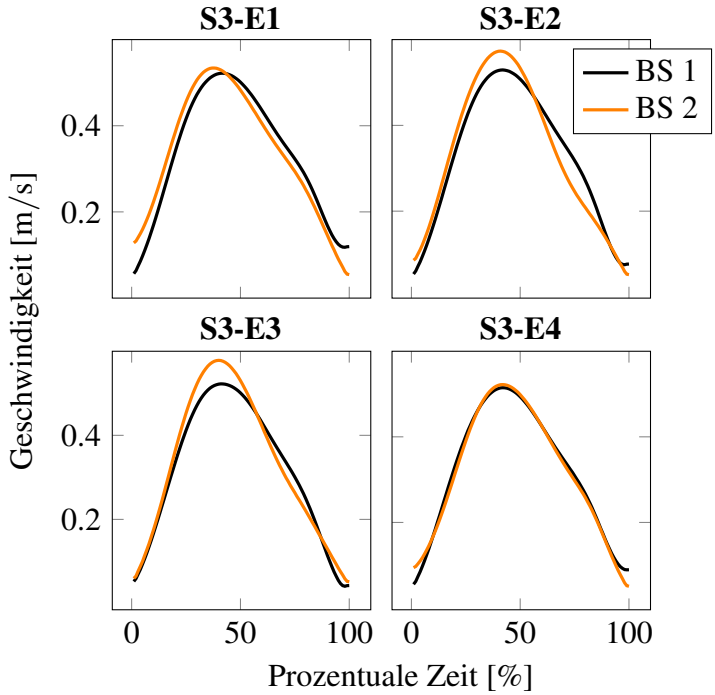

Abbildung 3.19: Gaußförmiges Geschwindigkeitsprofil des ersten (BS 1) und zweiten (BS 2) Bewegungssegmentes für vier typische Bedingungen. (Experiment 2a)

Für das Experiment 2b wurde eine durchschnittliche Zeit von 0,58 s für das erste und eine Zeit von 0,57 s für das zweite Bewegungssegment gemessen. Die Durchschnitts-

geschwindigkeit über die beiden Segmente lag bei 0,30 m/s ($SD = \pm 0{,}029$ m/s) bzw. 0,30 m/s ($SD = \pm 0{,}034$ m/s) mit einem Geschwindigkeitsmaximum bei 0,54 m/s ($SD = \pm 0{,}053$ m/s) bzw. 0,53 m/s ($SD = \pm 0{,}060$ m/s). Die Geschwindigkeitsverläufe sind in Abbildung 3.20 dargestellt.

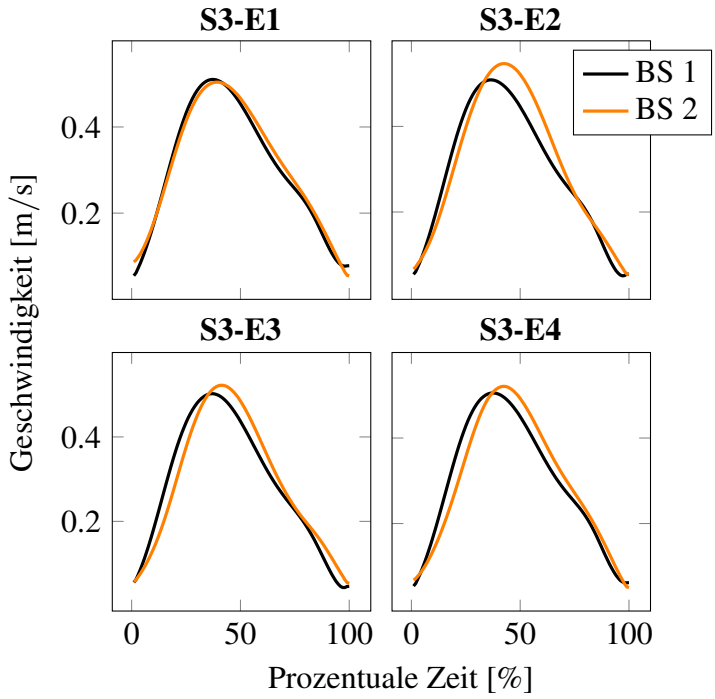

Abbildung 3.20: Gaußförmiges Geschwindigkeitsprofil des ersten und zweiten Bewegungssegmentes für alle vier Bedingungen. (Experiment 2b)

In Experiment 2c brauchte der Proband für das erste Bewegungssegment im Durchschnitt 0,64 s mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,29 m/s ($SD = \pm 0{,}026$ m/s) und einer maximalen Geschwindigkeit von 0,52 m/s ($SD = \pm 0{,}046$ m/s). Im zweiten Bewegungssegment betrug die durchschnittliche Zeit 0,63 s mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,30 m/s ($SD = \pm 0{,}033$ m/s) und einer maximalen Geschwindigkeit von 0,53 m/s ($SD = \pm 0{,}062$ m/s). Die Geschwindigkeitsverläufe sind in Abbildung 3.21 dargestellt.

3.2.3 Varianzanalyse der ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) - Experiment 2a

Zuerst wurde eine UCM Varianzanalyse zur 3D-Hypothese über die Gelenkwinkelkonfigurationen der UCM und ORT Komponente durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.22 für vier beispielhafte Bedingungen des ersten und zweiten Bewegungssegmentes aufgetragen. Alle Daten sind über die Probanden hinweg gemittelt. Zu Bestätigung des

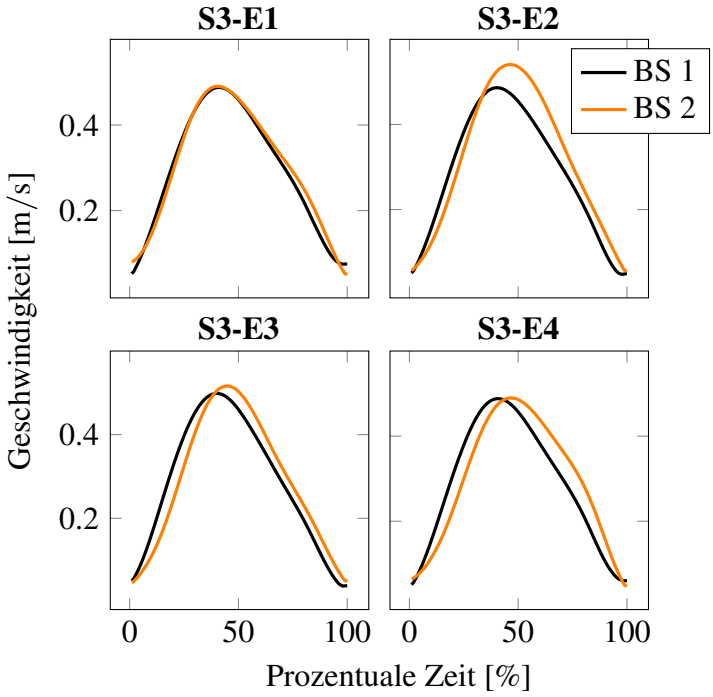

Abbildung 3.21: Gaußförmiges Geschwindigkeitsprofil des ersten und zweiten Bewegungssegmentes für alle vier Bedingungen. (Experiment 2c)

in der Abbildung 3.22 sichtbaren UCM-Effektes wurde eine ANOVA mit den drei Faktoren Zeit (Zeitpunkt 1, 25, 50, 75 und 100 % pro Bewegungssegment), Bedingung und UCM/ORT durchgeführt. Die UCM Komponente lag für das erste Bewegungssegment immer signifikant über der ORT Komponente ($F_{1,9} = 68{,}042, P < 0{,}000$). Das gleiche gilt für das zweite Bewegungssegment ($F_{1,9} = 45{,}419, P < 0{,}000$). Es wurde sowohl für das erste Bewegungssegment ($F_{1.355,12.197} = 18{,}119, P < 0{,}000$), als auch für das zweite Bewegungssegment ($F_{1.846,16.616} = 8{,}156, P < 0{,}000$) eine Interaktion zwischen den Faktoren Zeit und UCM/ORT gefunden. Eine Analyse über die jeweiligen fünf Zeitpunkte zeigte jedoch nochmals, dass zu jedem der fünf analysierten Zeitpunkte die UCM-Komponente die ORT-Komponente signifikant überschritt: $V_{||} > V_{\perp}$. Eine UCM Varianzanalyse zur 3D+Ori2-Hypothese zeigt ein ähnliches Ergebnis. Es lässt sich ebenfalls für die verschiedenen Bedingungen ein UCM-Effekt zeigen, der aber durch eine etwas höhere ORT-Komponente etwas geringer ausfällt als bei der 3D-Hypothese. $V_{\perp 3D+Ori2}$ liegt im Durchschnitt 0,000 90 rad^2/DoF (BS 1) bzw. 0,000 81 rad^2/DoF (BS 2) über $V_{\perp 3D}$.

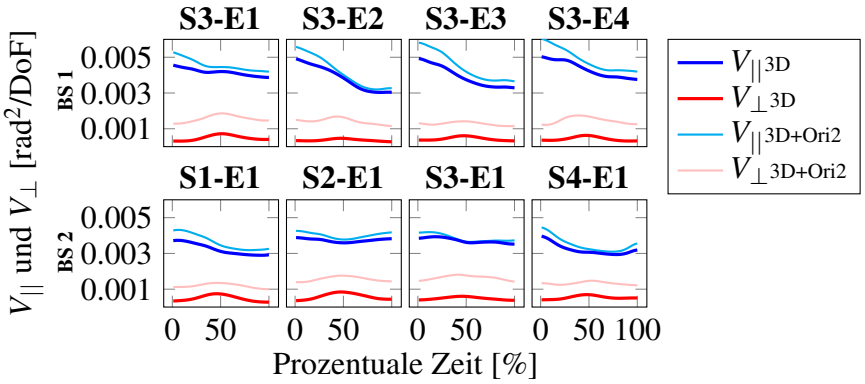

Abbildung 3.22: Ergebnisse der UCM-Varianzanalyse für vier Bedingungen (S3-E1, S3-E2, S3-E4, bzw. S1-E1, S2-E1, S3-E1) und beide Bewegungssegmente (BS). Es gilt: $V_{||} > V_\perp$. (Experiment 2a)

3.2.4 Endeffektor Trajektorien - Experiment 2a

Um das Verhalten des Endeffektors im Bezug auf antizipatorische Koartikulation zu untersuchen, haben wir hier zunächst die Endeffektorpfade für das erste Bewegungssegment in Abbildung 3.23a visuell miteinander verglichen. Jeweils vier Pfade starten an der gleichen Startposition. Abbildung 3.23b zeigt die Endeffektorpfade für das zweite Bewegungssegment. Jeweils vier Pfade enden an der gleichen Endposition. Ähnlich wie in Experiment 1 scheint hier eine rein visuelle Betrachtung der einzelnen Pfade nicht auszureichen. Für keines der beiden Bewegungssegmente zeigen sich Hinweise auf Koartikulation.

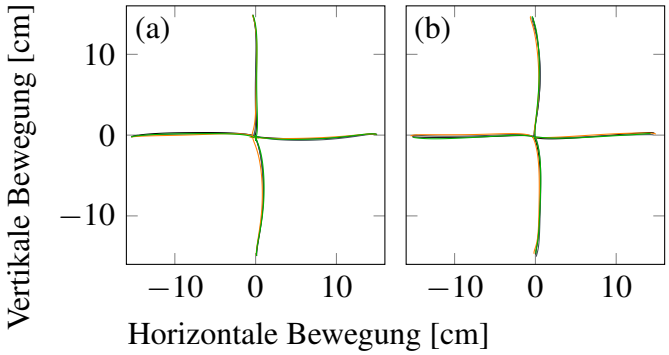

Abbildung 3.23: Die über Probanden und Wiederholungen gemittelten Endeffektorpfade projiziert auf die Tischebenen sind hier für das erste Bewegungssegment (a) und zweite Bewegungssegment (b) aufgetragen. Die vergleichbaren Endeffektorpfade scheinen sich kaum zu unterscheiden. (Experiment 2a)

3.2.5 Gelenkwinkeltrajektorien

Ähnlich zur Vorgehensweise aus Experiment 1 werden auch hier neben den Endeffektorpfaden die Gelenkwinkeltrajektorien untersucht. Beispielhaft sind hier wiederum die Gelenkwinkel Abduktion/Adduktion der Schulter und Flexion/Extension des Ellenbogens aufgezeichnet. Ähnliche Verläufe lassen sich auch für die anderen acht Gelenkwinkel messen. In Abbildung 3.24 sind die verschiedenen Bedingungen jeweils so dargestellt, dass antizipatorische Koartikulation auf Ebene der Gelenkwinkel im ersten Bewegungssegment sichtbar werden kann. Das erste Bewegungssegment enthält für die jeweils vier innerhalb einer Grafik dargestellten Bedingungen die gleichen Zielpositionen (Abbildung 3.24a, c, e und g). Das zweite Bewegungssegment (Abbildung 3.24b, d, f und h) zeigt den Fortlauf der Gelenkwinkel zu unterschiedlichen Endpositionen. Es lässt sich besonders für den Gelenkwinkel Abduktion/Adduktion der Schulter zeigen, dass die verschiedenen Trajektorien schon im ersten Bewegungssegment leicht auseinanderdriften, ein direkter Zusammenhang zum weiteren Verlauf im zweiten Bewegungssegment lässt sich allerdings hierdurch nicht erschließen.

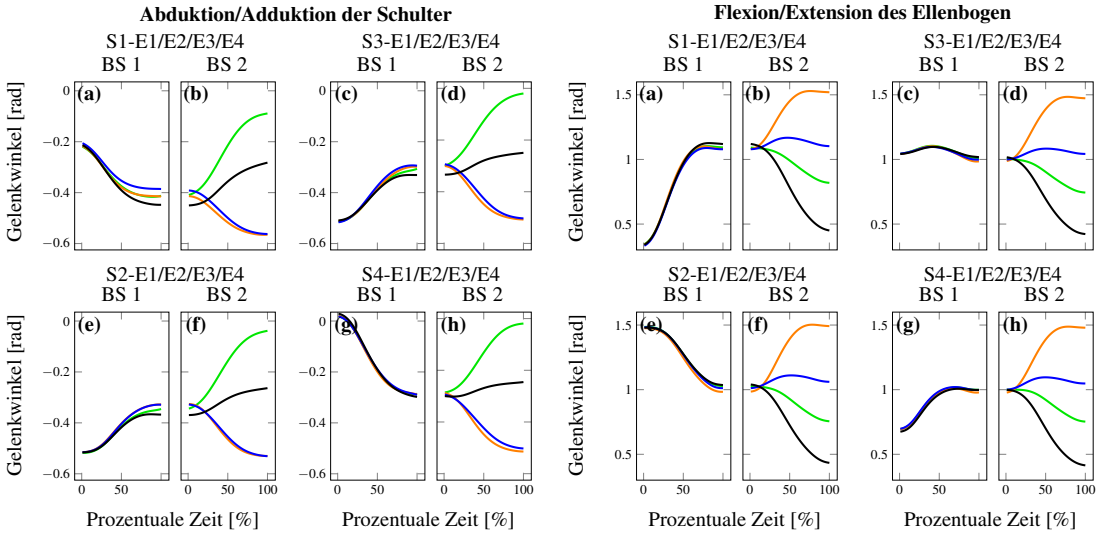

Abbildung 3.24: Über Probanden und Bedingungen gemittelte Gelenkwinkeltrajektorien der Winkel Abduktion/Adduktion der Schulter (a-h) und Flexion/Extension des Ellenbogens (i-p) sind für die Vergleiche S1-E1/2/3/4, S2-E1/2/3/4, S3-E1/2/3/4 und S4-E1/2/3/4 aufgelistet und farblich codiert (grün: E1, orange: E2, blau: E3, schwarz: E4). Es kann keine eindeutige Abhängigkeit des ersten Bewegungssegmentes vom zweiten Bewegungssegment, welche auf antizipatorische Koartikulation hinweisen würde, gezeigt werden. (Experiment 2a)

Innerhalb der Gelenkwinkeltrajektorien findet man dagegen deutliche Hinweise auf carry-over Koartikulation (Abbildung 3.25). Im ersten Bewegungssegment (Abbildung 3.24a,

c, e und g) kommen die Trajektorien aus verschiedenen Richtungen und variieren noch zu Ende des Segmentes. Im zweiten Bewegungssegment (b, d, f und h) sieht man, dass für beide hier aufgezeichneten Gelenkwinkelverläufe die Weiterführung der Trajektorien vom ersten Bewegungssegment abzuhängen scheint, obwohl alle Trajektorien innerhalb einer Grafik zur selben Endposition hinstreben. Die Trajektorien starten nicht nur leicht versetzt, sondern die Unterschiede zwischen den einzelnen Trajektorien bleiben auch über die gesamte Bewegung erhalten. Die Unterschiede verringern sich lediglich leicht über die Zeit.

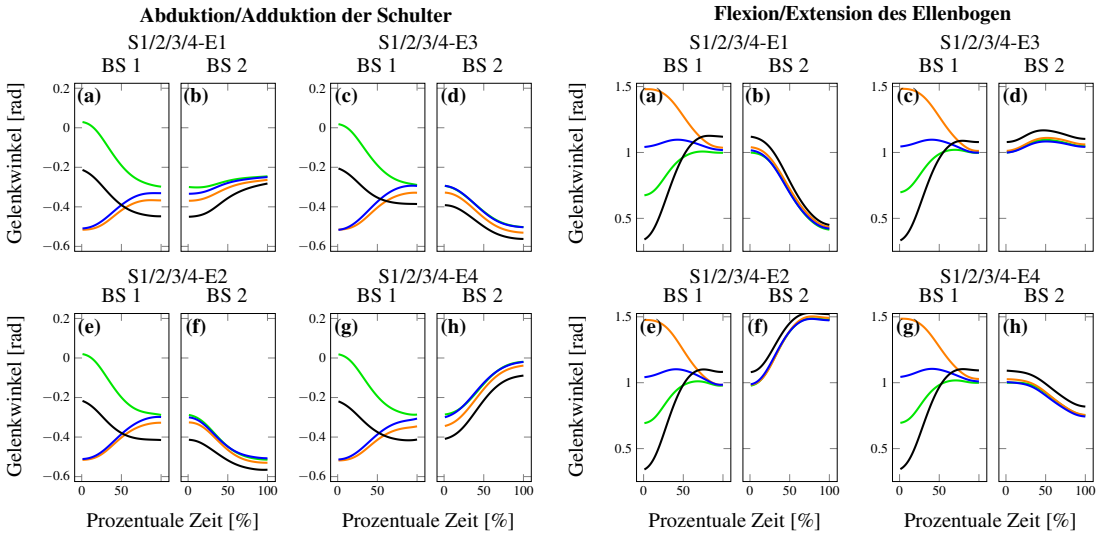

Abbildung 3.25: Über Probanden und Bedingungen gemittelte Gelenkwinkeltrajektorien der Winkel Abduktion/Adduktion der Schulter (a-h) und Flexion/Extension des Ellenbogen (i-p) werden gezeigt. Dargestellt ist jeweils der Verlauf der Trajektorien im ersten Bewegungssegment (von vier verschiedenen Startposition S1-S4) und der weitere Verlauf der Trajektorien im zweiten Bewegungssegment zur gleichen Endposition E. Für jeden Winkel sind jeweils die Vergleiche S1/2/3/4-E1, S1/2/3/4-E2, S1/2/3/4-E3 und S1/2/3/4-E4 aufgelistet und farblich codiert (grün: S1, orange: S2, blau: S3, schwarz: S4). Eine Abhängigkeit des Verlaufes vom ersten zum zweiten Bewegungssegment ist sichtbar (carry-over Koartikulation). (Experiment 2a)

3.2.6 Motorische Äquivalenz zur Koartikulationsdetektion

Bereits für die Analyse der Daten aus Experiment 1 hat sich die MEQ Methode als hilfreich erwiesen. Hier kann man Koartikulation auf Ebene der Gelenkwinkel und auf Ebene des Endeffektors gut bestimmen. Der Unterschied zweier Bedingungen wird in Gelenkwinkelkonfigurationen unterteilt, welche die Aufgabenvariable nicht beeinflussen

($MEQ_{||}$) und Konfigurationen welche diese beeinflussen ($MEQ_{\perp}$). Zunächst werden in Abbildung 3.26 $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ für die 3D und 3D+Ori2-Hypothese und für alle Vergleichsbedingungen zur Detektion von antizipatorischer Koartikulation über die prozentuale Zeit aufgelistet. Abgebildet ist nur jeweils das erste Bewegungssegment.

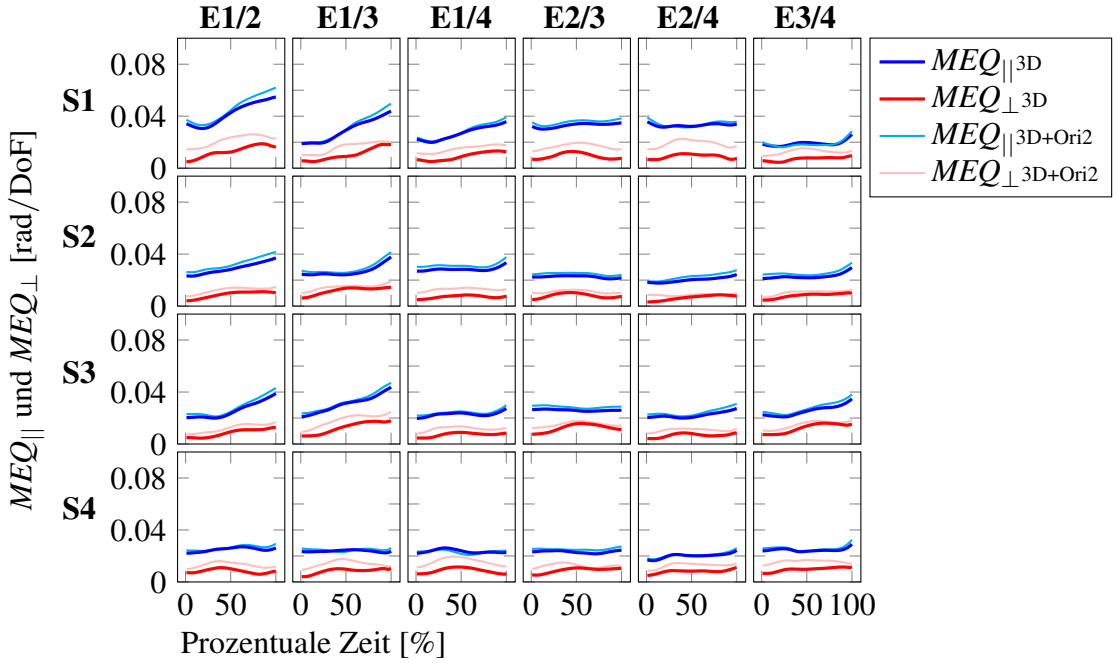

Abbildung 3.26: $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ sind über alle Probanden für das erste Bewegungssegment gemittelt und für alle Vergleiche bezüglich antizipatorischer Koartikulation aufgelistet. Jede Zeile beinhaltet die Vergleiche von einer bestimmten Startposition. $MEQ_{||}$ liegt für Hypothesen 3D und 3D+Ori2 immer etwas über $MEQ_{\perp}$. (Experiment 2a)

Bei den Ergebnissen zur 3D-Hypothese sehen sich die verschiedenen Vergleichsbedingungen einander sehr ähnlich. $MEQ_{||3D}$ liegt in einem Bereich von 0,02 rad/DoF und 0,05 rad/ DoF und $MEQ_{\perp 3D}$ liegt zwischen 0,003 rad/ DoF und 0,02 rad/DoF. Bei einigen Vergleichen sieht man besonders bei $MEQ_{||3D}$ einen Anstieg im Verlauf der Bewegung. Außerdem übersteigt $MEQ_{||3D}$ zu jedem Zeitpunkt $MEQ_{\perp 3D}$. Ähnliches gilt wiederum für die 3D+Ori2-Hypothese, wobei die Werte für $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ hier nur minimal höher liegen als bei $MEQ_{\perp 3D}$. $MEQ_{||3D+Ori2}$ liegt im Bereich von 0,02 rad/ DoF und 0,06 rad/DoF. $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt im Bereich von 0,007 rad/ DoF und 0,03 rad/DoF. Insgesamt muss man bei der MEQ Analyse allerdings beachten, dass durch das oben beschriebene Bias (*3.1.7 Untersuchung des Bias innerhalb der MEQ Analyse*) $MEQ_{||}$ (höhere Varianz: $V_{||} > V_{\perp}$, Abbildung 3.22) ein stärkeres positives Bias erhalten kann als $MEQ_{\perp}$. Daher erscheint eine zusätzliche statistische Analyse der Gelenkwinkelkonfigura-

tionen über MANOVAs, wie in Experiment 1 (*3.1.8 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz*), sinnvoll.

Zuvor betrachten wir allerdings noch das zweite Bewegungssegment genauer. Alle Vergleiche, welche carry-over Koartikulation aufzeigen können, sind in Abbildung 3.27 aufgelistet. Die Werte für $MEQ_{||}{}^{3D}$ übersteigen $MEQ_{\perp}{}^{3D}$ deutlich. Sie liegen im Bereich von 0,02 rad/DoF bis 0,1 rad/DoF für $MEQ_{||}{}^{3D}$ bzw. von 0,005 rad/DoF bis 0,03 rad/DoF für $MEQ_{\perp}{}^{3D}$. Zusätzlich ist ein deutlicher Abfall von $MEQ_{||}$ über die Zeit zu sehen. Ein ähnliches Bild zeigt sich für $MEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $MEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$. $MEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ ist im Vergleich zu $MEQ_{||}{}^{3D}$ meist minimal nach oben versetzt, ebenso liegen die Werte von $MEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ im Vergleich zu $MEQ_{||}{}^{3D}$ für die einzelnen Bedingungen etwas höher. $MEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ liegt im Bereich von 0,03 rad/DoF bis 0,1 rad/DoF und $MEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ im Bereich von 0,01 rad/DoF bis 0,04 rad/DoF.

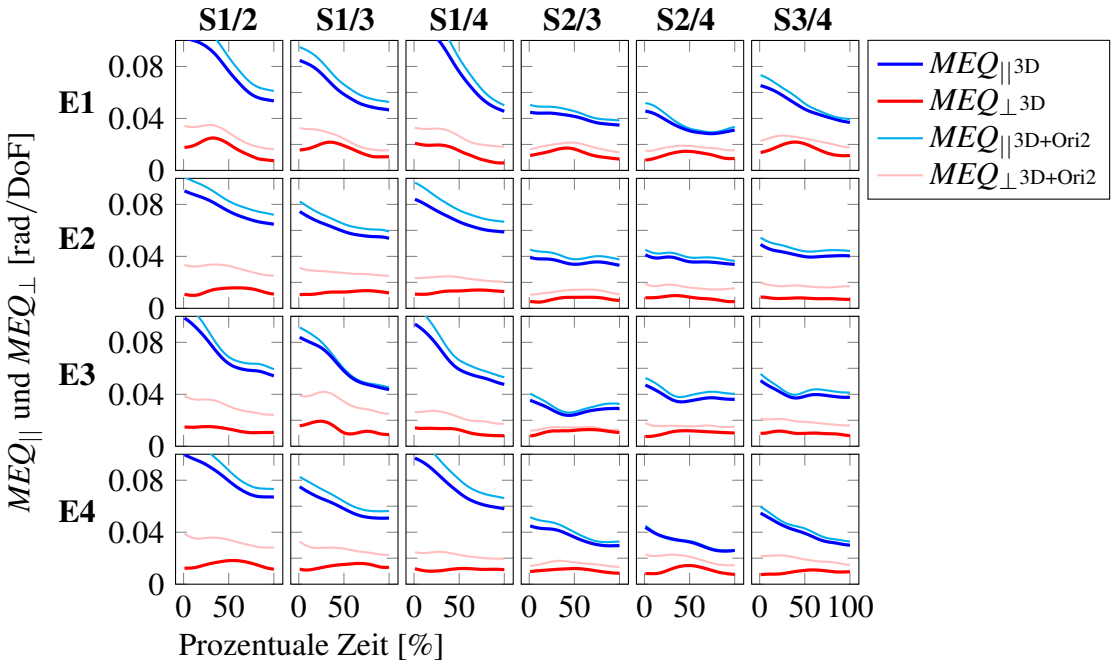

Abbildung 3.27: $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ sind über alle Probanden für das zweite Bewegungssegment gemittelt und für alle Vergleiche bezüglich carry-over Koartikulation aufgelistet. Jede Zeile enthält die Vergleiche zu einer bestimmten Endposition. $MEQ_{||}$ liegt für Hypothesen 3D und 3D+Ori2 immer deutlich über $MEQ_{\perp}$. (Experiment 2a)

3.2.7 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz - Experiment 2a

Um den Einfluss des bekannten Bias auszuschließen und eine bessere Übersicht über die Ergebnisse zu bekommen, wurden eine statistische Analyse der Gelenkwinkelkonfigurationen über MANOVAs für alle möglichen Vergleiche und beide Komponenten erstellt (*3.1.8 Statistische Analyse von motorischer Äquivalenz*). Für antizipatorische Koartikulation im ersten Bewegungssegment wurden MANOVAs für jeden Probanden, fünf Zeitpunkte (1, 25, 50, 75 und 100 %) und jede Startposition (S1-S4) erstellt. Der Faktor war hier die Endposition aus dem zweiten Bewegungssegment (E1-E4). Dem entsprechend wurden für carry-over Koartikulation im zweiten Bewegungssegment MANOVAs für jeden Probanden, fünf Zeitpunkte (1, 25, 50, 75 und 100 %) und jede Endposition (E1-E4) erstellt. Der Faktor war hier die Startposition aus dem ersten Bewegungssegment (S1-S4). In Abbildung 3.28 ist nun der prozentuale Anteil aller signifikant positiven Ergebnisse dieser MANOVAs für $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ über die fünf Zeitpunkte aufgelistet.

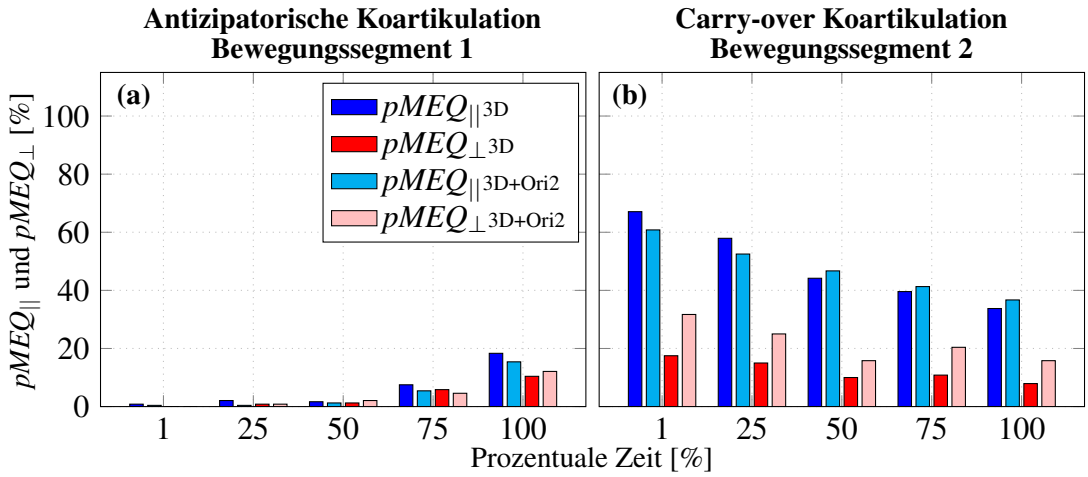

Abbildung 3.28: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ im ersten (antizipatorische Koartikulation; a) und zweiten Bewegungssegment (carry-over Koartikulation; b). Carry-over Koartikulation scheint deutlich stärker ausgeprägt zu sein als antizipatorische Koartikulation. (Experiment 2a)

Insgesamt findet sich wenig antizipatorische Koartikulation (Abbildung 3.28a). $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ nehmen im zeitlichen Verlauf etwas zu. Bei Zeitpunkt 100 % liegt $pMEQ_{||3D}$ bei 18,3 % und $pMEQ_{\perp 3D}$ mit 10,4 % darunter. $pMEQ_{||3D+ORi2}$ liegt zu diesem Zeitpunkt bei 15,4 % und $pMEQ_{\perp 3D+ORi2}$ bei 12,1 %. Für carry-over Koartikulation lässt sich ein weitaus deutlicherer Effekt zeigen (Abbildung 3.28b). $pMEQ_{||}$ startet bei 67,1 % (3D-Hypothese) bzw. 60,8 % (3D+Ori2-Hypothese) und sinkt über die Zeit bis 33,8 % (3D-

Hypothese) bzw. 36,7 % (3D+Ori2-Hypothese). $pMEQ_{\perp}$ zeigt einen kleinen Abfall über die Zeit von 17,5 % (3D-Hypothese) bzw. 31,7 % (3D+Ori2-Hypothese) zu 7,92 % (3D-Hypothese) bzw. 15,8 % (3D+Ori2-Hypothese).

3.2.8 Ergebnisse zu Experiment 2b

In Experiment 2a kann man antizipatorische Koartikulation feststellen (Abbildung 3.28). Der Effekt fällt jedoch sehr gering aus. Um diesen Effekt genauer zu untersuchen und zu verifizieren, wurde Experiment 2b entworfen. Es beinhaltet nur vier Bedingungen (S3-E1, S3-E2, S3-E3, S3-E4) und 50 Wiederholungen. Die UCM Varianzanalyse zur 3D-Hypothese zeigt einen UCM-Effekt ($V_{||3D} > V_{\perp 3D}$) für alle Bedingungen, der zu jedem untersuchten Zeitpunkt (1, 25, 50, 75 und 100 %) signifikant ist. Auch für die 3D+Ori2-Hypothese zeigt sich ein UCM-Effekt für alle Bedingungen.

Alle vier Bedingungen des Experiment 2b erlauben eine Analyse von antizipatorischer Koartikulation im ersten Bewegungssegment. Bei der folgenden Ausführung der Ergebnissen beschränke ich mich im Wesentlichen auf die Erkenntnisse aus der MEQ Analyse.

MEQ Analyse bei Experiment 2b

Eine MEQ Analyse wurde über alle möglichen Vergleiche durchgeführt (Abbildung 3.29). In diesem Versuchsaufbau sind nur sechs Vergleiche (S3-E1/2/3/4) möglich. $MEQ_{||3D}$ liegt im Bereich von 0,008 rad/DoF und 0,03 rad/DoF und zeigt im ersten Bewegungssegment häufig einen starken Anstieg. Nur beim Vergleich S3-E2/E3 ist dieser Anstieg kaum erkennbar. $MEQ_{\perp 3D}$ liegt im Vergleich zu $MEQ_{||3D}$ unterhalb und im Bereich zwischen 0,002 rad/DoF und 0,01 rad/DoF. Zweimal, bei S3-E1/3 und S3-E3/4, überschreitet $MEQ_{\perp 3D}$ im mittleren Teil des ersten Bewegungssegmentes kurzzeitig $MEQ_{||3D}$. Insgesamt weist $MEQ_{\perp}$ ebenfalls einen leichten Anstieg auf, der am Ende des Segmentes leicht zurückgeht. Die Werte für $MEQ_{||3D+Ori2}$ und $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ sind denen der 3D-Hypothese in allen Punkten sehr ähnlich.

Abbildung 3.30 zeigt ähnlich zu den vorherigen Experimenten den Prozentsatz an signifikant positiven MANOVAs ($pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$), welcher für alle möglichen Vergleichsbedingungen an fünf Zeitpunkten im ersten Bewegungssegment ermittelt wurde. Es ist deutlich, dass das Verhalten von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ von Experiment 2a (Abbildung 3.28a) dem Verhalten hier im Wesentlichen sehr ähnlich ist. Durch die zusätzliche Anzahl an Wiederholungen zeigt sich der Verlauf der Komponenten deutlicher als in Experiment 2a. Sowohl $pMEQ_{||}$ als auch $pMEQ_{\perp}$ steigen über die Zeit hinweg an. $pMEQ_{||3D}$

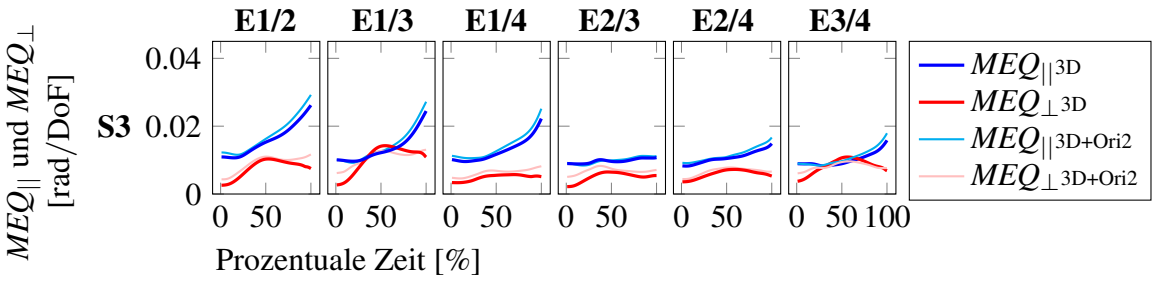

Abbildung 3.29: $MEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ sind über alle Probanden gemittelt für das erste Bewegungssegment und für alle Vergleiche bezüglich antizipatorischer Koartikulation (S3-E1/2, S3-E1/3, S3-E1/4, S3-E2/3, S3-E2/4 und S3-E3/4) für beide Hypothesen aufgelistet. (Experiment 2b)

und $pMEQ_{||}$3D+Ori2 ist ab Zeitpunkt 25 % mit 6,67 % bzw. 5,00 % zum ersten Mal über 0 % und steigt im Verlauf auf 63,33 % bzw. 60,00 %. $pMEQ_{\perp}$3D steigt ebenfalls zuerst an - von 0 % bei Zeitpunkt 1 % bis zu 50 % bei Zeitpunkt 75 % und sinkt danach wieder auf 40 %. $pMEQ_{\perp}$3D+Ori2 zeigt einen ähnlichen Verlauf und steigt von 0 % bei Zeitpunkt 1 % bis zu 51,7 % bei Zeitpunkt 75 % und sinkt dann wieder leicht auf 48,4 %. Zeitweise überragt sowohl bei der 3D- als auch bei der 3D+Ori2-Hypothese $pMEQ_{\perp}$ (Zeitpunkte 50 und 75 %) $pMEQ_{||}$ sogar. Dies konnte zwar in Experiment 2a nicht gezeigt werden, doch stimmen beide Experimente bei der Analyse von antizipatorischer Koartikulation darin überein, dass einerseits der Einfluss von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ über die Zeit hinweg mehr oder weniger zunimmt und andererseits, dass sich die Komponenten beider Unterräume relativ ähneln. Letzteres fällt besonders im Vergleich zur carry-over Koartikulation aus Experiment 2a auf. Dort überragt $pMEQ_{||}$ $pMEQ_{\perp}$ zu jedem Zeitpunkt deutlich (Abbildung 3.28b).

Endeffektorposition am Zentrum - Experiment 2b

Die vorausgehenden Ergebnisse zeigen, dass der Endeffektorpfad durch antizipatorische Koartikulation beeinflusst wird ($pMEQ_{\perp}$3D mit 40 % bei Zeitpunkt 100 %). Die Positionierung des Endeffektors zu Ende des ersten Bewegungssegmentes erscheint hierbei besonders interessant. In welche Richtung tendiert hierbei der Unterschied zwischen den Bedingungen? Hierzu ist eine genauere Analyse der Endeffektorposition zu Zeitpunkt 100 % im ersten Bewegungssegment nötig. Zuerst wurde mit Hilfe einer MANOVA ermittelt, ob für jeden einzelnen Probanden statistisch signifikante Unterschiede in der Positionierung des Objektes auftraten und innerhalb welcher Vergleiche von Bedingungen diese sichtbar

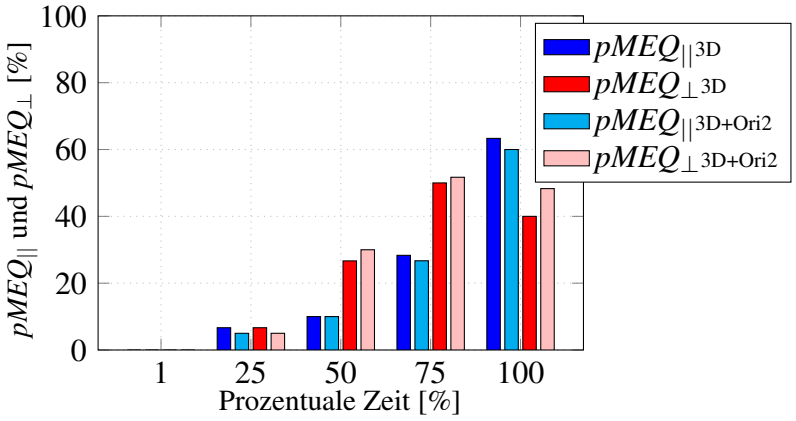

Abbildung 3.30: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ zeigen im ersten Bewegungssegment beide ein ähnliches Verhalten (leichter Anstieg; bei $pMEQ_{\perp}$ zumindest bis Zeitpunkt 75 %). (Experiment 2b)

wurden (Tabelle 3.1). Alle zehn Probanden zeigen eine statistische Signifikanz im Hinblick auf die Objektpositionierung. Bei zwei der Probanden lässt sich diese allerdings nur beim Vergleich S3-E1/E2 nachweisen. Besonders selten lassen sich dafür die Bedingungen S3-E1 und S3-E4 signifikant voneinander unterscheiden.

Tabelle 3.1: Signifikante Ergebnisse der MANOVA für die Endeffektorposition zu Ende des ersten Bewegungssegmentes werden hier für alle zehn Probanden gelistet. Die zweite Spalte enthält die Ergebnisse über alle Vergleiche, die darauffolgenden Spalten zeigen Signifikanzen für die einzelnen Vergleiche an. (Experiment 2b)

Nr.	Allg.	S3-E1/E2	S3-E1/E3	S3-E1/E4	S3-E2/E3	S3-E2/E4	S3-E3/E4
1	✓	✓	✓	✓	-	✓	-
2	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
4	✓	✓	-	-	-	-	-
5	✓	✓	-	-	-	-	-
6	✓	✓	✓	-	-	-	✓
7	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	-	✓	-	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-

Besonders interessant ist jedoch die Tatsache, dass nicht alle Probanden bei der Positionierung des Objektes am Zentrum C eine ähnliche Strategie verwendeten. Diese Tatsache wird in Abbildung 3.31 anhand von drei Beispielen deutlich. Bei zwei Pro-

banden (Probandennr. 4 und 5, Tabelle 3.1) zeigen sich kaum statistisch signifikante Positionsunterschiede (Abbildung 3.31a). Bei fünf der zehn Probanden dagegen wird das Objekt entgegen des nachfolgenden Zieles positioniert (Entgegen-Positionsstrategie). D.h., dass das Objekt im Vergleich zu den anderen Bedingungen am Zentrum C etwas rechts positioniert wird, wenn die Bewegung danach zum linken Ziel (E4) führt und etwas links, wenn die Bewegung danach zum rechten Ziel (E2) führt. Entsprechendes gilt für die beiden Ziele oben und unten (E1 und E3). Es kann bei dieser Strategie auch vorkommen, dass zwar das Objekt für eine Bewegung mit später obigen Ziel (E1) beim Zentrum C etwas weiter unterhalb abgesetzt wird, aber dennoch oberhalb der Positionierung für Bedingungen zu den links und rechts liegenden Zielen liegt (Abbildung 3.31b). Bei der Entgegen-Positionsstrategie verlängert sich der zurückzulegende Objektpfad leicht. Zwei weitere Probanden lassen diese Entgegen-Positionsstrategie nur für den Vergleich S3-E1/3 erkennen, aber nicht bei S3-E2/4, bei dem hier kein signifikanter Unterschied gezeigt werden kann. Eine zweite Strategie, welche bei einem Probanden (Probandennr. 2) gefunden wurde, ist, dass die Objektposition immer leicht in Richtung der nachfolgenden Zielposition gesetzt wird (Mit-Positionsstrategie, Abbildung 3.31c). Dennoch ist in diesem Beispiel die Position am Zentrum C für die Bedingung S3-E3 (Zielposition unten) noch oberhalb der Positionierungen bei Bedingungen zu den seitlichen Zielen E2 und E4 . Insgesamt beträgt der Unterschied zwischen den einzelnen Positionen bei allen Probanden und Strategien im Durchschnitt jedoch weniger als 0,2 cm.

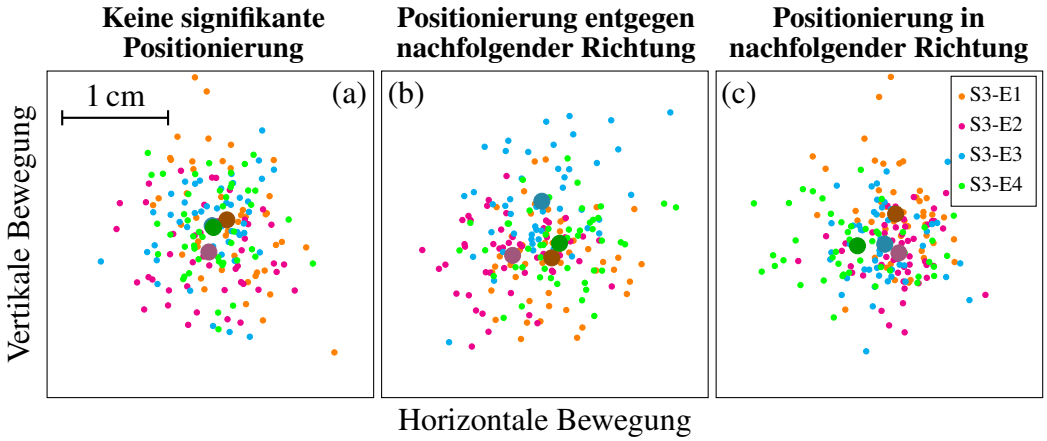

Abbildung 3.31: Unterschiedliche Strategien zur Positionierung des Objektes am Zentrum C: (a) Kaum signifikante Unterschiede zwischen Bedingungen (Probandennr. 5). (b) Entgegen-Positionsstrategie: Positionierung entgegen der nachfolgenden Position E (Probandennr. 7. (c) Mit-Positionsstrategie: Positionierung in Richtung der nachfolgenden Position (Probandennr. 2). (Experiment 2b)

3.2.9 MEQ Analyse von Experiment 2c

Experiment 2b macht den kleinen antizipatorischen Effekt, der in Experiment 1 und Experiment 2a schon sichtbar wurde, deutlicher: Sowohl $MEQ_{||}$ als auch $MEQ_{\perp}$ steigen über die Zeit hinweg an. Woher kommt allerdings der Rückgang von $MEQ_{\perp}$ zu Ende des ersten Bewegungssegmentes, der vor allem bei Experiment 2b deutlich wurde?

Der Proband erhält, während er die Bewegung durchführt, visuelles Feedback, sowohl über seine eigene Position bzw. die des Objektes, als auch über die Zielposition. Je näher der Proband das Objekt Richtung Zielposition bewegt, desto besser kann zwischen Objektposition und gewünschter Zielposition verglichen werden. Zu Ende des Bewegungssegmentes könnte man daher eine direkte Korrektur der Endeffektorposition erwarten, welche vor allem zu einem Abfall von $MEQ_{\perp}$ führen könnte. Um diese Theorie zu untersuchen, wurden in Experiment 2c die Zielpositionen direkt vor dem Bewegungsstart entfernt. Der Bildschirm war ab diesem Zeitpunkt schwarz.

Abbildung 3.32 enthält die MEQ Ergebnisse für die einzelnen Vergleiche. Diese sind relativ ähnlich zu den Ergebnissen aus Experiment 2b (Abbildung 3.29). $MEQ_{||}{}^{3D}$ liegen zwischen 0,008 rad/ DoF und 0,04 rad/DoF, $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ dagegen zwischen 0,002 rad/DoF und 0,02 rad/DoF. Das Maximum, welches in Experiment 2b in der Mitte des Bewegungssegmentes für die $MEQ_{\perp}$ gefunden wurde, ist hier nur teilweise sichtbar und deutlich weniger ausgeprägt. $MEQ_{||}{}^{3D}$ übersteigt auch hier, bis auf eine Ausnahme bei S3-E1/3, $pMEQ_{\perp}$. $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ zeigen in Abbildung 3.32 sehr ähnliche Werte wie $pMEQ_{||}{}^{3D}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$.

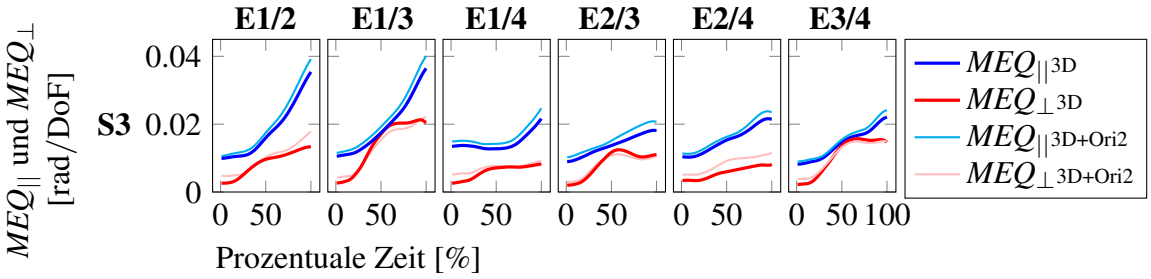

Abbildung 3.32: $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ sind gemittelt über alle Probanden für das erste Bewegungssegment für alle Vergleiche bezüglich antizipatorischer Koartikulation S3-E1/2, S3-E1/3, S3-E1/4, S3-E2/3, S3-E2/4 und S3-E3/E4 aufgelistet. $pMEQ_{||}$ übertrifft $pMEQ_{\perp}$ nur knapp. Die Zielpositionen wurden hier während der Bewegung nicht angezeigt. (Experiment 2c).

Die weiterführende Analyse über MANOVAs (Abbildung 3.33) zeigt auf einen Blick die Ähnlichkeiten und Unterschiede zu Experiment 2b (Abbildung 3.30). Auch in Ex-

periment 2c steigt $pMEQ_{||}{}^{3D}$ über die Zeit hinweg von 1,67 % (Zeitpunkt 1 %) kontinuierlich an bis 63,33 % (Zeitpunkt 100 %; Abbildung 3.33). Auch $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ steigt in ähnlicher Weise von 0 % (Zeitpunkt 1 %) bis 65 % (Zeitpunkt 100 %). Ähnlich sieht es für $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ aus und es zeigt sich ein Anstieg bis 60,0 % bzw. bis 63,3 %. Auch hier konnte wiederum antizipatorische Koartikulation nachgewiesen werden. Der wesentliche Unterschied zu den Ergebnissen aus Experiment 2b ist demnach, dass es hier nicht zu einem Abfall von $pMEQ_{\perp}$ zu Ende des Bewegungssegmentes kommt. Der unterschiedliche Versuchsaufbau beider Experimente weist somit darauf hin, dass es sich bei diesem Abfall in Experiment 2b tatsächlich um eine Korrektur der Endeffektorposition zu Ende des ersten Bewegungssegmentes, induziert durch das visuelle Feedback der Zielposition, handelt. Neben Experiment 2b ist dieser Abfall von $pMEQ_{\perp}$ bereits bei den schwachen werten in Experiment 1 angedeutet. Für die ebenfalls nur schwach erkennbare antizipatorische Koartikulation bei Experiment 2a lässt sich dieser Abfall jedoch noch nicht zeigen.

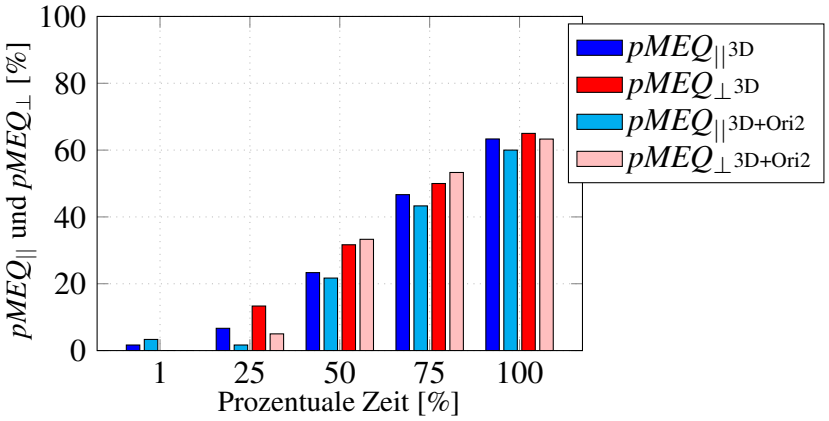

Abbildung 3.33: Sowohl $pMEQ_{||}$ als auch $pMEQ_{\perp}$ steigen kontinuierlich an und lassen antizipatorische Koartikulation vermuten. Bei diesem Versuchsaufbau sind die Zielpositionen während der Bewegung selbst nicht sichtbar. (Experiment 2c)

3.2.10 Endeffektorposition am Zentrum - Experiment 2c

Die bisherigen Ergebnisse dieses Experimentes weisen darauf hin, dass der Endeffektorpfad zu Ende des ersten Bewegungssegmentes nicht mehr oder kaum im Hinblick auf die Zielposition (Zentrum C) korrigiert wird, da diese für den Probanden nicht mehr sichtbar ist. Das Objekt wird auf dem Monitor-Tisch (in der Nähe des Zentrums C) an unterschiedlichen Stellen platziert. Die unterschiedlichen Positionierungen wurden bereits für Experiment 2b genauer analysiert (3.2.8). Da hier die Unterschiede, wahrscheinlich durch

das fehlende visuelle Feedback, noch deutlicher ausfallen können, wurde auch hier eine genauere Analyse der Endeffektorpositionen durchgeführt. Mit Hilfe von MANOVAs haben wir zunächst ermittelt, ob die Position des Objektes am Zentrum *C* zu Ende des ersten Bewegungssegmentes signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen aufweist und genauer, welche der Bedingungen sich signifikant unterscheiden. Die Ergebnisse über alle zehn Probanden sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.2: Signifikante Ergebnisse der MANOVAs für die Endeffektorposition zu Ende des ersten Bewegungssegmentes sind für alle zehn Probanden gelistet. Die zweite Spalte enthält die Ergebnisse über alle Vergleiche, die darauffolgenden Spalten zeigen Signifikanzen für die einzelnen Vergleiche an (Experiment 2c).

Nr.	Allg.	S3-E1/E2	S3-E1/E3	S3-E1/E4	S3-E2/E3	S3-E2/E4	S3-E3/E4
1	-	-	-	-	-	-	-
2	✓	-	✓	-	✓	-	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	-	-	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	-	-	-	-	-	-	-
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	-	-	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Auch hier finden sich bei den Probanden unterschiedliche Strategien der Objektplatzierung, vergleichbar mit den Strategien aus Experiment 2b, welche mit den Namen Entgegen-Positionierungsstrategie und Mit-Positionierungsstrategie beschrieben wurden. Zwei der Probanden (Nr. 1 und 7) zeigten keine signifikanten Unterschiede bei der Positionierung des Endeffektors bei Zentrum *C* (Abbildung 3.34a). Die meisten Probanden (Nr. 2-6, 8, 9) zeigten ganz oder teilweise eine Positionierung des Endeffektors auf der zur nachfolgenden Endposition entgegen liegenden Seite (Entgegen-Positionierungsstrategie, Abbildung 3.34b). Sollte der Endeffektor also im zweiten Bewegungssegment nach rechts (E1) bewegt werden, stellten sie den Endeffektor eher links ab bzw. bei E4 entgegengesetzt. Sollte das Objekt im zweiten Schritt nach unten (E3) bewegt werden, wurde der Endeffektor eher weiter oben platziert bzw. bei E1 weiter unten. Diese Strategie verlängert den zurückzulegenden Pfad entgegen der Mit-Positionierungsstrategie leicht. Die Mit-Positionierungsstrategie kann nur bei einem Probanden (Probandennr. 10) deutlich erkannt werden (Abbildung 3.34c). Hier wird der Endeffektor beim Zentrum C jeweils auf

der Seite positioniert, auf der auch die spätere Endposition E liegt. Bei Bewegungen nach rechts (E2) also eher rechts, bei Bewegungen nach links (E4) eher links. Bei Bewegungen nach oben (E1) eher oberhalb und bei Bewegungen nach unten (E3) eher unterhalb, wobei in der hiesigen Abbildung die gemittelte Position zwar unterhalb von Bewegungen zu E1 liegt, aber dennoch leicht oberhalb relativ zu den Bedingungen S3-E2 und S3-E4. Die Unterschiede in der Platzierung liegt bei Experiment 2c im Durchschnitt bei unter 0,5 cm und liegt somit auch nur knapp über den durchschnittlichen Werten von 0,2 cm bei Experiment 2b.

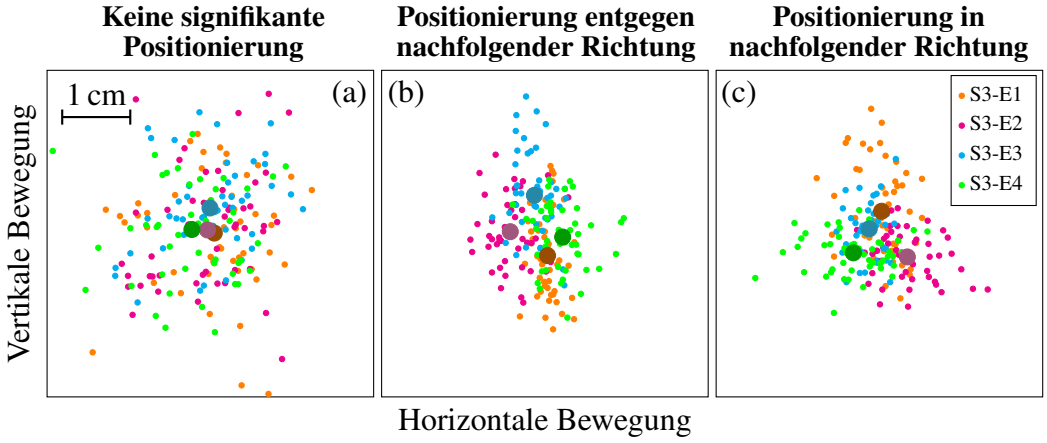

Abbildung 3.34: Unterschiedliche Strategien zur Positionierung des Objektes am Zentrum C: (a) Keine Signifikanz, Probandennr. 7, (b) Entgegen-Positionierungsstrategie: Positionierung entgegen der nachfolgenden Endposition, Probandennr. 5, (c) Mit-Positionierungsstrategie: Positionierung in Richtung der nachfolgenden Endposition, Probandennr. 10. (Experiment 2c)

3.2.11 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 2a, 2b und 2c

Mit Experiment 2a wurde eine Punkt-zu-Punkt-Bewegung aus zwei Bewegungssegmenten durchgeführt, in dem sowohl antizipatorische als auch carry-over Koartikulation für das erste bzw. zweite Bewegungssegment nachgewiesen werden konnte. Das Experiment war so aufgebaut, dass beide Koartikulationsarten in gleicher Weise auftreten konnten. Die Anzahl der Vergleichsbedingungen war zum Nachweis beider Koartikulationsarten gleich. Auch hatte man vor jedem Durchgang eine Zeitspanne von 3 s in der man nicht nur die durchzuführende Sequenz wahrnahm, sondern sich diese auch merken musste.

Antizipatorische Koartikulation wurde in einem deutlich geringerem Maß als carry-over Koartikulation gefunden. Der Anteil an antizipatorischer Koartikulation nimmt im Verlauf

des ersten Bewegungssegmentes zu. Es waren hier zu ähnlichen Teilen sowohl Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor nicht beeinflussen ($pMEQ_{||}$), als auch Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor beeinflussen ($pMEQ_{\perp}$), beteiligt. Zumindest zeigt sich hierzu zwischen den Komponenten und bei den Experimenten 2a, 2b und 2c kein systematischer Effekt. Bei carry-over Koartikulation sind Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor nicht beeinflussen ($pMEQ_{||}$), deutlich mehr involviert. $pMEQ_{||}$ nimmt etwas über die Zeit ab. Der Einfluss von carry-over Koartikulation auf Ebene des Endeffektors ($pMEQ_{\perp}$) ist hierzu deutlich geringer. Insgesamt sind die MEQ-Ergebnisse für die beiden Hypothesen 3D und 3D+Ori2 sehr ähnlich. Teilweise ist nur $pMEQ_{\perp\,\text{3D+Ori2}}$ zu $pMEQ_{\perp\,\text{3D}}$ leicht erhöht.

Die beiden Experimente 2b und 2c konnten den schwachen antizipatorischen Effekt aus Experiment 2a noch einmal bestätigen. Es konnte eine über die Zeit zunehmende Koartikulation sowohl auf Ebene der Gelenkwinkel, als auch auf Ebene des Endeffektors nachgewiesen werden. Der Abfall von $pMEQ_{\perp}$, welcher bei Experiment 2b zu Ende des ersten Bewegungssegmentes sichtbar wurde, wurde in Experiment 2c verhindert. Hier waren die Zielpositionen auf dem Bildschirm während der Bewegung selbst nicht sichtbar. Dies lässt vermuten, dass dieser Abfall von $pMEQ_{\perp}$ wohl auf eine Korrektur der Endeffektorposition zur Zielposition aufgrund visuellen Feedbacks zurückzuführen ist.

Experiment 2b und 2c machen ebenfalls deutlich, dass trotz der Ähnlichkeiten, welche die Probanden im Bezug auf die UCM-Varianzanalyse und die Analyse der motorischen Äquivalenzen haben, teilweise andere Strategien verwendet wurden. Die Positionierung des Objektes am Zentrum C zu Ende des ersten Bewegungssegmentes zeigte folgendes: Zeigten sich signifikate Unterschiede, so folgten diese im Wesenlichen zwei Strategien, der Entgegen-Positionierungsstrategie (Positionierung entgegen der nachfolgenden Endposition) oder der Mit-Positionierungsstrategie (Positionierung in Richtung der nachfolgenden Endposition). Die Erstgenannte trat in beiden Experimenten jedoch deutlich häufiger auf als Letztere.

3.3 Experiment 3a und 3b

Jedes der bisher durchgeführten Experimente bestand aus zwei Bewegungssegmenten, die direkt hintereinander ausgeführt wurden. Doch welche Folge hat es für die Bewegung und vor allem für die Koartikulationseffekte, wenn zwischen dem ersten und dem zweiten Teil dieser Sequenz eine Pause besteht? Inwieweit sind antizipatorische und carry-over Koartikulation noch messbar und sind die Folgen für die beiden Koartikulationsarten ähnlich?

Durch diesen Versuchsaufbau werden möglicherweise bessere Einblicke in Bewegungsplanung und -regelung möglich, da diesen unterschiedliche Voraussetzungen zugrunde liegen.

3.3.1 Versuchsaufbau

Zwei Frauen und acht Männer im Alter von 21 bis 35 Jahren ($\mu = 28$, $SD = \pm 4{,}65$) nahmen an Experiment 3a und sechs Frauen und vier Männer im Alter von 25 bis 38 Jahren ($\mu = 30$, $SD = \pm 5{,}02$) nahmen an Experiment 3b teil. Alle waren gesund, rechtshändig (nach eigenen Angaben bzw. schrieben mit der rechten Hand) und naiv im Hinblick auf den Zweck des Versuches.

Der Aufbau bestand genau wie in Experiment 2a und 2b aus den fünf, kreuzförmig angeordneten Zielpositionen (Abbildung 3.17). Bei Experiment 3a waren alle äußeren Zielpositionen 1-4 sowohl Start- als auch Endpositionen (16 Bedingungen). Bei Experiment 3b war nur Zielposition 3 Startposition und alle vier äußeren Positionen fungieren als Endpositionen (4 Bedingungen). Experiment 3a wurde mit zehn Wiederholungen ($N = 10$) durchgeführt und Experiment 3b mit 32 Wiederholungen ($N = 32$). Der Aufbau war ähnlich zu Experiment 2a und b. Da aber einzelne Bewegungssequenzen durch die zusätzliche Pause länger dauerten, wurden weniger Wiederholungen durchgeführt. Die Experimentdauer lag bei allen Experimenten bei ca. 1,5 Stunden.

Der Ablauf eines Durchgangs begann ähnlich wie in den vorherigen Experimenten. Zuerst wurde das Objekt auf die graue Position im Zentrum C gestellt (Abbildung 3.35 oben links). Der Griff am Objekt durfte daraufhin für diesen Durchgang nicht mehr verändert werden. Danach stellte der Proband das Objekt auf die nun erschienene grüne Startposition (gekennzeichnet mit dem Wort „Start“, Abbildung 3.35 oben Mitte). Jetzt wurden alle drei Zielpositionen in grün (Startposition), gelb (Zielposition im Zentrum C, gekennzeichnet mit der Nummer 1) und rot (Endposition, gekennzeichnet mit der Nummer 2) angezeigt und konnten vom Probanden 3 s betrachtet werden (Abbildung 3.35 oben rechts). Nach Ablauf dieser Zeit wurden alle möglichen Endpositionen als graue Kreise und das Zentrum C als gelber Kreis dargestellt. Es ertönte ein Signal und der Proband bewegte daraufhin sein Objekt zur nächsten Zielposition (Zentrum C) (Abbildung 3.35 unten links). Erreichte das Objekt diese Position, wurde dies durch die Kameras direkt registriert und eine Wartezeit von 2 s wurde angestoßen (Abbildung 3.35 unten Mitte). Nach Ablauf dieser Zeit ertönte ein weiteres Signal und der Proband bewegte das Objekt

zur Endposition (Abbildung 3.35 unten rechts). Der Durchgang war beendet und ein neuer konnte beginnen.

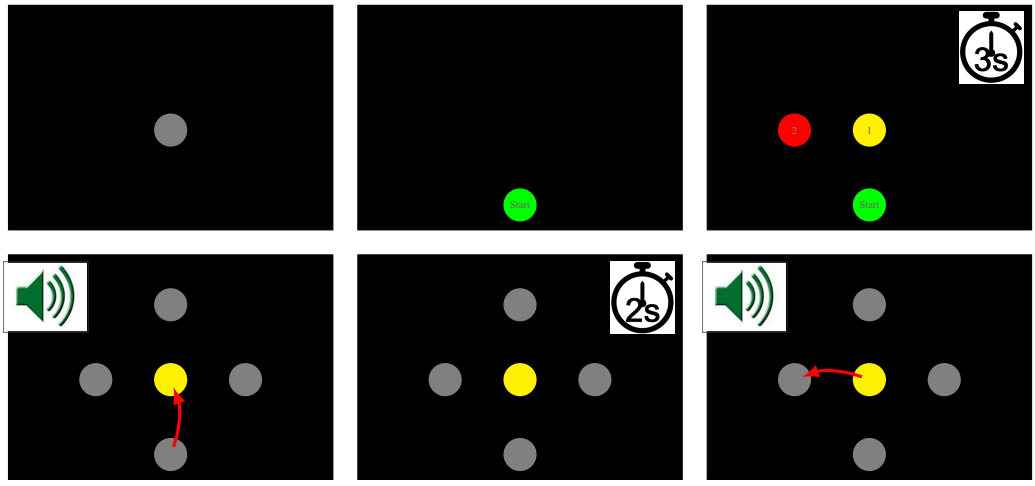

Abbildung 3.35: Abfolge eines Durchgangs von Experiment 3a/b. (Bild oben links) Das Objekt wurde zunächst auf dem grauen Kreis platziert. (Bild oben Mitte) Objekt wurde auf die grüne Startposition gesetzt. (Bild oben rechts) Die beiden weiteren Zielpositionen, das Zentrum C (gelb) und die Endposition (rot) wurden für 3 s dargestellt. (Bild unten links) Alle möglichen äußeren Zielpositionen wurden in grauer Farbe dargestellt, das Zentrum C in Gelb. Ein Signal ertönte und der Proband bewegte das Objekt einen Schritt (zum Zentrum C). (Bild unten Mitte) Nach 2 s ertönte ein weiteres Signal (Bild unten rechts) und der Proband bewegte daraufhin das Objekt weiter zur vorher in rot angezeigten Endposition. Die abgebildeten Symbole für Ton sowie die Bewegungspfeile wurden nicht auf dem Bildschirm dargestellt.

Alle ermittelten Daten wurden im Bezug auf ihre Vollständigkeit hin kontrolliert. Durch verdeckte Marker, Reflexionen, falsch erinnerte Zielpositionen oder Ähnlichem konnte es hierbei zu Ausfällen kommen. 7,8 % der Trajektorien aus den Experimenten 3a und 3b konnten daher nicht für die Analyse verwendet werden.

3.3.2 Kinematische Analyse der Bewegungen - Experiment 3a und 3b

Das erste Bewegungssegment wurde von dem Probanden in durchschnittlich 0,62 s (Experiment 3a) bzw. 0,65 s (Experiment 3b) zurückgelegt. Das zweite Bewegungssegment in einer durchschnittlichen Zeit von 0,61 s (Experiment 3a) bzw. 0,67 s (Experiment 3b). Die mittlere Geschwindigkeit lag im ersten Segment bei 0,28 m/s ($SD = \pm 0{,}029$ m/s) bzw. 0,28 m/s ($SD = \pm 0{,}027$ m/s) und im zweiten Segment bei 0,28 m/s ($SD = \pm 0{,}031$ m/s)

bzw. 0,27 m/s ($SD = \pm 0{,}030$ m/s). Die maximale Geschwindigkeit lag dagegen im ersten Segment bei 0,51 m/s ($SD = \pm 0{,}057$ m/s) bzw. 0,47 m/s ($SD = \pm 0{,}046$ m/s) und im zweiten Segment bei 0,50 m/s ($SD = \pm 0{,}058$ m/s) bzw. 0,48 m/s ($SD = \pm 0{,}063$ m/s).

3.3.3 Varianzanalyse der ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) - Experiment 3a

In Abbildung 3.36 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse der UCM für jeweils vier Bedingungen im ersten und zweiten Bewegungssegment über alle Probanden gemittelt und aufgelistet. Ähnlich zu den Ergebnissen aus den vorherigen Experimenten übersteigt $V_{||3D}$ zu jedem Zeitpunkt $V_{\perp 3D}$. Es ist hier also ein deutlicher UCM-Effekt sichtbar, der auch über jeweils eine ANOVA (Faktoren: Zeit (Zeitpunkt 1, 25, 50, 75 und 100 % pro Bewegungssegment), Bedingung und UCM/ORT) über beide Bewegungssegmente mit $F_{1,9} = 61{,}632, P < 0{,}001$ bzw. $F_{1,9} = 65{,}322, P < 0{,}001$ nachgewiesen werden konnte. Innerhalb beider Segmente zeigte sich eine Interaktion zwischen den Faktoren Zeit und UCM/ORT Komponente ($F_{1.390,12.506} = 10{,}202, P < 0{,}001$ bzw. $F_{1.198,10.782} = 4{,}500, P = 0{,}005$). Eine ANOVA über fünf Zeitpunkte jedes Bewegungssegmentes zeigte jedoch wiederum, dass in jedem Fall $V_{||3D}$ signifikant über $V_{\perp 3D}$ liegt. Experiment 3b zeigte ähnliche Ergebnisse (erstes Bewegungssegment: $F_{1,9} = 23{,}566, P = 0{,}001$, zweites Bewegungssegment: $F_{1,9} = 29{,}183, P < 0{,}001$). Es wurde außerdem eine Interaktion zwischen Zeit und UCM/ORT Komponente gefunden ($F_{1.864,16.773} = 3{,}815, P < 0{,}05$). Für jeden einzelnen der fünf Zeitpunkte konnte auch hier über einen ANOVA gezeigt werden, dass $V_{||3D}$ $V_{\perp 3D}$ signifikant überschreitet. Parallel zur 3D-Hypothese werden in Abbildung 3.36 die Ergebnisse der 3D+Ori2-Hypothese gezeigt. Es ergibt sich für beide Hypothesen ein ähnliches Bild. Bei allen Bedingungen und allen Bewegungssegmenten ist, bis auf eine kurzzeitliche Ausnahme (S4-E4, BS 2, nicht abgebildet), immer ein UCM-Effekt erkennbar. Ähnlich wie in den vorhergehenden Experimenten liegt $V_{\perp 3D+Ori2}$ etwas über $V_{\perp 3D}$.

3.3.4 MEQ zur Koartikulationsdetektion - Experiment 3a

Die MEQ Analyse für antizipatorische und carry-over Koartikulation ist in den Abbildungen 3.37 und 3.38 für alle möglichen Vergleiche dargestellt. $MEQ_{\perp 3D}$ fällt sowohl für antizipatorische Koartikulation (0,005 rad/DoF bis 0,022 rad/DoF) als auch für carry-over Koartikulation (0,005 rad/DoF bis 0,02 rad/DoF) relativ gering aus. $MEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt

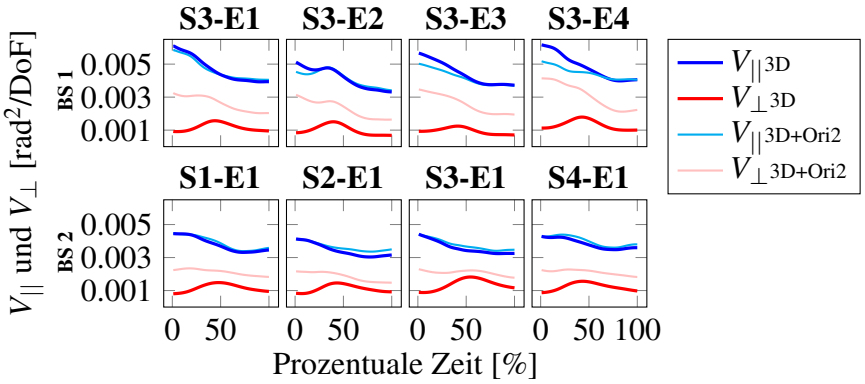

Abbildung 3.36: Ergebnisse der UCM-Varianzanalyse für vier Bedingungen (S3-E$_i$, bzw. S1-E$_i$), beide Bewegungssegmente und beide Hypothesen. $V_{||}$ übertrifft hier $V_\perp$. (Experiment 3a)

mit Werten zwischen 0,01 rad/DoF und 0,03 rad/DoF für antizipatorische Koartikulation und Werten zwischen 0,01 rad/DoF und 0,05 rad/DoF für carry-over Koartikulation knapp darüber. $MEQ_{||}{}^{3D}$ und $MEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ sind sich relativ ähnlich und liegen mit Werten im Bereich von 0,02 rad/DoF bis 0,05 rad/DoF bei antizipatorischer Koartikulation und Werten im Bereich von 0,02 rad/DoF bis 0,1 rad/DoF bei carry-over Koartikulation. Insgesamt erscheint carry-over Koartikulation deutlich präsenter als antizipatorische Koartikulation. Eine weitere Analyse der Daten erscheint jedoch auch hier für die genauere Interpretation nützlich.

Die statistische Analyse der Gelenkwinkelkonfigurationen zur Ermittlung von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_\perp$ über MANOVAs wurde wiederum nach dem gleichen Prinzip wie in den vorherigen Experimenten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen keine antizipatorische Koartikulation mehr (Abbildung 3.39a). Keine der Komponenten steigt zu keinem der gemessenen Zeitpunkte über 3 %. Carry-over Koartikulation kann dagegen immer noch gut nachgewiesen werden (Abbildung 3.39b). Es zeigt sich hier wiederum die typische Struktur. Carry-over Koartikulation ist in deutlich größerem Maß auf der Ebene der Gelenkwinkel ($pMEQ_{||}$) als auf Ebene des Endeffektors ($pMEQ_\perp$) sichtbar. $pMEQ_{||}{}^{3D}$ startet bei 32,9 % und sinkt über die Zeit bis 21,7 %. $pMEQ_\perp{}^{3D}$ liegt zwischen 8,75 % (Zeitpunkt 1 %) und 4,17 % (Zeitpunkt 75 %). Ähnlich verhalten sich $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $pMEQ_\perp{}^{3D+Ori2}$ mit Verläufen von 38,7 % zu 22,1 % bzw. von 10,4 % über 12,1 % zu 7,92 %.

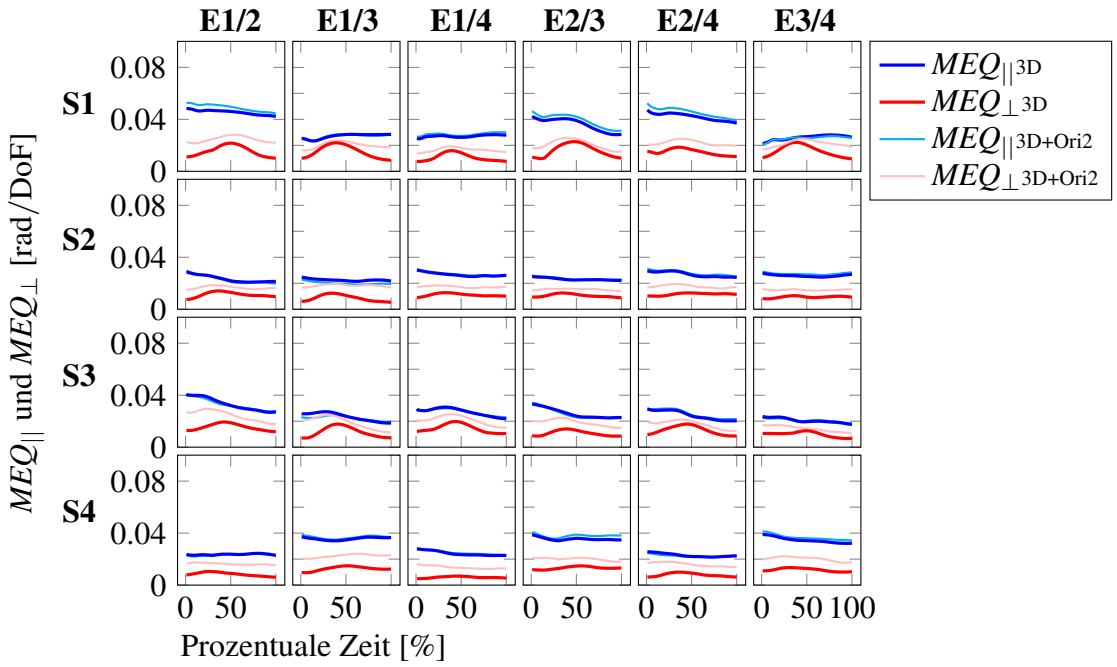

Abbildung 3.37: $MEQ_{||}$ ist immer etwas über $MEQ_{\perp}$. Alle Vergleiche beider Hypothesen sind hier zur Erkennung von antizipatorischer Koartikulation für das ersten Bewegungssegment aufgetragen. (Experiment 3a)

3.3.5 Vergleich der MEQ Ergebnisse von Experiment 2a und 3a

Experiment 2a und Experiment 3a sind bis auf zwei Punkte völlig gleich aufgebaut. Im Gegensatz zu Experiment 2a wurde in Experiment 3a eine Pause von 2 s zwischen den einzelnen Bewegungssegmenten eingehalten. Welchen Einfluss diese Pause hat, kann man leicht erkennen, wenn man die Ergebnisse der MANOVAs von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ miteinander vergleicht. Da in Experiment 2a jede der 16 Bedingungen 12 mal wiederholt und in Experiment 3a die Bedingungen nur 10 mal wiederholt werden, kann sich dieser Unterschied auf die Anzahl signifikant positiv gefundener Ergebnisse ($pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ auswirken. Um beide Experimente daher gut vergleichen zu können, wurden für den Vergleich in Abbildung 3.40 auch für Experiment 2a nur die ersten zehn Wiederholungen des Versuches mit einbezogen. Da Hypothese 3D und 3D+Ori2 sich sehr ähnlich sind und auch aus Gründen der Übersicht werden bei diesem Vergleich nur die Daten der 3D-Hypothese hinzugezogen.

Ist in Experiment 2a noch antizipatorische Koartikulation zu finden ($pMEQ_{||3D}$ mit einem Maximum zu Zeitpunkt 100 % mit 13,8 und $pMEQ_{\perp 3D}$ mit 9,58 %), fällt sie bei Experiment 3a eigentlich fast komplett weg (Abbildung 3.40a). Weniger auffallend, aber im direkten Vergleich gut sichtbar sind die Ergebnisse bei carry-over Koartikulation (Ab-

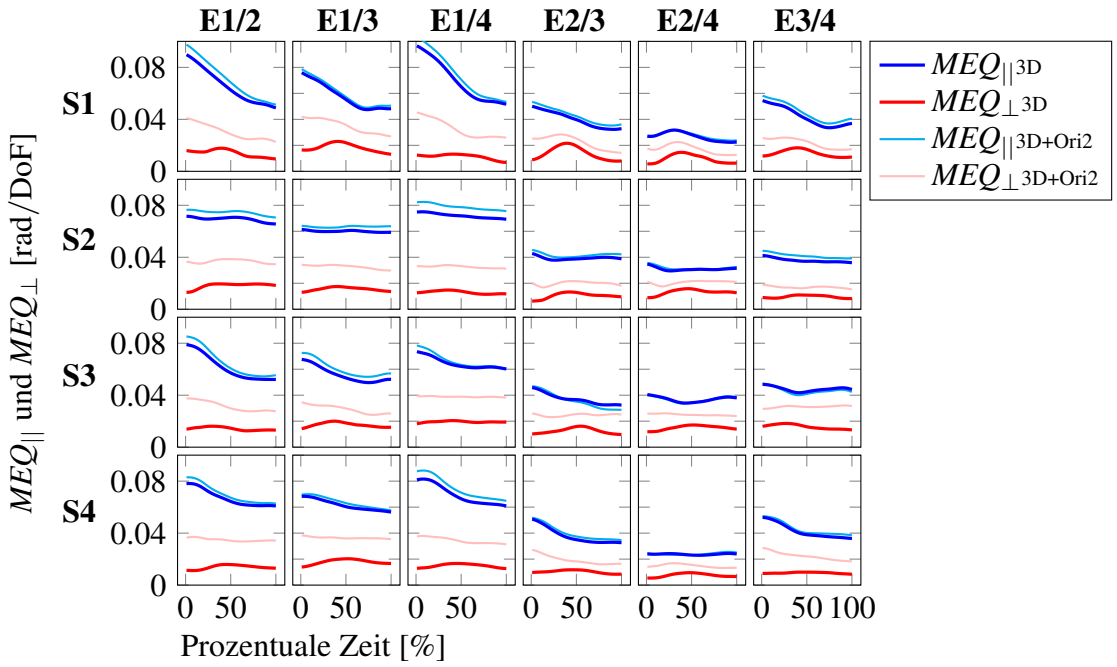

Abbildung 3.38: $MEQ_{||}$ liegt immer über $MEQ_{\perp}$. Alle Vergleiche beider Hypothesen sind hier für das zweite Bewegungssegment aufgetragen zur Erkennung von carry-over Koartikulation. (Experiment 3a)

bildung 3.40b). Hier bleibt in Experiment 3a der Verlauf von $pMEQ_{||}{}^{3D}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ erhalten. Beide sind aber im Vergleich zu Experiment 2a reduziert. Der Unterschied beträgt hier im Durchschnitt 14,08 % für $pMEQ_{||}{}^{3D}$ bzw. 5,75 % für $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$.

3.3.6 MEQ Analyse von Experiment 3b

Experiment 3b ist bis auf die Pause von 2 s zwischen den Bewegungssegmenten und $N = 32$ im Gegensatz zu $N = 50$ äquivalent zu Experiment 2b. Anhand des Experimentes kann also der Einfluss der Pause auf antizipatorische Koartikulation mit vier Bedingungen untersucht werden. Da der Effekt im Gegensatz zu carry-over Koartikulation bereits bei den vorangehenden Experimenten mit wenig Wiederholungen sehr schwach ausfiel bzw. bei Experiment 3a nicht mehr zu erkennen war, erscheint diese genauere Analyse mit mehr Wiederholungen sinnvoll.

In Abbildung 3.41 sind die MEQ Ergebnisse abgebildet. $MEQ_{||}{}^{3D}$ liegt im Bereich von 0,02 rad/DoF bis 0,008 rad/DoF und $MEQ_{\perp}{}^{3D}$ im Bereich von 0,009 rad/DoF bis 0,002 rad/DoF. $MEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ und $MEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ haben einen ähnlichen Verlauf und liegen minimal erhöht. Abbildung 3.43a zeigt wiederum die statistische Analyse

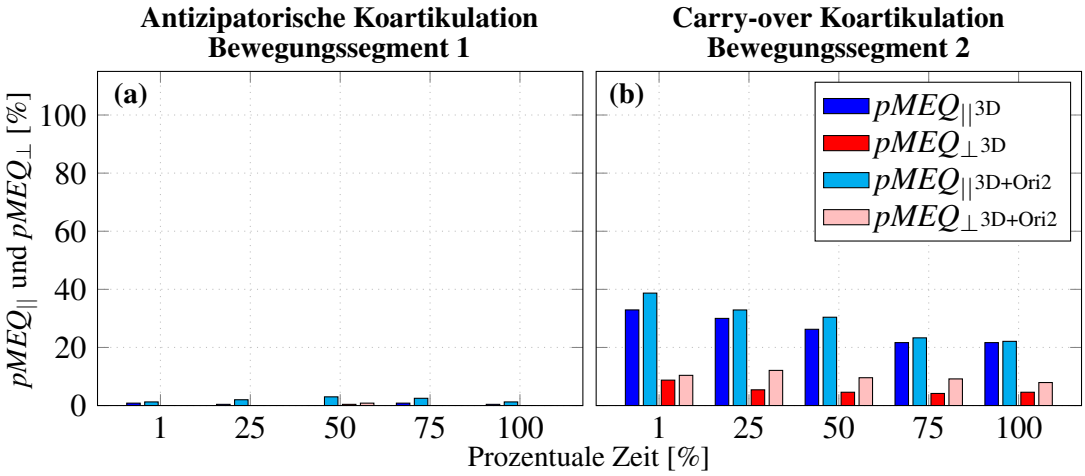

Abbildung 3.39: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ sind im ersten Bewegungssegment (a) kaum sichtbar, d.h. sie geben keine Hinweise auf antizipatorische Koartikulation. Im zweiten Bewegungssegment ist $pMEQ_{\perp}$ schwach und $pMEQ_{||}$ gut sichtbar, d.h. carry-over Koartikulation kann angenommen werden. (Experiment 3a).

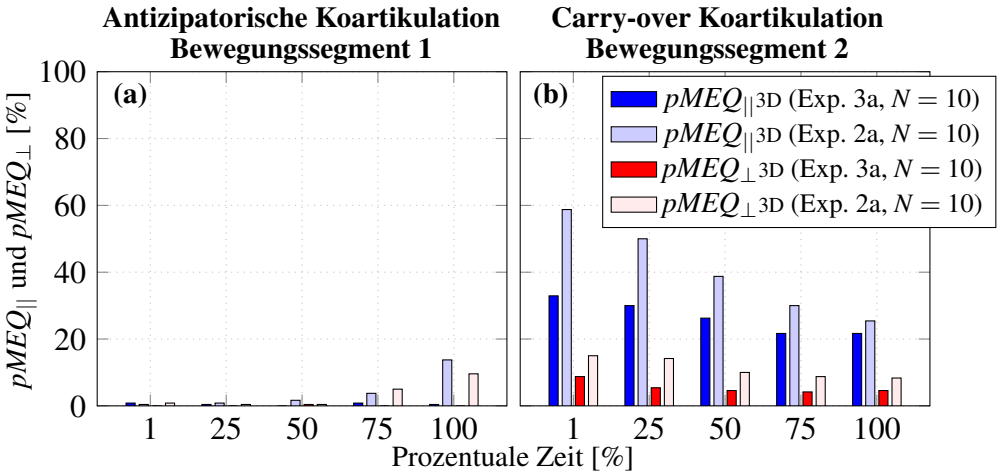

Abbildung 3.40: $pMEQ_{||}$3D und $pMEQ_{\perp}$3D im ersten (antizipatorische Koartikulation; a) und zweiten Bewegungssegment (carry-over Koartikulation; b) sind für Experiment 3a ($N = 10$) und Experiment 2a ($N = 10$ (von 12)) gezeigt. Die Werte sind bei Experiment 3a für beide Koartikulationsarten im Vergleich zu den Werten bei Experiment 2a deutlich reduziert.

dieser Komponenten mit Hilfe von MANOVAs. Auch mit der größeren Anzahl von Wiederholungen ist es hier nicht möglich antizipatorische Koartikulation zuverlässig zu zeigen. Lediglich zum Zeitpunkt 75 % ist bei allen Komponenten ein Anteil von 1,67 % zu sehen, ebenso bei Zeitpunkt 1 % für $MEQ_{||}$3D+Ori2. Zum Zeitpunkt 100 % kann nur für die MEQ3D+Ori2 ein Anteil von 3,33 % gefunden werden.

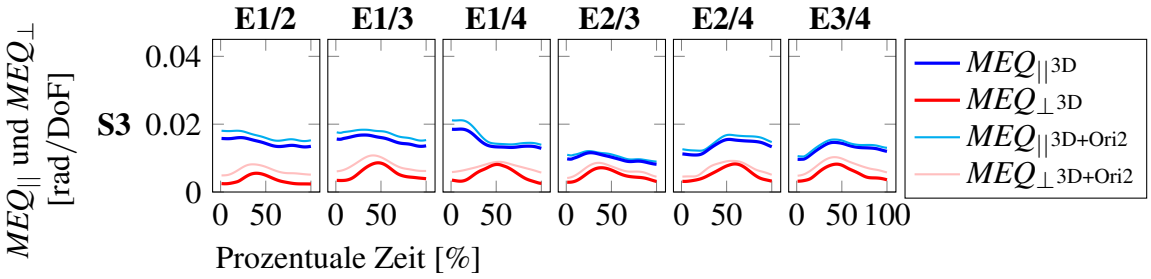

Abbildung 3.41: $MEQ_{||}$ liegt für alle Vergleiche im ersten Bewegungssegment etwas über $MEQ_{\perp}$. (Experiment 3b)

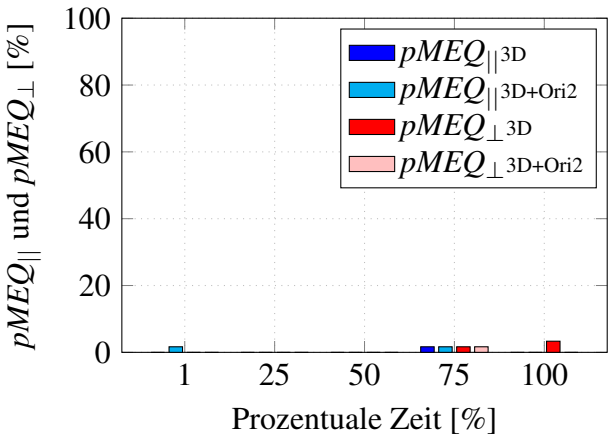

Abbildung 3.42: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ im ersten Bewegungssegment weisen für keine der beiden Hypothesen auf antizipatorische Koartikulation hin. (Experiment 3b)

Abbildung 3.43b zeigt diese Ergebnisse aus Experiment 3b ($N = 32$) nochmals im Vergleich zu Experiment 2b (aus Vergleichbarkeit nur mit den ersten 32 aus 50 Wiederholungen, $N = 32$) und für die 3D-Hypothese. Der Unterschied ist wiederum äußerst deutlich. Ohne Pause zwischen den Bewegungssegmenten (Experiment 2b) lässt sich antizipatorische Koartikulation mit einem Anstieg von beiden Komponenten von 0 % zum Zeitpunkt 1 % bis zu 46,7 % zum Zeitpunkt 100 % für die $MEQ_{||}{}^{3D}$ und von 0 % zu Zeitpunkt 1 % bis 38,3 % zu Zeitpunkt 100 % für $MEQ_{\perp}{}^{3D}$ feststellen. Für Experiment 3b können dagegen kaum signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen ermittelt werden. $MEQ_{||}{}^{3D}$ und $MEQ_{\perp}{}^{3D}$ steigen nicht über 3,33 %.

3.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 3a, 3b

Die Ergebnisse von antizipatorischer und carry-over Koartikulation für diese beiden Experimente sind vor allem im Vergleich mit den Experimenten 2a und 2b interessant. So

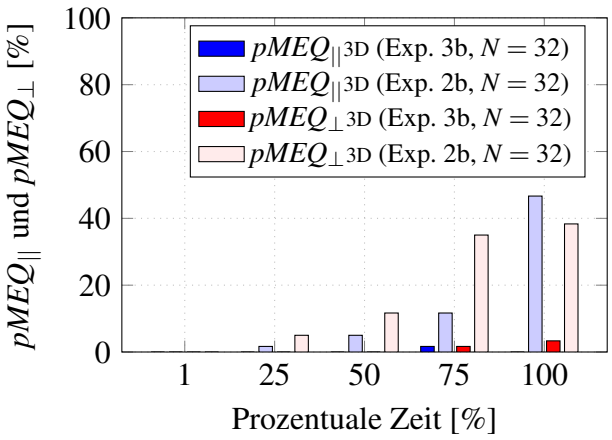

Abbildung 3.43: $pMEQ_{||}{}^{3D}$ und $pMEQ_{\perp}{}^{3D}$ im ersten Bewegungssegment weist nur für Experiment 2b ($N = 32$ (von 50)), nicht aber bei Experiment 3b ($N = 32$) auf antizipatorische Koartikulation hin.

führt eine Pause zwischen den beiden Bewegungssegmenten von 2 s dazu, dass antizipatorische Koartikulation weder auf Ebene des Endeffektors (Endeffektorposition für die 3D-Hypothese und Endeffektorposition plus zweidimensionale Endeffektor-Orientierung für die 3D+Ori2-Hypothese) noch auf Ebene der Gelenkwinkel nachgewiesen werden kann. Dies gilt sowohl für Bedingungen, welche 10-mal (mit 16 verschiedenen Bedingungen, Experiment 3a) als auch für Bedingungen, welche 32-mal (mit 4 verschiedenen Bedingungen, Experiment 3b) wiederholt wurden. Im Gegensatz dazu ist antizipatorische Koartikulation sowohl bei Experimenten 2a als auch 2b, welche beide keine eingebaute Pause haben, zu erkennen.

In Experiment 3a lässt sich carry-over Koartikulation im Gegensatz zu antizipatorischer Koartikulation, trotz der Pause zwischen den Bewegungssegmenten, für beide Hypothesen nachweisen. Vergleicht man Experiment 3a mit Experiment 2a (bis auf die Pause gleich aufgebaut), so reduziert sich der Anteil an Koartikulation sowohl auf Endeffektor- ($pMEQ_{\perp}$) als auch auf Gelenkwinkelebene. Carry-over Koartikulation bleibt dennoch auch in Experiment 3a gut sichtbar.

3.4 Experiment 4

Bisher wurden nur Sequenzen aus zwei Bewegungssegmenten untersucht. Im ersten Segment konnte antizipatorische Koartikulation und im zweiten Segment carry-over Koartikulation analysiert werden. Im Folgenden wird nun entsprechend dem Schema der obigen Experimente eine Sequenz aus drei Bewegungssegmenten gezeigt. Hier ist es nicht

nur möglich antizipatorische und carry-over Koartikulation über mehrere Segmente zu untersuchen, sondern auch eine Kombination aus beiden Koartikulationsarten kann für das mittlere Bewegungssegment analysiert werden.

3.4.1 Versuchsaufbau - Experiment 4

An diesem Versuch nahmen sechs Frauen und vier Männer im Alter von 19 bis 37 Jahren ($\mu = 28$, $SD = \pm 5{,}21$) teil. Alle waren gesund, Rechtshänder (nach eigenen Angaben) und, bis auf zwei Teilnehmer, naiv im Bezug auf den Zweck des Versuches.

Der Versuchsaufbau bestand aus acht kreisförmigen Zielpositionen (Abbildung 3.44). Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten saß der Proband nicht mittig vor dem Versuchsaufbau, sondern die rechte Schulter wurde mittig zur Achse der Zielpositionen 2, C_1 und 6 positioniert. Damit war sichergestellt, dass auch in diesem größeren Bewegungsbereich der Proband mit seinem rechten Arm alle Zielpositionen gut erreichen konnte. Insgesamt gab es neun verschiedene Bedingungen, welche 23-mal in pseudo-randomisierter Reihenfolge durchgeführt wurden. Die Dreier-Sequenz begann bei einer der rechten Startpositionen 2, 4 oder 6. Das Objekt wurde von dort zur Zielposition C_1 geführt (erstes Bewegungssegment), von dort weiter zu Zielposition C_2 (zweites Bewegungssegment) und weiter zur Endposition 1, 3 oder 5 (drittes Bewegungssegment). Ähnlich wie in den vorherigen Experimenten kann eine Bedingung durch die Startposition des ersten Bewegungssegmentes und die Endposition des letzten Bewegungssegmentes beschrieben werden. Die Zielpositionen des zweiten Bewegungssegments waren über alle Bedingungen gleich (C_1, C_2).

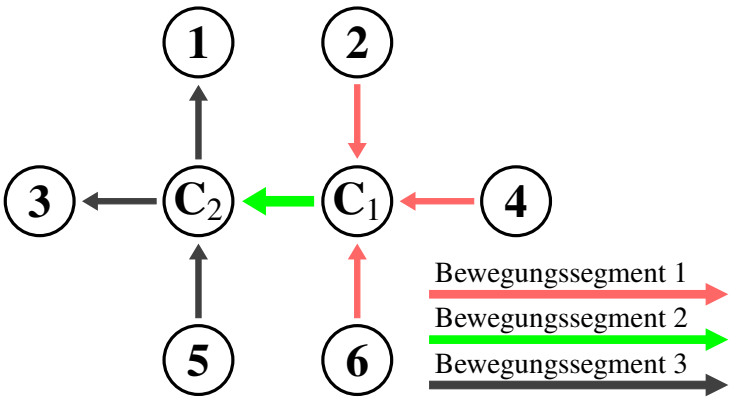

Abbildung 3.44: Versuchsaufbau Experiment 4: Probanden bewegten ein zylindrisches Objekt von einer der drei rechten Startpositionen 2, 4 oder 6 zur Zielposition C_1, weiter zur Zielposition C_2 und schließlich zu einer der drei linken Endpositionen 1, 3 oder 5. Ein Durchgang bestand demnach aus 3 Bewegungssegmenten.

Der Versuchsablauf ist dem Ablauf von Experiment 1 und 2 sehr ähnlich. Der graue Kreis, der vor Beginn eines Durchganges erschien, befand sich an Zielposition C_1 (Abbildung 3.45 oben links). Ab dort änderte der Proband den Griff am Objekt nicht mehr. Nun wurde die Startposition als grüner Kreis auf dem Bildschirm dargestellt (markiert mit dem Wort „Start“, Abbildung 3.45 oben Mitte). Hatte der Proband das Objekt dort abgestellt, wurden nun die nachfolgenden Zielpositionen jetzt in gelb (markiert mit der Nummer 1), orange (markiert mit Nummer 2) und rot (markiert mit Nummer 3) gezeigt (Abbildung 3.45 oben rechts). Nach 3 s verschwand das Bild und alle im Experiment vorhandenen Zielpositionen wurden als graue Kreise dargestellt (Abbildung 3.45 unten links). Ein Signal ertönte und der Proband bewegte das Objekt daraufhin zu den vorher gezeigten Zielpositionen. Der Durchgang war darauf beendet und der nächste konnte beginnen.

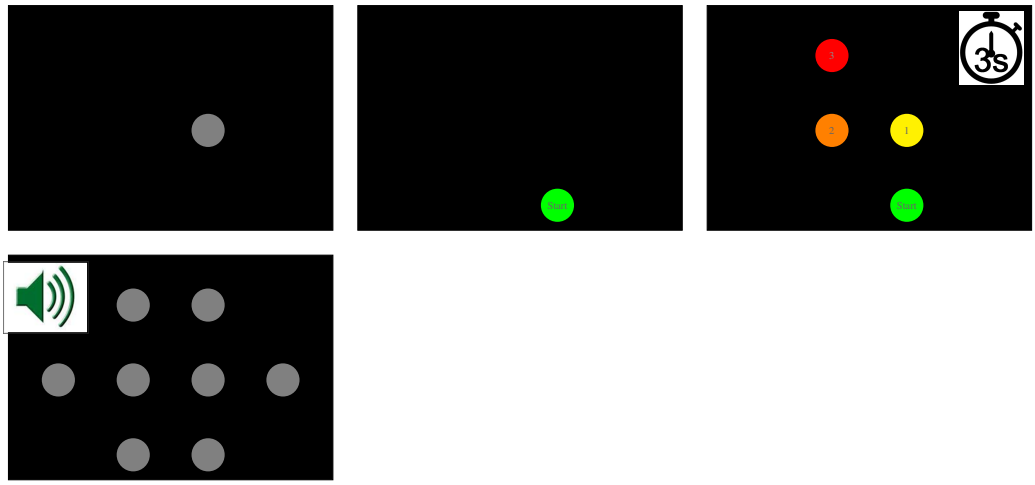

Abbildung 3.45: Abfolge eines Durchganges von Experiment 4 auf dem Monitor: (Bild oben links) Der Proband positionierte das Objekt auf dem grauen Kreis (Zielposition C_1). (Bild oben Mitte) Der Startpunkt wurde in grün dargestellt. Das Objekt wurde vom Probanden dort abgestellt. (Bild oben rechts) Der Verlauf der Bedingung wurde durch farblich markierte Zielpositionen für 3 s angezeigt. (Bild unten links) Alle im Experiment vorhandenen Zielpositionen wurden als graue Kreise dargestellt und nach einem Signalton transportiert der Proband das Objekt der Reihe nach zu den zuvor markierten Zielpositionen.

Alle ermittelten Daten wurden in Bezug auf ihre Vollständigkeit kontrolliert. Durch verdeckte Marker, Reflexionen, falsch erinnerte Zielpositionen oder Ähnlichem konnte es hierbei zu Ausfällen kommen. 15,7 % der Trajektorien aus Experimenten 4 konnten daher nicht für die Analyse verwendet werden.

Antizipatorische Koartikulation kann für Bedingungen untersucht werden, in denen sich die nachfolgenden Bewegungssegmente unterscheiden. Carry-over Koartikulation kann

untersucht werden, wenn vorangehende Bewegungssegmente unterschiedlich sind. Dabei muss dieser Unterschied nicht im direkt vorangehenden oder nachfolgenden Bewegungssegment auftreten, sondern kann auch weiter zurückliegen. So kann antizipatorische Koartikulation bereits im ersten (und zweiten) Bewegungssegment bei Bedingungen untersucht werden, bei denen sich die Bewegung erst im dritten Bewegungssegment unterscheidet. Da hierdurch die möglichen Vergleiche für beide Koartikulationsarten in diesem Experiment etwas umfangreicher sind, werden die verschiedenen Möglichkeiten in Abbildung 3.46 veranschaulicht.

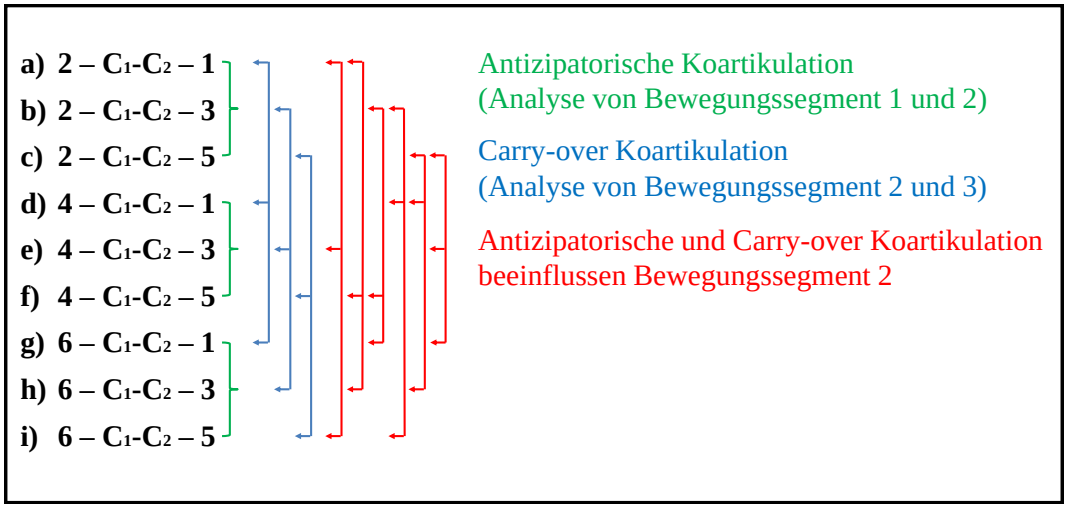

Abbildung 3.46: Veranschaulichung der Vergleiche, welche zwischen den Bedingungen zur Analyse von antizipatorischer und carry-over Koartikulation, sowie einer Kombination aus beiden Koartikulationsarten durchgeführt werden können. Jede der angezeigten Gruppen lässt Vergleiche zwischen den Gruppenmitgliedern zur angegebenen Koartikulationsart zu. (Experiment 4)

Die möglichen acht Bedingungen sind mit den Buchstaben a-i gekennzeichnet. Antizipatorische Koartikulation kann im Vergleich der Bedingungen [a,b,c], [d,e,f] bzw. [g,h,i] untersucht werden. Jede der Vergleichsgruppen unterscheidet sich nur in ihrer Endposition. Antizipatorische Koartikulation kann hier jeweils im ersten Bewegungssegment und im zweiten Bewegungssegment untersucht werden. Für jedes Bewegungssegment sind demnach neun Vergleiche möglich. Carry-over Koartikulation kann innerhalb der Gruppen [a,d,g], [b,e,h] und [c,f,i] analysiert werden. Auch dies entspricht einer Anzahl von jeweils neun Vergleichsmöglichkeiten für das zweite und für das dritte Bewegungssegment. Eine Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation kann dagegen nur im zweiten Bewegungssegment untersucht werden. Hier können alle Bedingungen miteinander verglichen werden, welche sich sowohl in ihrer Startposition, als auch in ihrer Endposition unterscheiden. Die Zielpositionen innerhalb des zweiten

Bewegungssegmentes sind hier mit C_1 und C_2 immer gleich. Mögliche Vergleiche sind hier z.B. Bedingung a mit Bedingung e. Es gibt 18 mögliche Vergleiche zwischen den Bedingungen.

3.4.2 Allgemeine Analyse der Bewegungen - Experiment 4

Für das erste Bewegungssegment brauchten die Probanden im Durchschnitt 0,55 s ($SD = \pm 0{,}059$ s), für das zweite 0,52 s ($SD = \pm 0{,}056$ s) und für das dritte 0,53 s ($SD = \pm 0{,}059$ s). Die durchschnittliche Geschwindigkeit betrug dabei 0,33 m/s ($SD = \pm 0{,}036$ m/s), 0,35 m/s ($SD = \pm 0{,}036$ m/s) bzw. 0,33 m/s ($SD = \pm 0{,}034$ m/s). Dabei lag die über die Probanden gemittelte maximale Geschwindigkeit bei 0,57 m/s ($SD = \pm 0{,}074$ m/s), 0,58 m/s ($SD = \pm 0{,}058$ m/s) bzw. 0,54 m/s ($SD = \pm 0{,}059$ m/s).

Ebenso zeigte sich bei der Varianzanalyse der UCM zur 3D-Hypothese, dass zu jedem Zeitpunkt die Varianz bei $V_{||}$ signifikant größer ist als bei $V_{\perp}$. Eine ANOVA mit den Faktoren Zeit (Zeitpunkt 1, 25, 50, 75 und 100 % pro Bewegungssegment), Bedingung und UCM/ORT Komponente ergab für das erste Bewegungssegment $F_{1,9} = 38{,}066, P < 0{,}001$, für das zweite Bewegungssegment $F_{1,9} = 31{,}247, P < 0{,}001$ und für das dritte Bewegungssegment $F_{1,9} = 12{,}937, P < 0{,}001$. Im ersten und zweiten Bewegungssegment zeigte sich eine Interaktion zwischen Zeit und UCM/ORT ($F_{1.159,10.429} = 9{,}118, P < 0{,}001$ bzw. $F_{1.916,17.248} = 5{,}403, P = 0{,}002$). Eine Analyse über alle einzelnen dieser fünf Zeitpunkte in den beiden Bewegungssegmenten zeigte ebenfalls, dass $V_{||}$ signifikant größer als $V_{\perp}$ ist. In Abbildung 3.47 sind die über alle Probanden gemittelten Varianzen für jeweils drei typische Bedingungen über alle drei Bewegungssegmente aufgezeichnet. Ähnliches gilt für die Varianzanalyse zur 3D-Ori2-Hypothese. Auch hier gilt: $V_{||} > V_{\perp}$. Im Vergleich zu den Ergebnissen der 3D-Hypothese ist ${V_{\perp}}^{\text{3D+Ori2}}$ etwas größer als ${V_{\perp}}^{\text{3D}}$. ${V_{||}}^{\text{3D}}$ und ${V_{||}}^{\text{3D+Ori2}}$ sind sich relativ ähnlich.

3.4.3 MEQ Analyse von Experiment 4

Für dieses Experiment werden wiederum durch die statistische Analyse der Gelenkwinkelkonfigurationen über MANOVAs die Werte für $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ ermittelt. Im Folgenden wird zuerst antizipatorische Koartikulation untersucht. Unterscheidet sich nur das dritte Bewegungssegment zweier Bedingungen durch seine Endposition, können die ersten beiden auf antizipatorische Koartikulation hin untersucht werden. Abbildung 3.48 zeigt, dass im ersten Bewegungssegment noch keine bzw. nur minimal antizipatorische Koartikulation zu finden ist. Sowohl für die 3D- als auch die 3D+Ori2-Hypothese liegt

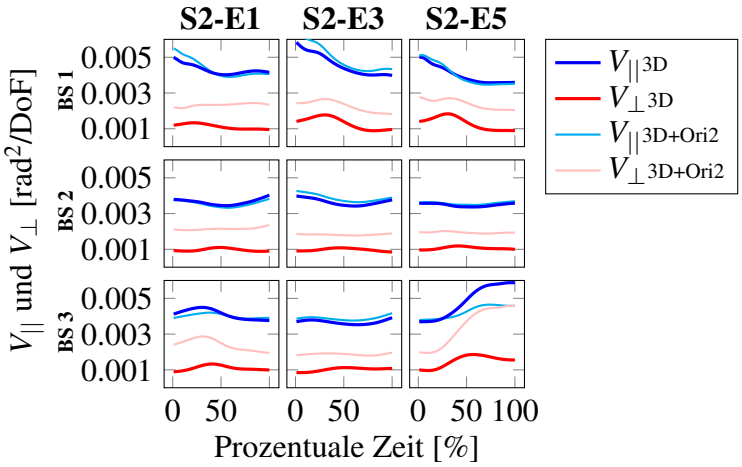

Abbildung 3.47: Ergebnisse der UCM-Varianzanalyse für drei typische Bedingungen (S2-E1, S2-E3, S2-E5) und die drei Bewegungssegmente. $V_{||}$ liegt immer über $V_{\perp}$. (Experiment 4)

$pMEQ_{\perp}$ bei 0 % und $pMEQ_{||}$ nicht höher als 1,2 %. Sichtbarer ist antizipatorische Koartikulation im zweiten Bewegungssegment. Hier steigt $pMEQ_{||}{}^{3D}$ von 1,1 % auf 35,6 % an und $pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ erreicht zum Zeitpunkt 100 % sein Maximum mit 14,4 %. $pMEQ_{||}{}^{3D+Ori2}$ steigt bis 36,7 % und $pMEQ_{\perp}{}^{3D+Ori2}$ bis 26,7 %.

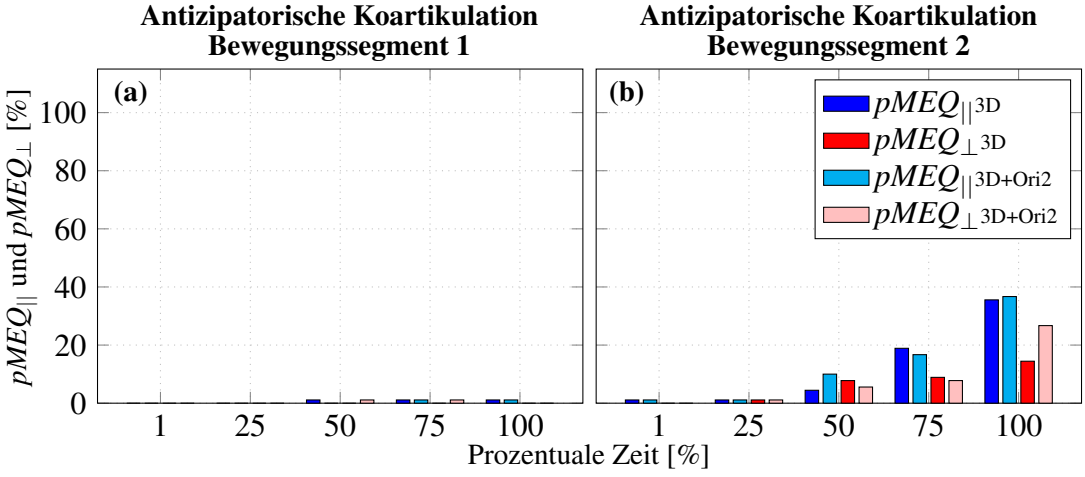

Abbildung 3.48: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{||}$ sind für das erste (a) und zweite Bewegungssegment (b) für beide Hypothesen aufgetragen. Erst für das zweite Bewegungssegment ist antizipatorische Koartikulation erkennbar. (Experiment 4).

Um carry-over Koartikulation zu untersuchen, werden hier nun Bedingungen verglichen, welche sich nur im ersten Bewegungssegment unterscheiden. Carry-over Koartikulation kann für das zweite und dritte Bewegungssegment untersucht werden. In Abbildung 3.49

sind die Ergebnisse zur motorischen Äquivalenz mit Hilfe von MANOVAs für $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ und die Hypothesen 3D und 3D+Ori2 aufgetragen. Im zweiten Bewegungssegment sinkt $pMEQ_{||3D}$ von 85,6 % bei Zeitpunkt 1 % leicht aber kontinuierlich ab auf 64,4 % bei Zeitpunkt 100 %. $pMEQ_{\perp 3D}$ hat Werte bei 27,8, 16,7, 7,8, 12,2 und 13,3 % bei den gemessenen Zeitpunkten von 1 % bis 100 %. $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ zu carry-over Koartikulation haben einen ähnlichen Verlauf im dritten Bewegungssegment. Dort fallen die Werte lediglich etwas geringer aus. $pMEQ_{||}$beginnt bei 70,0 % und sinkt bis 41,1 %. $pMEQ_{\perp}$ dagegen liegt bei Werten im Bereich von 11,1 % (Zeitpunkt 1 %) und 2,2 % (Zeitpunkt 100 %). $pMEQ_{||3D+Ori2}$ und $pMEQ_{\perp 3D+Ori2}$ zeigen einen ähnlichen Verlauf. $pMEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt jedoch immer etwas höher als der entsprechende Wert bei der 3D-Hypothese.

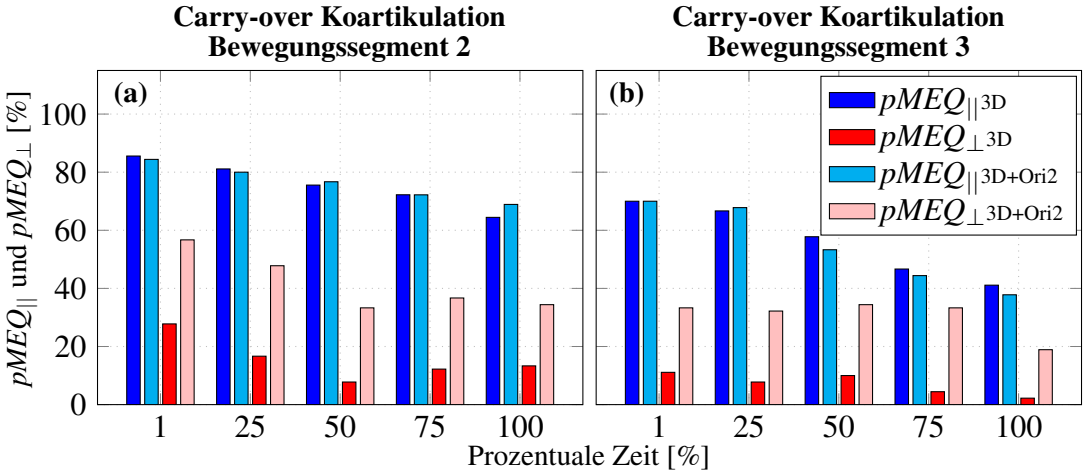

Abbildung 3.49: $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ bei Vergleichen, welche carry-over Koartikulation zeigen können. Carry-over Koartikulation ist bei beiden Bewegungssegmenten sichtbar. Zusätzlich erkennt man vor allem bei $pMEQ_{||}$ einen leicht sinkenden Verlauf über beide Bewegungssegmente hinweg. (Experiment 4)

3.4.4 Vergleich von antizipatorischer und carry-over Koartikulation bei Experiment 4 und Experiment 2a

Experiment 4 ist aus drei Bewegungssegmenten und Experiment 2a aus zwei Bewegungssegmenten aufgebaut. Trotzdem gleichen sich beide Experimente durch eine ähnliche Anordnung der Zielpositionen jedoch sehr. Wie ähnlich sich die beiden Experimente auch im Hinblick auf ihre Ergebnisse sind, wird in Abbildung 3.50, hier dargestellt für die 3D-Hypothese, deutlich. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind hier beide Experimente mit nur 12 Wiederholungen ($N = 12$) dargestellt, da dies der Gesamtanzahl

von Experiment 2a entspricht. Die ursprüngliche Anzahl von Wiederholungen bei Experiment 4 liegt bei 23. Abbildung 3.50a stellt die Ergebnisse für antizipatorische Koartikulation graphisch dar. Verglichen werden hier jeweils die Bewegungssegmente, bei denen sich das nachfolgende Bewegungssegment unterscheidet. Für Experiment 4 ist das das zweite (mittlere), für Experiment 2a das erste Bewegungssegment. Sowohl der Verlauf als auch die Größe der Komponenten $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ sind sich relativ ähnlich. Der durchschnittliche Unterschied zwischen beiden Experimenten ($pMEQ_{||}(Experiment\ 2a) - pMEQ_{||}(Experiment\ 4)$) liegt bei $-0{,}1397\,\%$ und für $pMEQ_{\perp}(Experiment\ 2a) - pMEQ_{\perp}(Experiment\ 4)$ bei $-1{,}4453\,\%$.

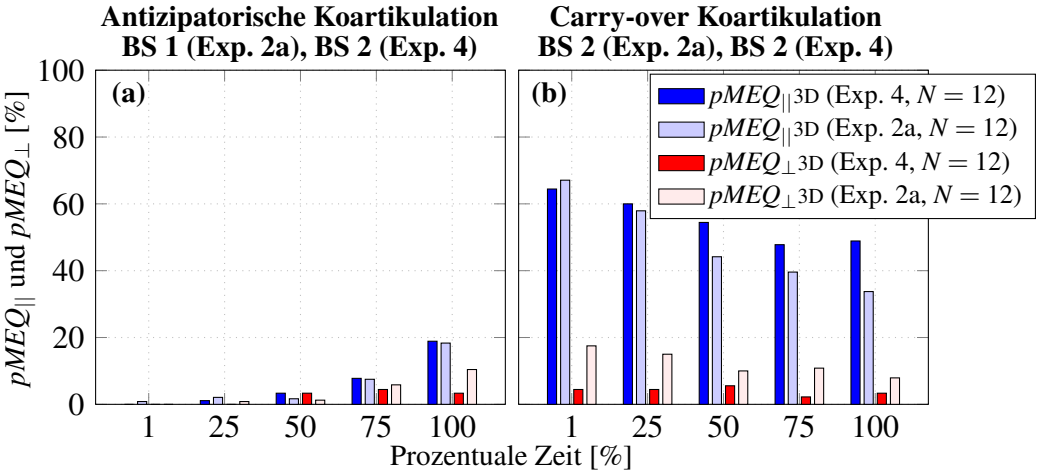

Abbildung 3.50: Vergleich der Daten aus Experiment 4 ($N = 12$ (von 23), BS 2) mit Experiment 2a ($N = 12$, BS 1 bzw. B 2) zur Erkennung von antizipatorischer (a) und carry-over Koartikulation (b) im direkt vorausgehenden/nachfolgenden Bewegungssegment. Sowohl $pMEQ_{||3D}$, als auch $pMEQ_{\perp 3D}$ verhalten sich sehr ähnlich und lassen Koartikulation vermuten.

In Abbildung 3.50b sind entsprechende Daten für carry-over Koartikulation dargestellt. Es wird das zweite (mittlere) Bewegungssegment aus Experiment 4 und das zweite (letzte) Bewegungssegment aus Experiment 2a verglichen. Jeweils das direkt vorangehende Bewegungssegment unterscheidet sich bei den Bedingungen. Auch hier zeigt ein Vergleich zwischen beiden Experimenten ähnliche Ergebnisse ($pMEQ_{||}(Experiment\ 2a) - pMEQ_{||}(Experiment\ 4) = -6{,}6100\,\%$); $pMEQ_{\perp}(Experiment\ 2a) - pMEQ_{\perp}(Experiment\ 4) = 8{,}2496\,\%$.

3.4.5 Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation bei Experiment 4

Vergleicht man das zweite (mittlere) Bewegungssegment verschiedener Bedingungen aus Experiment 4 miteinander, so können sich die Bedingungen durch unterschiedliche vorangehende und/oder unterschiedliche nachfolgende Bewegungssegmente unterscheiden. Ist beides der Fall, so kann eine Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation entstehen. Dies ist in Abbildung 3.51b dargestellt. Hier sind mit Hilfe von MANOVAs Unterschiede zwischen Gelenkwinkelkonfigurationen auf Ebene der Endeffektorebene und Gelenkwinkelebene untersucht worden. Die hierbei verglichenen Bedingungen unterschieden sich sowohl durch ein unterschiedlich erstes, als auch ein unterschiedlich drittes Bewegungssegment. $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ ändern sich nur schwach über die Zeit. Die Werte von $pMEQ_{||}$ sind für die 3D- und 3D+Ori2-Hypothese sehr ähnlich und liegen im Bereich von 82,2 % und 69,4 %. $pMEQ_{\perp 3D}$ befindet sich zwischen 13,3 % und 26,1 % und $pMEQ_{\perp 3D+Ori2}$ liegt dazu um durchschnittlich 28,3 % erhöht. In Abbildung 3.51a ist der Einfluss von antizipatorischer und in Abbildung 3.51c der Einfluss von carry-over Koartikulation auf das jeweils direkte Nachbarsegment nochmals dargestellt. Die hier verwendeten Vergleiche von Bedingungen sind, das sollte nochmals betont werden, nicht dieselben wie in Abbildung 3.51b, sondern die verglichenen Bedingungen unterscheiden sich nur im dritten (Abbildung 3.51a) oder im ersten (3.51c) Bewegungssegment. Tatsächlich wirkt das Ergebnis im zweiten Bewegungssegment bei der Kombination von beiden Koartikulationsarten auf ein Bewegungssegment (Abbildung 3.51b) auf den ersten Blick wie eine Zusammensetzung aus antizipatorischer (Abbildung 3.51a) und carry-over Koartikulation (Abbildung 3.51c). Dies gilt für beide Hypothesen. Der Anstieg $pMEQ_{\perp}$ und besonders von $pMEQ_{||}$ bei antizipatorischer Koartikulation (a) und der Abfall von $pMEQ_{||}$ bei carry-over Koartikulation (c) finden sich in der Kombination beider Koartikulationsarten in Abbildung 3.51b wieder.

3.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experiment 4

Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten beinhaltet Experiment 4 eine Bewegungssequenz aus drei Bewegungssegmenten. Somit lässt sich nicht nur antizipatorische und carry-over Koartikulation, sondern auch eine mögliche Kombination aus beiden Koartikulationsarten untersuchen.

Das Auftreten von antizipatorischer Koartikulation kann zwischen Bedingungen untersucht werden, welche sich im letzten Bewegungssegment (BS 3) unterscheiden (unter-

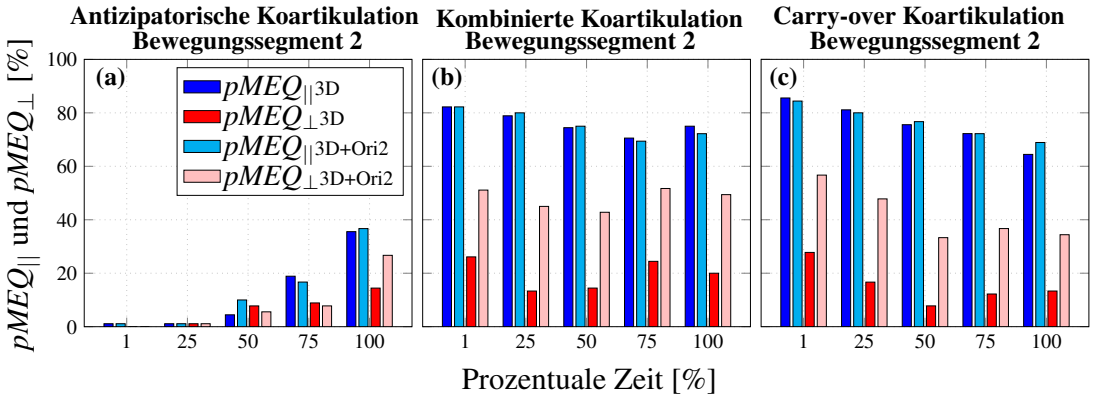

Abbildung 3.51: Dargestellt sind dreimal die Ergebnisse für $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ für das zweite Bewegungssegment aus Experiment 4 und die 3D- und 3D+Ori2-Hypothese. (a) Antizipatorische Koartikulation ist sichtbar (Bedingungen mit unterschiedlicher Endposition in BS 3 werden verglichen). (b) Kombination von antizipatorischer und carry-over Koartikulation kann gezeigt werden (Bedingungen mit unterschiedlicher Startposition in BS 1 und Endposition in BS 3 werden verglichen. (c) Carry-over Koartikulation ist sichtbar (Bedingungen mit unterschiedlicher Startposition in BS 1 werden verglichen).

schiedliche Endpositionen). Antizipatorische Koartikulation lässt sich hierbei jedoch nur im zweiten Bewegungssegment und somit dem unterschiedlichen Bewegungssegment 3 direkt benachbarten Segment nachweisen. Im ersten Bewegungssegment findet sich keine antizipatorische Koartikulation. Dies gilt sowohl für die 3D- als auch die 3D+Ori2-Hypothese.

Carry-over Koartikulation kann zwischen Bedingungen untersucht werden, welche sich im ersten Bewegungssegment (BS 1) unterscheiden (unterschiedliche Startposition). Carry-over Koartikulation verhält sich gänzlich anders und ist sowohl über das nächste Bewegungssegment (BS 2) als auch über das darauf folgende (BS 3) noch gut zu erkennen. Auch dieses Ergebnis findet sich für beide Hypothesen.

Untersucht man Bedingungen, welche sich sowohl im ersten Bewegungssegment (unterschiedliche Startposition, BS 1) als auch im letzten Bewegungssegment (unterschiedliche Endposition, BS 3) unterscheiden, so zeigt sich im zweiten Bewegungssegment Koartikulation, welche vom Aufbau ungefähr der Summe aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation gleicht. Auch dies gilt für beide Hypothesen. Der Anstieg von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ bei antizipatorischer Koartikulation und der Abfall bei carry-over Koartikulation heben sich auf. $pMEQ_{||}$ liegt dabei deutlich über $pMEQ_{\perp}$ (vgl. carry-over Koartikulation).

4 Diskussion

Punkt-zu-Punkt-Bewegungssequenzen wurden in meinen Experimenten unter möglichst natürlichen Bedingungen untersucht. Dies bedeutet, dass im Labor Armbewegungen durchgeführt wurden, bei denen die Bewegungen des Armes und der Schulter nicht eingeschränkt waren. Ebenso wurde die Objektbewegung mit komfortabler Geschwindigkeit im dreidimensionalen Raum durchgeführt. Die Bewegung selbst ist sehr einfach aufgebaut, und es werden keine besonderen Leistungen bei deren Planung oder Ausführung erzwungen.

Insgesamt wurden sieben Experimente (Experiment 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b und 4) durchgeführt, welche verschiedene Aspekte von Sequenzbewegungen untersuchten. Diese Aspekte werden im Folgenden genauer erläutert.

Besonders beachtenswert ist jedoch die Tatsache, dass die Ergebnisse aller Experimente ein sehr einheitliches Bild zeigen:

- Bei alle Experimenten lässt sich für die Varianzanalyse ein UCM-Effekt zeigen ($V_{||} > V_{\perp}$).
- Koartikulation lässt sich mit der Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ) auf der Ebene des Endeffektors (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren; $GWK_{\perp}$) und der Ebene der Gelenkwinkel (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen; $GWK_{||}$) gut untersuchen und vergleichen. Bei der weiteren Analyse muss jedoch beachtet werden, dass es bei den Berechnungen zu einer Verfälschung der Ergebnisse durch ein Bias kommen kann. Dies wurde jedoch erkannt und durch eine Erweiterung der Methode umgangen.
- Antizipatorische Koartikulation lässt sich innerhalb unserer Experimente gut nachweisen. Sie tritt jedoch in relativ schwacher Form auf und steigt über die Zeit leicht an. Antizipatorische Koartikulation tritt in ähnlichem Ausmaß auf Endeffektorebene wie auf Gelenkwinkelebene auf.
- Carry-over Koartikulation ist innerhalb der Versuche deutlich sichtbar und sinkt leicht über die Zeit. Carry-over Koartikulation ist sehr robust und lässt sich hier, im Gegensatz zu antizipatorischer Koartikulation, auch über mehr als ein Bewegungssegment nachweisen. Die Koartikulation ist vor allem auf Ebene der Gelenkwinkel sichtbar.

4.1 Genauigkeit

Beim Design der Experimente bemühte ich mich darum zwischen den einzelnen Probandenmessungen und innerhalb jeder einzelnen Bewegung möglichst einheitliche Bedingungen zu schaffen und somit Ungenauigkeiten in den Messdaten zu vermeiden. So dauerte jede Probandenmessung nur ca. eineinhalb Stunden, um Ermüdungserscheinungen zu vermeiden. Außerdem fand jede Messung in denselben Räumlichkeiten mit demselben Equipment statt.

Um nicht bereits vor dem Bewegungsstart Unterschiede bei den verschiedenen Bedingungen zu initiieren, wurden die Bedingungen nicht nur in pseudo-randomisierter Reihenfolge präsentiert, sondern vor jeder einzelnen, noch unbekannten Bewegung wurde das Objekt an die gleiche mittlere Position gesetzt. Ab diesem Zeitpunkt durfte der Griff am Objekt nicht mehr verändert werden und konnte so auch nicht auf die nachfolgende Bedingung angepasst werden. Dass diese Maßnahme gut wirkte, zeigte sich auch daran, dass zu Bewegungsbeginn (erstes Bewegungssegment, Zeitpunkt 1 %), keine antizipatorische Koartikulation stattfand. Für $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ wurde hier ein Durchschnittswert von nicht einmal 0,46 % über alle Experimente und für beide Hypothesen (3D, 3D+Ori2) gemessen.

Dennoch sind bei den Messungen selbst gewisse Ungenauigkeiten nicht vollständig vermeidbar. Sie können folgende Gründe haben:

- Bei der Aufnahme der LED Marker kann es zu Reflexionen am Monitor oder anderen Flächen und Objekten kommen, die durch den Versuchsaufbau nicht komplett verhindert werden können.

  Dies führt zumeist zu scheinbar sprunghaften Markerpositionsänderungen, welche extrem starke Beschleunigungen voraussetzen würden. Diese werden erkannt und entsprechende Daten können entfernt werden.

- Softwarebedingte Kalibrierungsfehler zwischen den drei Kamerasystemen können auftreten. Diese Fehler können sich auf die einzelnen Marker unterschiedlich auswirken und ihr Auftreten ist im Gegensatz zu Reflexionen unauffälliger.

  Um sie zu erkennen, wird die Eigenschaft der starren Körper (rigid bodies) genutzt. Auf jedem starren Körper, bestehend aus festen Thermoplastplättchen, befinden sich jeweils drei Marker, welche im festen Abstand zueinander angeordnet sind.

Ändert sich mindestens einer dieser Abstände, muss es sich um einen Messfehler handeln. Insgesamt können bei hiesigen Experimenten vier starre Körper mit jeweils drei Markern ausgewertet werden.

- Da die starren Körper nicht direkt auf den Knochen der Probanden platziert werden können, kann es bei den Armbewegungen zu Verschiebungen der starren Körper aufgrund von Muskelkontraktionen und -relaxation kommen. Dies wirkt sich auf die zu berechnenden Gelenkwinkel aus. Um Fehler in den ermittelten Gelenkwinkeldaten möglichst zu vermeiden, wurde eine Optimierungsmethode, basierend auf einem geometrischen Modell des Armes angewandt (*2.4.3 Berechnung der Winkel zwischen den starren Körpern und Optimierung der Gelenkwinkel*).

Um zu erkennen, wie präzise die hier ermittelten Daten, genauer gesagt die Gelenkwinkeldaten, tatsächlich sind, wurde folgender Test durchgeführt. Der Test vergleicht die tatsächlich gemessenen Markerpositionen der Hand mit den Markerpositionen der Hand, welche aus den berechneten und optimierten Gelenkwinkeln (rück)ermittelt wurden. Die Marker der Hand stellen in unserem System jeweils das Ende der kinematischen Kette dar. Etwaige Fehler sind hier aufsummiert. Diese Berechnung wird für alle Daten (Experimente, Probanden, Bedingungen, Wiederholungen und Durchgänge) durchgeführt. Die Abweichung liegt im Mittel bei 2,44 mm. Tabelle 4.1 listet diesen Vergleich nochmals für die einzelnen Experimente gesondert und mit ihren jeweiligen Standardabweichungen auf. Die ermittelten Unterschiede und die dazugehörigen Standardabweichungen sind sehr klein und betonen damit die Validität der Daten.

Tabelle 4.1: Gemittelte Differenz zwischen den gemessenen Markerpositionen der Hand und den aus den zehn Gelenkwinkeln (rück)ermittelten Markerpositionen der Hand

Experimentnr.	Differenz der Markerpositionen [mm]	SD [mm]
1	2,27	1,45
2a	2,34	2,42
2b	2,15	1,58
2c	2,10	1,85
3a	3,13	2,77
3b	2,86	1,72
4	2,21	2,54

4.2 Geschwindigkeit

Die Versuche durften von den Probanden mit einer für sie komfortablen Geschwindigkeit durchgeführt werden. Desweiteren wurden zur Geschwindigkeit keine weiteren Vorgaben gegeben. Dies sollte ebenfalls die natürliche Bewegung der Probanden fördern. Tritt Koartikulation in diesen einfachen Bewegungsabläufen ohne direkten Optimierungsbedarf hinsichtlich Geschwindigkeitsmaximierung überhaupt noch auf? Im Vergleich zu vielen anderen Koartikulationsstudien, ist dieses Vorgehen eher ungewöhnlich. Es wird häufig versucht Koartikulation durch eine möglichst schnelle Bewegungsausführung zu erzwingen oder zu vergrößern (Engel et al, 1997; Klein Breteler et al, 2003; Sosnik et al, 2004). Keine maximale Geschwindigkeit, aber dennoch eine deutliche Vorgabe zur Geschwindigkeit machten van der Wel et al (2007) in ihren Versuchen, indem sie die Dauer jedes Bewegungssegmentes mit einem Metronom vorgaben.

Daher ist es erwähnenswert, dass trotz der relativ vagen Vorgaben zur Bewegungsausführung sich die Geschwindigkeiten der Probanden, gemessen am Endeffektor, innerhalb der einzelnen Experimente in hiesiger Studie wenig unterschieden und auch die Geschwindigkeiten der verschiedenen Experimente untereinander recht ähnlich ausfielen (Tabelle 4.2). Sowohl antizipatorische als auch carry-over Koartikulation wird, wie die Ergebnisse zeigen, durch diese Vorgehensweise nicht verhindert.

Tabelle 4.2: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten $\bar{v}$ der einzelnen Experimente und Bewegungssegmente (BS) sind hier gelistet. Einheit: m/s.

Exp.	$\bar{v}$ (BS1)	SD (BS1)	$\bar{v}$ (BS2)	SD (BS2)	$\bar{v}$ (BS3)	SD (BS3)
1	0.28	$\pm$0.030	0.29	$\pm$0.033	-	-
2a	0.34	$\pm$0.036	0.33	$\pm$0.033	-	-
2b	0.30	$\pm$0.029	0.30	$\pm$0.034	-	-
2c	0.29	$\pm$0.026	0.30	$\pm$0.033	-	-
3a	0.28	$\pm$0.029	0.28	$\pm$0.031	-	-
3b	0.28	$\pm$0.027	0.27	$\pm$0.030	-	-
4	0.33	$\pm$0.036	0.35	$\pm$0.036	0.33	$\pm$0.034

In Experiment 1, 2a, 2b und 2c wurde der genaue Geschwindigkeitsverlauf der beiden Bewegungssegmente genauer beschrieben (Abbildung 3.3, 3.19, 3.20, 3.21). Das gaußförmige und relativ symmetrische Geschwindigkeitsprofil entspricht den meisten in der Literatur zu findenden Geschwindigkeitsprofilen bei Punkt-zu-Punkt-Bewegungen (Georgopoulos et al, 1981; Morasso, 1981; Nelson, 1983; Soechting und Lacquaniti, 1981;

Dounskaia, 2007). Eine sehr leichte Unregelmäßigkeit der Kurve gegen Ende der Bewegungssegmente (Veränderung der Geschwindigkeit), welche bei einigen Bewegungssegmenten der verschiedenen Bedingungen, vor allem aber bei Experiment 1 zu erkennen ist, könnte mit der Korrektur des Objektes zur Zielposition zusammenhängen. Diese Vermutung kann durch Experiment 2c untermauert werden. Hier wurde während der Bewegung kein visuelles Feedback zur Zielposition gegeben und tatsächlich wirkt der Geschwindigkeitsverlauf bei genauer Betrachtung etwas gleichmäßiger (Abbildung 3.21). Die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsverläufen sind jedoch nur sehr minimal.

4.3 Ungeregelte Mannigfaltigkeit - UCM

Die Hypothese zur Ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) besagt, dass die Gelenkwinkelkonfigurationen, welche nicht aufgabenrelevant sind, weniger stark vom Nervensystem geregelt werden als Gelenkwinkelkonfigurationen, welche aufgabenrelevant sind. Die Redundanz des motorischen Systems Arm kann somit vom Nervensystem genutzt werden, um stabil und flexibel auf Störungen reagieren zu können. Die Methode der UCM testet diese Hypothese durch eine Messung der Varianzen. Die UCM-Hypothese wird hier bezüglich der 3D- und der 3D+Ori2-Hypothese untersucht. Dies besagt, dass im ersten Fall die aufgabenrelevante Variable der dreidimensionalen Position des Endeffektors entspricht. Bei der 3D+Ori2-Hypothese wird dagegen als Aufgabenvariable die dreidimensionalen Endeffektorposition zusammen mit der für den Endeffektor (ein zylindrisches Objekt) relevante zweidimensionale Orientierung getestet. Entsprechend der UCM-Hypothese sollte $V_{||}$ (Varianz für Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable invariant lassen) größer als $V_{\perp}$ (Varianz für Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable variieren) sein. Dieses Ergebnis wird als UCM-Effekt bezeichnet und wurde bereits in den verschiedensten Experimenten nachgewiesen (Scholz und Schöner, 1999; Scholz et al, 2000, 2002; Reisman et al, 2002; Tseng et al, 2002, 2003; Domkin et al, 2002; Jacquier-Bret et al, 2009; van der Steen und Bongers, 2011). Auch alle hiesigen Experimente (Abbildung 3.4, 3.22, 3.36 und 3.47) replizieren diesen Effekt und unterstützen damit ebenfalls die UCM-Hypothese. Dies gilt sowohl für die Aufgabenvariable der 3D-Hypothese wie die der 3D+Ori2-Hypothese.

Die Varianzen innerhalb beider Hypothesen (3D, 3D+Ori2) sind sich sehr ähnlich. Lediglich die Varianz $V_{\perp\,\mathrm{3D+Ori2}}$ ist zu $V_{\perp\,\mathrm{3D}}$ leicht erhöht. Dies zeigt einerseits, dass die Orientierung des Endeffektors innerhalb eines gewissen Rahmens variiert. Andererseits zeigt sich durch den Vergleich der beiden Hypothesen auch, dass der UCM-Effekt

nicht primär durch Variationen in der Endeffektor-Orientierung zustandekommen kann ($V_{||}{}^{3D} \approx V_{||}{}^{3D+Ori2}$). Beachtet man dies und die Tatsache, dass die Endeffektor-Orientierung (Objektorientierung) nicht zur expliziten Aufgabenstellung an die Probanden gehörte, so erscheint es sinnvoll die Endeffktorposition als aufgabenrelevante Variable zu betrachten (3D-Hypothese). Andererseits kommt die Bewegung nicht gänzlich ohne die Endeffektor-Orientierung aus und so wird auch bei nachfolgenden Analysen die 3D+Ori2-Hypothese parallel zur 3D-Hypothese betrachtet werden.

In den Studien von van der Steen und Bongers (2011) und Krüger et al (2012) zeigt sich ein relativ typischer Anstieg der UCM-Kurve zu Beginn einer Bewegung. In hiesiger Studie dagegen zeigt die Varianzanalyse, dass die Varianz $V_{||}$ über den gesamten Zeitraum recht hoch ausfällt und sich nur relativ geringe Schwankungen zeigen. Dies kann damit zusammenhängen, dass die Gelenkwinkelkonfigurationen bei van der Steen und Bongers (2011) und Krüger et al (2012) zu Beginn der Bewegung relativ stark vorgegeben sind. Diese geringe Varianz am Anfang spiegelt sich in einer geringen Varianz $V_{||}$ an dieser Stelle wieder. In meinen Experimenten ist ein höherer Wert $V_{||}$ am Anfang zu erwarten, da die anfängliche Gelenkwinkelkonfiguration des Armes nur über die Objektposition bestimmt wird. Dass $V_{||}$ auch weiterhin relativ hohe Werte einnimmt, und dies über den gesamten Zeitverlauf für alle Bewegungssegmente und für alle Bedingungen, zeigt, dass der Arbeitsbereich, in dem die Armbewegungen stattfinden, gut gewählt ist. Keine der Bedingungen scheint die Gelenkwinkelmöglichkeiten des Armes komplett auszunutzen. Es bleibt immer noch eine große Variabilität erhalten, welche augenscheinlich vom System genutzt wird.

Ein typisches Phänomen der UCM-Varianzanalyse ist zudem ein leichtes Ansteigen von $V_{\perp}$ in der Bewegungsmitte (Tseng et al, 2003; Scholz et al, 2000), also in dem Bereich, der die höchste Endeffektorgeschwindigkeit aufweist. Werden die Trajektoriendaten der einzelnen Bewegungssegmente bei der Berechnung der UCM leicht versetzt zueinander angeordnet, führt dies zu einem Anstieg der Varianz. Für die Varianz der Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition beinhalten ($V_{\perp}$), zeigen sich die Auswirkungen besonders deutlich und vor allem an Stellen mit hoher Endeffektorgeschwindigkeit (Bewegungsmitte). Betrachtet man in unseren Experimenten den Verlauf von $V_{\perp}$, so zeigt sich das beschriebene Phänomen nur relativ schwach und fällt neben den anderen ebenfalls recht schwachen Schwankungen von $V_{||}$ kaum auf (Abbildung 3.4, 3.22, 3.36 und 3.47). Dies lässt also vermuten, dass die Trajektorien der einzelnen Bedingungen sehr einheitlich zueinander angeordnet sind.

4.4 Endeffektor- und Gelenkwinkeltrajektorien

Innerhalb der Experimente 1 und 2a findet sich eine Analyse der Endeffektorpfade, Endeffektortrajektorien und Gelenkwinkeltrajektorien. Auf Ebene des Endeffektors lässt sich jedoch kein Koartikulationseffekt nachweisen (Abbildung 3.5, 3.6 und 3.23). Anscheinend ist innerhalb dieser Ebene Koartikulation schwer messbar, wie auch ähnliche (Fehl-)Versuche in der Literatur zeigen (Klein Breteler et al, 2003).

Die Analyse der Gelenkwinkeltrajektorien ist dagegen ergiebiger. Hier finden sich deutliche Hinweise auf carry-over Koartikulation. Die Gelenkwinkelunterschiede, welche im ersten Bewegungssegment mit unterschiedlicher Startposition entstehen, bleiben auch über das zweite Bewegungssegment, trotz hier gleicher Zielpositionen, erhalten und gehen nur leicht zurück (Abbildung 3.8 und 3.25). Etwas weniger auffallend ist es bei antizipatorischer Koartikulation. Doch auch hier geben die Gelenkwinkel Hinweise auf antizipatorische Koartikulation (Abbildung 3.7i, j und 3.24). Gelenkwinkel können bereits im ersten Bewegungssegment, trotz gleicher Startposition variieren. Dies ist jedoch deutlich weniger auffällig als bei carry-over Koartikulation.

Eine einheitliche Analyse aller zehn Gelenkwinkeltrajektorien ist jedoch schwierig, da sich anatomisch unterschiedliche Gelenkwinkel entsprechend unterschiedlich verhalten. Zusätzlich muss beim Vergleich von Bedingungen berücksichtigt werden, dass sich der Verlauf der Gelenkwinkel nach unterschiedlichen Zielpositionen ausrichtet.

4.5 Analyse von Koartikulation durch die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ)

Bereits in der Einleitung wurde hervorgehoben, dass die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ) geeignet erscheint, die Fragestellung nach dem Einfluss des Kontextes auf Bewegungen detaillierter und systematischer zu betrachten, als es durch eine reine Analyse der Endeffektortrajektorien und Gelenkwinkel möglich wäre. Die Methode der MEQ erlaubt es das Verhalten von Endeffektor und Gelenkwinkeln zu untersuchen und miteinander zu vergleichen, obwohl ein direkter Vergleich zwischen diesen beiden Komponenten aufgrund ihrer unterschiedlichen Dimensionalität sinnlos erscheint. Die Endeffektortrajektorien liegen im dreidimensionalen kartesischen Raum und werden in Zentimetern gemessen. Die Gelenkwinkel dagegen sind zehn-dimensional und werden durch ihren Radius bestimmt.

Die Methode der MEQ löst dieses Problem, indem alle Daten in den Gelenkwinkelraum übertragen werden. Es wird zwischen Gelenkwinkelkonfigurationen unterschieden, welche den Endeffektor (Endeffektorposition oder Endeffektorposition plus zweidimensionale Orientierung des Endeffektors) invariant lassen ($GWK_{||}$) und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren ($GWK_{\perp}$). Erstere werden hier als motorisch äquivalente Lösungen einer Bewegung bezeichnet. Somit kann die Frage nach dem Einfluss des Kontextes genauer gestellt und beantwortet werden. Wie beeinflussen sich vorangehende und nachfolgende Bewegungssegmente gegenseitig und in welchem Maß wirkt sich dieser Einfluss auf die Endeffektorebene ($GWK_{\perp}$) und auf die Gelenkwinkelebene ($GWK_{||}$) aus? Liegt der Einfluss mehr auf Endeffektorebene, so stehen die motorisch äquivalenten Lösungen nicht im Vordergrund. Über ein solches Verhalten könnte man Rückschlüsse auf die Bedeutung für die Bewegungswahrnehmung und Bewegungsplanung ziehen. Einflüsse, welche dagegen mehr auf Gelenkwinkelebene liegen und zu motorisch äquivalenten Lösungen führen, weisen auf die Bedeutung von Bewegungsregelung hin.

Bisher wurde die Methode der MEQ im Wesentlichen für Studien von Bewegungen mit oder ohne direkte Störung herangezogen. Scholz et al (2007) entwickelten die Methode der MEQ aus der Methode der Ungeregelte Mannigfaltigkeit (UCM). Die Versuchspersonen standen auf einer beweglichen Plattform und der stabile Stand der Probanden wurde während der Versuche durch eine Rückwärtsbewegung der Plattform gestört. Mattos et al (2011) dagegen induzierten die Störung bei den Armbewegungen ihrer Probanden. Während die Probanden auf ein Ziel zeigten, wurde die Bewegung des Ellbogens durch verschiedene Bänder mit unterschiedlicher Elastizität gestört. Als Aufgabenvariable wurde zum Beispiel das Massezentrum (Scholz et al, 2007), die dreidimensionale Position eines Zeigers oder die dreidimensionale Orientierung der Hand gemessen (Mattos et al, 2011).

In hiesigen Versuchen wird der Unterschied zwischen den Bewegungen nicht durch eine direkte Störung, sondern durch unterschiedliche vorangehende oder nachfolgende Bewegungen induziert. Die gefundenen Unterschiede lassen sich daher durch Koartikulation erklären. Koartikulation wird hier als der Einfluss von Bewegungssegmenten auf ihre Nachbarsegmente (ein oder mehrere) beschrieben. Als Aufgabenvariable wird die dreidimensionale Position des Endeffektors (3D-Hypothese) und parallel dazu die dreidimensionale Position des Endeffektors plus die für den Endeffektor (zylindrisches Objekt) relevante zweidimensionale Orientierung (3D+Ori2-Hypothese) getestet.

Bei der Methode der MEQ wird die Länge des Differenzvektor zwischen gemittelten Gelenkwinkelkonfigurationen berechnet, welche für unterschiedliche Kontexte (unterschied-

liche Nachbarsegmente) ermittelt wurden. Diese Länge wird in den UCM und den dazu orthogonalen (ORT) Raum zerlegt und beinhaltet hiermit Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable invariant lassen und Gelenkkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable beeinflussen. Durch eine Normierung der ermittelten Größen aufgrund ihrer unterschiedlichen Dimensionalität erhält man die Werte $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ (*2.6 Motorische Äquivalenz (MEQ)*).

Die Anwendung der MEQ Methode auf die Daten der Studie zeigt zunächst, dass sich die MEQ Analyse auch für hiesige Experimente gut eignet und die Messergebnisse strukturiert untersucht werden können. Da in meinen Versuchen nicht, wie in den oberen zwei von Scholz et al (2007) und Mattos et al (2011) beschriebenen Versuchen eine direkte und deutliche Störung induziert wurde, kann man beim Vergleich zweier hiesiger Bedingungen nicht sicher davon ausgehen, dass ein messbarer Unterschied zwischen beiden Bedingungen besteht. Liegt jedoch kein solcher oder nur ein sehr geringer Unterschied vor, so können die Werte $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$ durch ein Bias verfälscht werden.

Bei der anfangs gemessenen Länge des Differenzvektors zwischen zwei gemittelten Bedingungen handelt es sich um eine Längenangabe, welche demnach auf positive Zahlen beschränkt ist. Auch die hier zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung ist an positive Zahlen gebunden (*3.1.7 Untersuchung des Bias innerhalb der MEQ Analyse*). Liegt somit der Mittelwert aus den Bedingungen oder die daraus resultierende Verteilungskurve nahe Null, so ergibt sich hieraus ein im mathematischen Sinne positives Bias für die Werte $MEQ_{||}$ und $MEQ_{\perp}$. Das Bias kann für $MEQ_{||}$ anders ausfallen als für $MEQ_{\perp}$, da es durch die Varianz (Form der Verteilungskurve) beeinflusst wird. Beachtet man die stärkere Varianz innerhalb des UCM-Unterraumes ($V_{||} > V_{\perp}$, Abbildung 3.4, 3.22, 3.36 und 3.47), so ist bei einem geringen/keinem Unterschied zwischen verschiedenen Bedingungen mit einem stärkeren Bias für $MEQ_{||}$ als für $MEQ_{\perp}$ zu rechnen. Dieses Problem wird jedoch gelöst, indem in einer weiteren Analyse der Unterschied zwischen Bedingungen innerhalb der beiden Unterräume UCM und ORT direkt aus dem Differenzvektor der Gelenkwinkelkonfigurationen ermittelt wird. Durch einfaktorielle MANOVAs für die mehrdimensionalen Gelenkwinkelkonfigurationen und für beide Unterräume kann ein Vergleich vorgenommen werden. Der Faktor ist der Bewegungskontext. Der Prozentsatz, bei dem hierbei signifikante Unterschiede festgestellt werden, wird durch die Komponenten $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ beschrieben.

4.6 Auftreten von antizipatorischer und carry-over Koartikulation

Antizipatorische Koartikulation beschreibt hier den Einfluss von nachfolgenden Bewegungssegmenten auf vorhergehende Segmente. Carry-over Koartikulation beschreibt den Einfluss vorhergehender Bewegungssegmente auf nachfolgende Segmente. Untersuchungen zu antizipatorischer Koartikulation können in allen hier durchgeführten Experimenten für das erste Bewegungssegment und bei Experiment 4 für das erste und zweite Bewegungssegment stattfinden. Carry-over Koartikulation kann bei Experiment 1, 2a und 3a für das zweite Bewegungssegment und bei Experiment 4 für das zweite und dritte Bewegungssegment analysiert werden. Da alle Experimente sehr ähnlich aufgebaut sind, kann antizipatorische und carry-over Koartikulation sowohl innerhalb der Experimente, als auch zwischen den Experimenten mit- und gegeneinander verglichen werden.

Insgesamt fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse auf, dass sich für alle Experimente ein sehr konsistentes Bild ergibt. Es lässt sich sowohl antizipatorische Koartikulation als auch carry-over Koartikulation nachweisen. Antizipatorische Koartikulation nimmt über die Zeit hinweg (innerhalb eines Bewegungssegmentes) zu und betrifft in ähnlichem Maß die Endeffektor- und die Gelenkwinkelebene. Carry-over Koartikulation nimmt über die Zeit hinweg ab und betrifft die Gelenkwinkelebene deutlich stärker als die Endeffektorebene.

Die Ergebnisse zur Koartikulation fallen für beide Hypothesen (3D, 3D+Ori2) vor allem aber für die Gelenkwinkelebene sehr ähnlich aus. Lediglich Koartikulation auf Endeffektorebene ist bei der 3D+Ori2-Hypothese etwas stärker ausgeprägt als bei der 3D-Hypothese. Demzufolge kann Koartikulation auf Gelenkwinkelebene auch nicht primär auf die Orientierung des Endeffektors zurückgeführt werden. Dies ist nachvollziebar, da die Endeffektor-Orientierung, im Gegensatz zur Endeffektorposition, nicht zur expliziten Aufgabenstellung an die Probanden gehörte.

4.6.1 Bewegungsplanung und antizipatorische Koartikulation

Antizipatorische Koartikulation konnte bereits in verschiedensten Experimenten beschrieben werden. Die meisten dieser Experimente betonen hierbei jedoch häufig bestimmte Faktoren, welche antizipatorische Modifikationen begünstigen könnten: Lesbarkeit und Schnelligkeit bei Zeichensprache (Jerde et al, 2003), ein kontinuierlicher Bewegungsablauf über Wegpunkte, welche die Bewegung nicht abbremsen (Bullock et al, 1999), Schnelligkeit aufgrund der Instruktionen durch die Versuchsleiter (Klein Breteler et al,

2003) oder Bewegungen, welche durch ihre stark unterschiedliche Gelenkwinkelkonfiguration zu Bewegungsende bestimmt werden (Rosenbaum et al, 2006). Es ist daher äußerst spannend, dass man hier auch bei einfachen Punkt-zu-Punkt-Bewegungssequenzen antizipatorische Koartikulation finden kann.

Antizipatorische Koartikulation ist auf die Planung einer Bewegung zurückzuführen. Dass es zu dieser antizipatorischen Planung kommt, wurde bereits anhand vieler Beispiele gezeigt. Sternberg et al (1978) beobachteten in ihrer Studie mit professionellen Maschinenschreiberinnen und Sequenzen mit bis zu fünf Anschlägen, dass die Zeit bis zur Ausführung einer Bewegung mit der Länge der nachfolgenden Bewegungssequenz zunahm. Herbort und Butz (2009) zeigten bei Bewegungssequenzen mit Hand und Fingern, dass die Bewegungsinitialisierung früher stattfand, wenn über das zweite Ziel bereits Informationen vorlagen. Ebenso setzt eine möglichst komfortable Gelenkwinkelhaltung zu Bewegungsende (*end-state-comfort*, Rosenbaum et al, 1990, 1996) ein vorzeitiges Planen der Bewegung voraus. Viele Studien gehen außerdem davon aus, dass sich Bewegungsplanung auf die räumlichen Ziele einer Bewegung bezieht. So zeigten (Georgopoulos et al, 1986) bereits, dass Neuronenpolulationen im Motorcortex und Prämotorischen Cortex die Richtung der Hand im Raum codieren können. Auch Verhaltensexperimente bei Armbewegungen über offensichtliche Regelmäßigkeiten (Geschwindigkeitsverläufe, Isochronieprinzip, „2/3 power law“) innerhalb des Endeffektors (Morasso, 1981; Viviani und Flash, 1995) und das ideomotorische Prinzip, laut dem die Bewegung in den gleichen Koordinaten geplant wie wahrgenommen wird (Review: Thomaschke, 2012), unterstützen diese Idee. Betrachtet man die hiesige Studie unter diesen Gesichtspunkten, so stellt man fest, dass anhand der Ergebnisse, genauer gesagt in Experiment 1, 2a, 2b, 2c und 4, nicht nur gezeigt wird, dass es zu antizipatorischer Koartikulation kommt, sondern auch, dass antizipatorische Koartikulation in ähnlichem Maß in der Endeffektorebene und Gelenkwinkelebene auftritt. D.h. der Unterschied zwischen Bedingungen ist auf Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen, in ähnlichem Maß zurückzuführen (Abbildung: 3.16, 3.28, 3.30, 3.33 und 3.48). Damit ist dieses Ergebnis konsistent mit obiger Idee, dass Bewegungsplanung eng mit den räumlichen Zielen einer Bewegung zusammenhängt. Im Hinblick auf Bewegungsplanung ist auch der Anstieg von antizipatorischer Koartikulation über die Zeit mit Annäherung auf das nachfolgende, sich unterscheidende Bewegungssegment gut nachvollziehbar.

Warum sind jedoch bei antizipatorische Koartikulation Gelenkwinkelkonfigurationen, die den Endeffektor betreffen, und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor

invariant lassen, mit ähnlichen Werten beteiligt? Auf den ersten Blick sollte man meinen, dass bei Planung nur Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor betreffen, eine Rolle spielen. Es muss jedoch auch beachtet werden, dass es keinen direkten Prozess bezüglich Planung oder Regelung gibt, bei dem die Gelenkwinkelebene invariant oder stabil gehalten wird (Martin et al, 2009). Dies zeigt sich auch dadurch, dass es zu motorisch äquivalenten Lösungen oder bei der Varianzanalyse der Bewegungen zu UCM-Effekten kommt. Da Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen, demnach anscheinend nicht explizit gehemmt werden, können sich Unterschiede in der Planung (antizipatorische Koartikulation) neben der Ebene des Endeffektors auch auf Gelenkwinkelebene ausweiten.

Experiment 3a und 3b zeigen als einzige einen Versuchsaufbau, durch den antizipatorische Koartikulation innerhalb dieser einfachen Punkt-zu-Punkt-Bewegungen komplett unterdrückt wurde. Durch eine erzwungene Pause von 2 s zwischen Bewegungssegment 1 und 2 wird das Auftreten von antizipatorischer Koartikulation verhindert. Dies gilt nicht nur bei wenigen Wiederholungen (Experiment 3a mit N (Wiederholung) $= 10$, b (Bedingung) $= 16$, Abbildung 3.39 und 3.40), sondern auch bei vielen Wiederholungen (Experiment 3b mit $N = 32$, $b = 4$, Abbildung 3.42 und 3.43). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass keine Planung des zweiten Bewegungssegmentes vor oder während der Ausführung des ersten Bewegungssegmentes stattfindet. Die Pause bewirkt möglicherweise, dass die Bewegungssegmente nicht mehr als Einheit angesehen werden und beide Bewegungssegmente zu unterschiedlichen Zeitpunkten und unabhängig voneinander, möglicherweise direkt vor der Ausführung jedes einzelnen Segmentes, geplant werden.

Planung der Bewegung über mehr als ein Bewegungssegment lässt sich hier für diese einfachen Bewegungssequenzen nicht nachweisen. Antizipatorische Koartikulation wird bei Experiment 4 innerhalb einer Sequenz aus drei Bewegungssegmenten untersucht. Das dritte Bewegungssegment unterscheidet sich hier zwischen den Bedingungen. Antizipatorische Koartikulation kann nur beim zweiten Bewegungssegment (direkt benachbart zum sich unterscheidenden dritten Bewegungssegment), nicht aber beim ersten Bewegungssegment nachgewiesen werden (Abbildung 3.48). Zwar zeigen Beispiele aus der Literatur (Cohen und Rosenbaum, 2004; van der Wel und Rosenbaum, 2007), dass antizipatorische Planung über einen relativ langen Zeitraum möglich ist, doch Studien mit ähnlich simplen Bewegungen konnten antizipatorische Koartikulation ebenfalls nur für das direkt benachbarte Segment zeigen. Klein Breteler et al (2003) fanden zum Beispiel antizipatorische Koartikulation ebenfalls nur für das Nachbarsegment. Allerdings konnte dort, im Gegensatz zur Studie hier, diese nur innerhalb der Armhaltung, d.h. auf

Gelenkwinkelebene, aber nicht auf Endeffektorebene nachgewiesen werden. Womöglich ist Planung über größere Zeiträume bei einfachen Bewegungen auch deshalb schwer zu finden, da hier nur maximal kleine Änderungen in der Bewegungsausführung zu erwarten sind.

Besonders gut lässt sich antizipatorische Koartikulation dagegen bei Experiment 2b und 2c zeigen. In Experiment 2a ist der Effekt ebenfalls, wenn auch nur schwach, sichtbar (wenige Wiederholungen, $N = 12$, $b = 16$, Abbildung 3.28). Der Effekt kann jedoch durch mehr Wiederholungen, wie sie für Experiment 2b und 2c durchgeführt wurden ($N = 50$, $b = 4$), gut untermauert werden (Abbildung 3.30 und 3.33). Diese antizipatorische Koartikulation kann sogar in ähnlicher Weise in Experiment 1 gezeigt werden (Abbildung 3.28), obwohl in diesem Fall der Versuchsaufbau das Auftreten von antizipatorischer Koartikulation noch zusätzlich unterdrücken könnte. Bei Experiemnt 1 wurde im Gegensatz zu den anderen Experimenten keine zusätzliche Zeitspanne (3 s) zwischen der Anzeige der Zielpositionen und dem Bewegungsstart gegeben. Auch wurden die Zielpositionen über die gesamte Bewegung hinweg auf dem Bildschirm angezeigt, so dass es nicht nötig war vor Bewegungsstart bereits den gesamten Bewegungsverlauf zu registrieren oder gar sich diesen zu merken. Bei allen Experimenten findet sich antizipatorische Koartikulation auf mehr oder weniger ähnliche Weise auf Endeffektor- ($pMEQ_{\perp}$) und Gelenkwinkelebene ($pMEQ_{||}$) und über die Zeit steigend. Es lässt sich kein systematischer Unterschied zwischen den beiden Komponenten $pMEQ_{\perp}$ und $pMEQ_{||}$ zeigen.

Experiment 2c erklärt zusätzlich einen Effekt, der bereits vor allem in Experiment 1 und 2b (Abbildung 3.30 und 3.28) sichtbar wurde. Die $pMEQ_{\perp}$ Komponente (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor betreffen) fällt ganz zum Schluss des ersten Bewegungssegmentes etwas ab. Dies könnte auf eine visuell geleitete Korrektur zurückzuführen sein. Bereits Goodale et al (1986) konnten in ihrer Studie die Korrekturbewegungen des Armes auf sich verändernde visuelle Ziele beschreiben. Zwar handelt es sich im hiesigen Fall nicht um ein sich veränderndes Ziel, aber durch das Annähern des Endeffektors an die Zielposition (Zentrum C) könnten nötige Korrekturen im Bezug auf den Endeffektor besser wahr- und vorgenommen werden. Experiment 2c testet diese Hypothese und tatsächlich kann durch das Entfernen einer sichtbaren Zielposition während der Bewegung das Absinken von $pMEQ_{\perp}$ verhindert werden. Anhand dieses Ergebnisses kann demnach eine visuell basierte Regulierung des Endeffektors zum Zielpunkt angenommen werden.

Insgesamt lässt sich demnach sagen, dass Planung, untermauert durch das Auftreten von antizipatorischer Koartikulation, bereits bei diesen einfachen Punkt-zu-Punkt-

Bewegungssequenzen auftritt. Die Unterschiede, die sich zwischen den verschiedenen Bedingungen ergeben, betreffen in ähnlichem Ausmaß sowohl Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren, als auch Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen.

4.6.2 Bewegungsregelung, -planung und carry-over Koartikulation

Carry-over Koartikulation lässt sich in dieser Studie bereits bei Experimenten mit wenigen Wiederholungen deutlich nachweisen (Experiment 1, 2a, 3a, 4). Der Effekt erweist sich innerhalb der unterschiedlichen Experimente als sehr robust. Die Gelenkwinkelebene mit Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen, ist hiervon deutlich stärker betroffen als die Endeffektorebene mit Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor variieren. Unterschiede in den Gelenkwinkelkonfigurationen, welche durch unterschiedliche Bewegungssegmente (Bewegungssegment (BS) 1) bedingt sind, bleiben auch im nachfolgenden Bewegungssegment (BS 2) bestehen und verringern sich nur leicht über die Zeit (Abbildung 3.16b, 3.28b, 3.39b und 3.49). Bereits Soechting et al (1995) beschreiben in ihrer Studie, wie die Anfangshaltung bei Armbewegungen die Endhaltung beeinflusst. Carry-over Koartikulation kann sowohl auf Unterschiede in der Bewegungsplanung, als auch auf Unterschiede in der Bewegungsregelung zwischen den Bedingungen hinweisen. Da vor allem die Gelenkwinkelebene betroffen ist, lässt sich, wie im Folgenden genauer erklärt, vermuten, dass vor allem die Bewegungsregelung zu Auftreten und Verlauf von carry-over Koartikulation beiträgt.

Bewegungsregelung und Eigenbewegung

Wird der Einfluss von Bewegungsregelung auf carry-over Koartikulation beschrieben, so kann man im einfachsten Fall carry-over Koartikulation als Folge der Übersetzung eines Motorplanes auf Ebene des Endeffektors in die Motorsignale der dazugehörigen Gelenkwinkel sehen. Das System des Armes ist jedoch mit seinen zehn Freiheitsgraden (DoF) sehr redundant. Demnach existiert keine eindeutige Übersetzung von der Trajektorie des Endeffektors zu den Gelenkwinkelkonfigurationen des Armes.

In der Robotik werden alle möglichen Übersetzungen durch kinematische Pseudo-Inverse (Whitney, 1969; Liegeois, 1977; Klein et al, 1983) beschrieben. Besonders charakteristisch ist hierbei, dass eine Pseudo-Inverse zu einer Abhängigkeit der Gelenkwinkelkonfiguration am Bewegungsanfang von der Gelenkwinkelkonfiguration am Bewegungsende führt. Bei Endeffektorbewegungen von verschiedenen Anfangspositionen zur gleichen

Endposition treten also nicht nur anfangs unterschiedliche Gelenkwinkelkonfigurationen auf, sondern die Unterschiede in den Konfigurationen bleiben auch bis zur Endposition bestehen. Die kinematische Pseudo-Inverse sagt demnach carry-over Koartikulation voraus.

Diese kinematische Pseudo-Inverse (auch Moore-Penrose-Inverse genannt) sagt jedoch ebenfalls voraus, dass bei einer Bewegung innerhalb eines redundanten Systems keine bzw. kaum Eigenbewegung auftritt (Hollerbach und Flash, 1982). Eigenbewegung bezeichnet die Komponente eines Geschwindigkeitsvektors, welche den Endeffektor nicht beeinflusst (Murray et al, 1994). Eigenbewegung kann also nur innerhalb eines redundanten Systems auftreten. Der Geschwindigkeitsvektor wird dabei nach der Methode der UCM in den UCM-Unterraum (Eigenbewegung) und den ORT-Unterraum (orthogonale Bewegung) unterteilt. Eine genaue Beschreibung findet sich in Scholz et al (2011). Wird demnach vorausgesagt, dass keine/kaum Eigenbewegung auftritt, so bedeutet dies, dass die Geschwindigkeitsvektoren vorwiegend im orthogonalem Unterraum (ORT) und nicht im UCM-Unterraum liegen. Betrachtet man die Effizienz eines Systems, so erscheint Eigenbewegung zunächst überflüssig. Sie ist jedoch wichtig, um mehr als eine Aufgabe simultan auszuführen, wie das Halten eines Wasserglases in der Hand und das gleichzeitige Betätigen des Lichtschalters mit dem Ellenbogen (Scholz et al, 2011).

Ob es dennoch bei den einfach aufgebauten Punkt-zu-Punkt-Bewegungssequenzen in dieser Studie zu Eigenbewegung kommt, wurde beispielhaft in Experiment 1 überprüft. In Abbildung 4.1 sind die Geschwindigkeitsvektoren über die Zeit in ihre beiden Komponenten parallel zur UCM (Eigenbewegung) und orthogonal dazu (orthogonale Bewegung) aufgeteilt. Da für das erste Bewegungssegment wenig Koartikulation sichtbar ist, sind hier alle Bedingungen zu unterschiedlichen Endpositionen, aber gleicher Startposition, aus Übersichtsgründen gemittelt. Für das zweite Bewegungssegment sind alle 18 Bedingungen über die Zeit aufgelistet. Es zeigt sich deutlich, dass die Eigenbewegung nicht bei Null liegt und in vielen Fällen sogar den Anteil der orthogonalen Bewegung deutlich übersteigt. Während der Anteil an orthogonaler Bewegung über die verschiedenen Bedingungen hinweg relativ ähnlich ausfällt, variiert der Anteil der Eigenbewegung deutlich zwischen den Bedingungen. Die Hypothese, dass bei einem redundanten System keine oder nur sehr wenig Eigenbewegung auftritt, kann hier nicht bestätigt werden.

Bereits Brüwer und Cruse (1990) und Cruse et al (1993) versuchen redundante Bewegungen über die Pseudo-Inverse und innerhalb eines neuronalen Netzwerkes zu erklären. Die Pseudo-Inverse begründet auch hier die Abhängigkeit der Gelenkwinkelkonfigurationen von den Startpostionen des Endeffektors. Allerdings wird hier argumen-

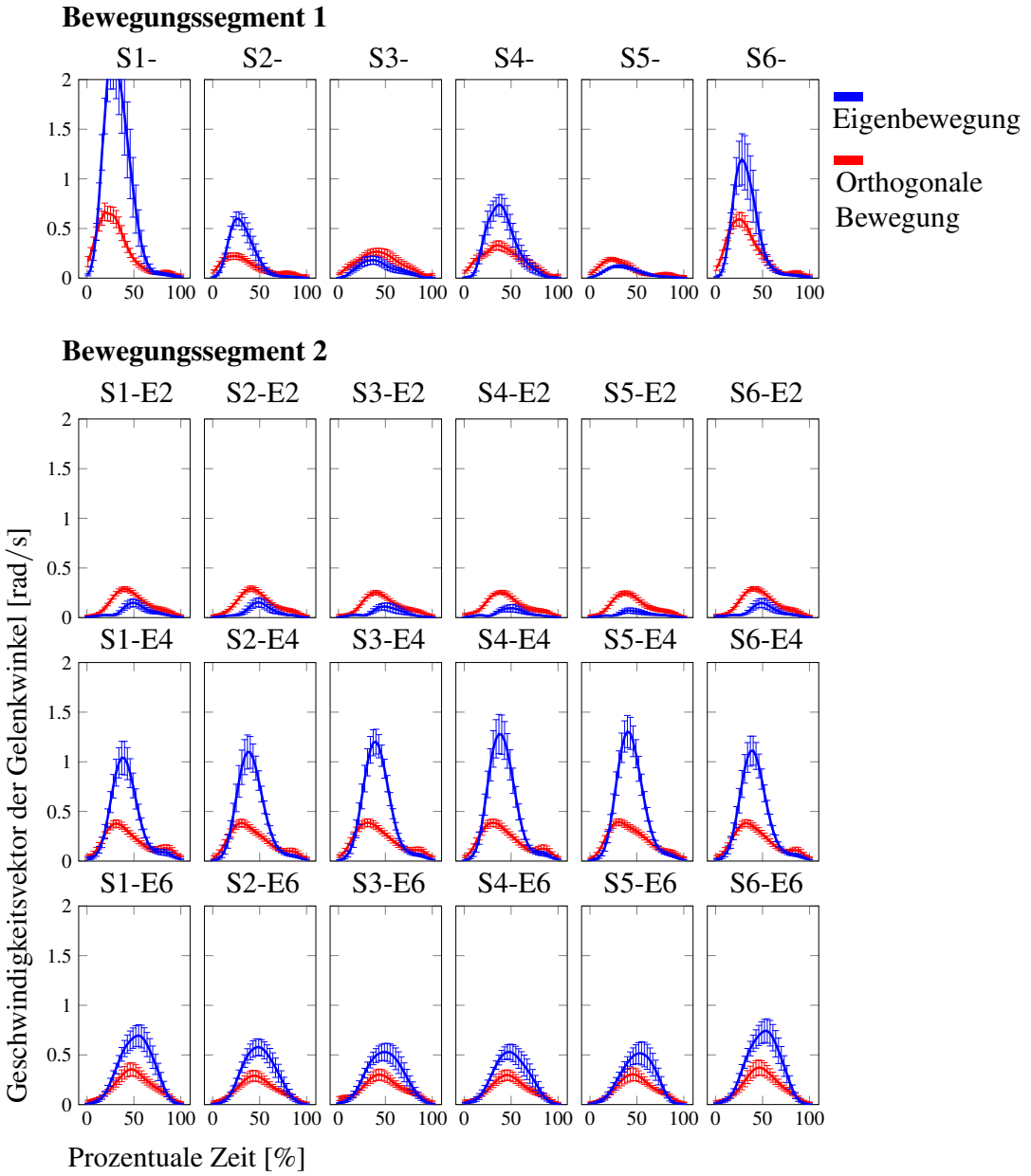

Abbildung 4.1: Eigenbewegung und die dazu orthogonale Bewegung sind über die Probanden gemittelt aufgetragen. Für das erste Bewegungssegmente sind alle Bedingungen mit gleicher Startposition aber unterschiedlichen Endpositionen gemittelt. Für das zweite Bewegungssegmente sind alle Bedingungen einzeln aufgelistet. Beide Komponenten sind gut zu erkennen und liegen meist deutlich über dem Nullwert.

tiert, dass die Pseudo-Inverse allein Bewegungen nicht ausreichend beschreiben kann, da Regelungseigenschaften von Muskeln mit einbezogen werden müssen. Martin et al (2009) kombiniert eine Form der Pseudo-Inversen mit einem dynamischen Modell zur Muskelregelung (Gribble et al, 1998), welches auf der Gleichgewichtspunkttheorie von

Feldman (1986) aufbaut. Auch in diesem Modell beeinflussen die Startpositionen die Gelenkwinkelkonfigurationen am Zielpunkt und auch hier ist der anfängliche Bewegungsplan auf Endeffektorebene, welcher zu einem Bewegungsplan auf Gelenkwinkelebene führt, zunächst frei von Eigenbewegung. Es wird jedoch berücksichtigt, dass die Anzahl an möglichen Gelenkwinkelkonfigurationen durch Muskeln, die natürlichen Möglichkeiten der Gelenkwinkel, unbequeme Gelenkwinkelkonfigurationen (Rosenbaum et al, 1999), oder ähnliches eingeschränkt ist. Dies hat folgenden Effekt: Zunächst beschreibt der Bewegungsplan auf Endeffektorebene einen Plan auf Gelenkwinkelebene, welcher carry-over Koartikulation zeigt, aber noch frei von Eigenbewegung ist. Jedoch führen die durch Muskeldynamik bedingten Einschränkungen zur Reduktion der motorisch äquivalenten Unterschiede, wodurch Eigenbewegung entsteht. Das Modell von Martin et al (2009) kann anhand verschiedener Experimente am Menschen unterstützt werden (Martin et al, 2009; Scholz et al, 2011). Für hiesige Experimente würde dies folgendes bedeuten: Wird der Endeffektor von unterschiedlichen Startpositionen zur gleichen Zielposition bewegt, so unterscheiden sich die Gelenkwinkelkonfigurationen an dieser Zielpositionen (bedingt durch die Pseudo-Inverse). Diese Unterschiede bleiben auch für nachfolgende Bewegungssegmente bestehen. Das Miteinbeziehen von Muskeldynamiken und deren Einschränkungen führt neben einer Reduktion von carry-over Koartikulation auf Gelenkwinkelebene auch zu einem Auftreten von Eigenbewegung.

Ist antizipatorische Koartikulation nur jeweils für das dem unterschiedlichen Bewegungssegment (unterschiedlicher Kontext) direkt angrenzenden Bewegungssegment nachweisbar, so sieht es bei carry-over Koartikulation anders aus. Experiment 4 zeigt bei einer Sequenz aus drei Bewegungssegmenten, dass nach dem unterschiedlichen ersten Bewegungssegment carry-over Koartikulation nicht nur im nachfolgenden zweiten Bewegungssegment, sondern auch noch im dritten Bewegungssegment gefunden werden kann (Abbildung 3.49). Carry-over Koartikulation verringert sich dabei leicht über die Zeit. Am Ende des dritten Bewegungssegmentes bestehen zwischen den Gelenkwinkelkonfigurationen der verschiedenen Bedingungen immer noch auffällige Unterschiede. Deshalb und weil carry-over Koartikulation, anders als antizipatorische Koartikulation, vor allem durch Bewegungsregelung (s. Pseudo-Inverse) bedingt ist, kann man davon ausgehen, dass carry-over Koartikulation auch noch bei längeren Bewegungssequenzen nachgewiesen werden kann.

Bewegungsplanung und carry-over Koartikulation

Trotz des wohl großen Anteils von Bewegungsregelung am Zustandekommen von carry-over Koartikulation kann auch ein Einfluss durch Bewegungsplanung nicht ausgeschlossen werden. Durch Bewegungsregelung kann vor allem der große Anteil auf Gelenkwinkelebene, der die Gelenkwinkelkonfigurationen der verschiedenen Bedingungen unterscheidet, erklärt werden. Unterschiede auf Endeffektorebene könnten auch direkt durch Prozesse der Bewegungsplanung hervorgerufen werden. Beim Vergleich von Experiment 3a und 2a zeigen sich auffallende Differenzen. Eine mögliche Interpretation ist, diese Differenzen durch den Einfluss von Bewegungsplanung zu erklären. Experiment 3a unterscheidet sich von Experiment 2a dadurch, dass bei ersterem zwischen dem ersten und zweiten Bewegungssegment eine Pause von 2 s erzwungen wurde. Führt diese Pause tatsächlich dazu, dass beide Segmente einzeln geplant werden? Wie bereits weiter oben beschrieben (s. *4.6.1 Bewegungsplanung und antizipatorische Koartikulation*) fällt antizipatorische Koartikulation im ersten Bewegungssegment, welche durch Bewegungsplanung beschrieben werden kann, bei Experiment 3a und bei Experiment 3b, ebenfalls mit zweisekündiger Pause, weg und lässt genau dies vermuten. Weiterhin ist zu beachten, dass sich hier antizipatorische Koartikulation nicht nur auf Endeffektorebene ($pMEQ_{\perp}$), sondern auch auf Gelenkwinkelebene ($pMEQ_{||}$) erstreckt. Ein Wegfall oder eine Reduktion von Bewegungsplanung im zweiten Bewegungssegment lässt somit einen Rückgang von sowohl $pMEQ_{||}$ als auch $pMEQ_{\perp}$ für carry-over Koartikulation erwarten. Genau dies lässt sich beim Vergleich von Experiment 3a mit Experiment 2a finden (Abbildung 3.40b). Diese Beobachtung untermauert somit die Vermutung, dass Bewegungsplanung bei carry-over Koartikulation eine Rolle spielt, wenn auch deren Einfluss im Gegensatz zum Einfluss durch Bewegungsregelung deutlich geringer ausfällt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass carry-over Koartikulation sich bei diesen einfachen Bewegungen bereits als sehr robust erweist und auf Ebene der Gelenkwinkel deutlich stärker sichtbar ist als auf Ebene des Endeffektors. Trotz möglicher Einflüsse durch Bewegungsplanung spielt Bewegungsregelung beim Zustandekommen von carry-over Koartikulation eine entscheidende und große Rolle. Durch die Übersetzung eines motorischen Planes des Endeffektors auf die Gelenkwinkel kann das Auftreten von carry-over Koartikulation erklärt werden (Pseudo-Inverse). Hierbei sollten mögliche Einflüsse und Einschränkungen durch Muskeldynamiken jedoch mitberücksichtigt werden (Martin et al, 2009).

4.6.3 Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation

Antizipatorische und carry-over Koartikulation wurden bisher nur in voneinander gesonderten Bewegungssegmenten betrachtet. Experiment 4, aufgebaut aus drei Bewegungssegmenten, erlaubt jedoch eine Analyse der beiden Koartikulationsarten innerhalb eines Bewegungssegmentes (BS 2). Dazu müssen Bedingungen verglichen werden, welche sich sowohl im ersten als auch im dritten Bewegungssegment unterscheiden. Die auftretende Koartikulation wirkt sich vor allem auf Gelenkwinkelebene aus ($pMEQ_{||}$), aber auch in gewissem Maß auf die Endeffektorebene ($pMEQ_{\perp}$, Abbildung 3.51b). Vergleicht man die hier auftretende Koartikulation mit antizipatorischer Koartikulation (Experiment 4, BS 2, Abbildung 3.51a) und carry-over Koartikulation (Experiment4, BS 2, Abbildung 3.51c) so wirkt diese wie eine Summe aus den beiden einzelnen Koartikulationsarten. Bisher wurde beschrieben, dass antizipatorische Koartikulation wohl im Wesentlichen durch Bewegungsplanung und carry-over Koartikulation vor allem durch Bewegungsregelung und in deutlich geringerem Maße durch Bewegungsplanung zustande kommt. Die Ergebnisse von Experiment 4 lassen zusätzlich vermuten, dass diese Prozesse relativ unabhängig voneinander ablaufen und sich augenscheinlich nicht oder nur kaum gegenseitig beeinflussen.

4.7 Das Zwischenziel - Zielposition *C*

Bei Experiment 2b und 2c wurde als weiteres Detail der Bewegung noch die genaue Positionierung des Endeffektors (Objektes) am Zentrum, also zu Ende des ersten Bewegungssegmentes, analysiert. Bereits die Analyse zur antizipatorischen Koartikulation zeigt, dass neben den Gelenkwinkeln auch die Endeffektorposition beeinflusst wird (Abbildung 3.30 und 3.33, Zeitpunkt 100 %). Die Positionsunterschiede liegen bei Experimente 2b bei durchschnittlich 0,2 cm und bei Experiment 2c bei durchschnittlich 0,5 cm. Wahrscheinlich ist der Effekt bei Experiment 2c durch ein fehlendes visuelles Feedback (keine sichtbaren Zielpositionen während der Bewegung) und damit das Ausbleiben einer möglichen Positionskorrektur etwas stärker ausgeprägt. Die Positionierung des Endeffektors ist von der jeweiligen Bedingung abhängig.

Dass es zu dieser antizipatorischen Koartikulation auf Ebene des Endeffektors kommt, wurde bereits im vorherigen Abschnitt eingehend beschrieben. Zusätzlich ist jedoch die Tatsache erwähnenswert, dass die Endeffektorpositionierung nicht bei allen Probanden eine ähnliche Tendenz zeigt. Die Probanden können bei den untersuchten

Experimenten grob in drei Gruppen unterteilt werden. Bei 20 % der Probanden (4 von 20 Probanden) fanden sich kaum signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen. 70 % der Probanden (14 von 20 Probanden) zeigten vor allem ein hier als Entgegen-Positionierungsstrategie bezeichnetes Verhalten und 10 % der Probanden (2 von 20 Probanden) ein als Mit-Positionierungsstrategie bezeichnetes Verhalten. Bei der Entgegen-Positionierungsstrategie wird der Endeffektor nahe dem Zentrum C, aber entgegen der nachfolgenden Endposition (weiter links/rechts/oben/unten) platziert. Der Endeffektorpfad wird hier, im Vergleich zum Pfad bei mittiger Positionierung des Endeffektors auf dem Zentrum C, etwas verlängert. Bei der Mit-Positionierungsstrategie wird der Endeffektor nahe dem Zentrum C in Richtung der nachfolgenden Endposition platziert. Der Endeffektorpfad wird hierdurch etwas verkürzt. Das Verhalten kann bei den Probanden unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Weshalb es zu diesen Strategien kommt und welche Vorzüge diese für die jeweilige Bewegung haben könnten (Optimierung der Bewegung), verlangt jedoch eine darauf optimierte Studien. Wichtig ist es jedoch zu erkennen, dass trotz gleicher Aufgabenstellung und unter gleichen Versuchsbedingungen probandenindividuelle Lösungen vorkommen können.

4.8 Training, Lernen und Erschöpfung

Die in den Versuchen getestete Bewegung (Neuplatzieren eines Objektes) unterscheidet sich nicht von typischen Alltagsbewegungen. Man kann davon ausgehen, dass die Probanden bereits unzählige ähnliche solcher Bewegungen durchgeführt haben. Trotzdem könnte es auch in dieser Studie zu Veränderungen der Bewegung (z.B. Optimierung) durch häufige Wiederholungen kommen. Neben solchen Lerneffekten wären auch Veränderungen der Bewegung durch Erschöpfung möglich. Allerdings bemühte man sich in dieser Studie Erschöpfung möglichst zu vermeiden. Es waren jederzeit Pausen möglich, jeder Probandendurchgang dauerte insgesamt nur ca. 1,5 Stunden und keiner der Probanden klagte über größere Erschöpfungserscheinungen. Trotz all dieser Maßnahmen sind Veränderungen der Bewegung über die Zeit nicht gänzlich auszuschließen. Im Folgenden werden die Experimente 2b und 2c diesbezüglich genauer untersucht. Da beide Experimente eine hohe Anzahl an Wiederholungen ($N = 50$) und nur eine geringe Anzahl an Bedingungen ($b = 4$) enthalten, erscheinen hier mögliche Trainingseffekte besonders wahrscheinlich.

Müller und Sternad (2009) schreiben, dass Bewegungslernen mit einer Variabilitätsänderung, zumeist einer Reduktion, einhergeht. Trotzdem sei Variabilität auch in sehr automatisierten Bewegungen immer noch deutlich sichtbar. Um solche Änderungen in der

Variabilität zu finden, wurden für die Experimente 2b und 2c zusätzliche Varianzanalysen (UCM Analyse) durchgeführt. Hierzu wurden die Bewegungen in zwei Hauptgruppen unterteilt. In den sogenannten „frühen Gruppen“ befinden sich jeweils die ersten 20 Bewegungen der einzelnen Bedingungen. Die „späten Gruppen“ enthalten die letzten 20 Bewegungen der jeweiligen Bedingungen. Bei vier Bedingungen gibt es also für jedes Experiment vier frühe und vier späte Gruppen. Die Analyse wurde aus Übersichtsgründen nur für die 3D-Hypothese vorgenommen, d.h. die Aufgabenvariable entspricht der dreidimensionalen Position des Endeffektors.

Für jede Bedingung wurden die Varianzen innerhalb der frühen und späten Gruppe miteinander verglichen. Bei den Varianzen selbst wurde wiederum zwischen Varianzen unterschieden, welche sich auf Gelenkwinkelkonfigurationen bezogen bei denen die Aufgabenvariable invariant blieb ($V_{||}$), und solchen, welche sich auf Gelenkwinkelkonfigurationen bezogen, bei denen die Aufgabenvariable variierte ($V_{\perp}$). Mit Hilfe des Programmes SPSS wurden ANOVAs (Varianzanalyse mit Messwiederholungen) durchgeführt, um mögliche Unterschiede auf ihre Signifikanz zu überprüfen.

In Experiment 2b zeigen sich bei den Vergleichen der frühen und späten Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Dies gilt demnach bezüglich $V_{||}$ im ersten ($F_{1,9} = 0{,}355$, $P > 0{,}05$) und zweiten Bewegungssegment ($F_{1,9} = 0{,}278$, $P > 0{,}05$) und bezüglich $V_{\perp}$ im ersten ($F_{1,9} = 0{,}130$, $P > 0{,}05$) und zweiten Bewegungssegment ($F_{1,9} = 0{,}575$, $P > 0{,}05$). Gleiches gilt für die Vergleiche der frühen und späten Gruppen in Experiment 2c. Es zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich $V_{||}$ im ersten ($F_{1,9} = 0{,}665$, $P > 0{,}05$) und zweiten Bewegungssegment ($F_{1,9} = 0{,}291$, $P > 0{,}05$) und bezüglich $V_{\perp}$ im ersten ($F_{1,9} = 1{,}973$, $P > 0{,}05$) und zweiten Bewegungssegment ($F_{1,9} = 0{,}616$, $P > 0{,}05$). In Abbildung 4.2 sind hierzu nochmals die Verläufe beider Varianzen innerhalb beider Gruppen graphisch dargestellt. Die Varianzen sehen sich sehr ähnlich. Abweichungen, die vor allem im ersten Bewegungssegment von Experiment 2b sichtbar werden, sind nicht statistisch signifikant. Ein Trainingseffekt mit Auswirkungen auf die Varianzen der einzelnen Bedingungen lässt sich demnach nicht nachweisen.

Lässt sich ein Trainingseffekt nicht innerhalb der Varianzen der Bewegung nachweisen, so wäre es dennoch möglich einen Trainingseffekt bezüglich des Auftretens von Koartikulation festzustellen. Auch diese Möglichkeit wurde anhand der Daten für antizipatorische Koartikulation überprüft. Auch hier wird aus Übersichtsgründen nur die 3D-Hypothese betrachtet. Die bereits aus der Studie bekannten Werte $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ geben ein prozentuales Maß für Koartikulation für Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffektorposition nicht betreffen, und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Endeffek-

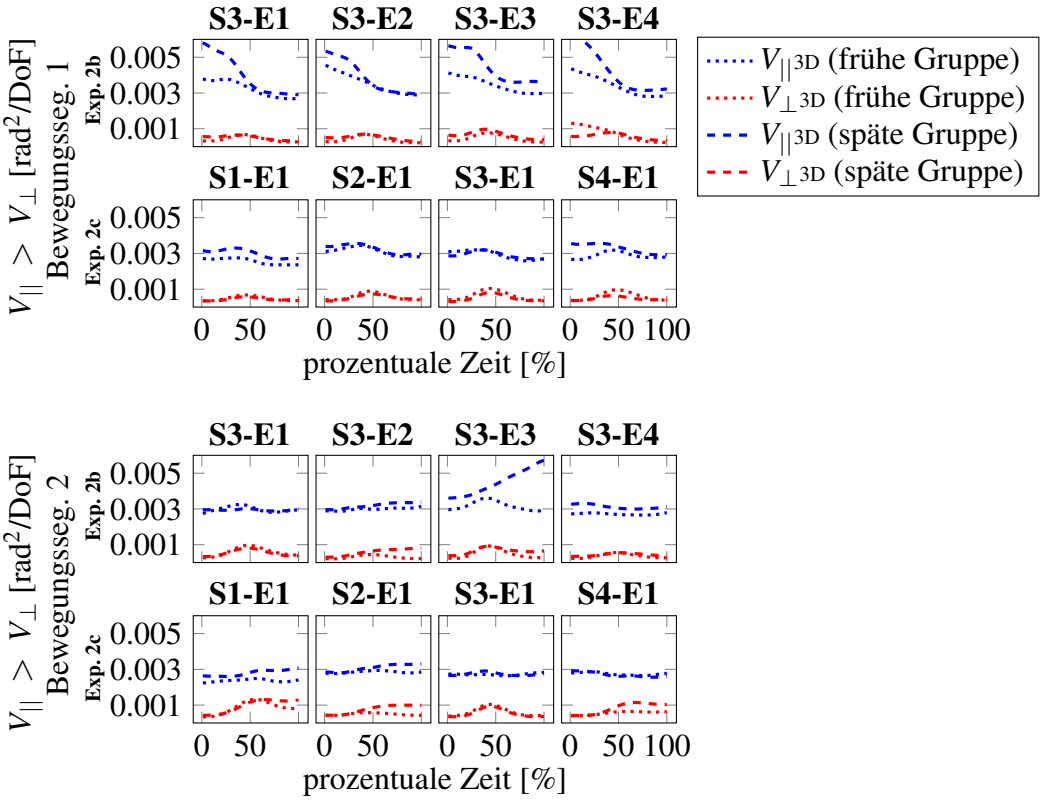

Abbildung 4.2: UCM-Varianzanalyse für Experiment 2b und 2c für die frühe Gruppe (Wiederholung 1-20) und die späte Gruppe (Wiederholung 31-50). In den meisten Fällen sind sich die Kurven der frühen Gruppen und die Kurven der späten Gruppen sehr ähnlich. (Experiment 2b und 2c)

torposition betreffen, an. Sowohl für Experiment 2b als auch 2c werden die Werte $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ für jede der vier Bedingungen und die jeweils frühe (die ersten 20 Wiederholungen einer Bedingung) und späte Gruppe (letzen 20 Wiederholungen einer Bedingung) ermittelt. Die frühen und späten Gruppen werden miteinander verglichen (Abbildung 4.3). Im Durchschnitt liegen die Werte der späten Gruppe um 4,5 % (Experiment 2b) bzw. 6,3 % (Experiment 2c) über der frühen Gruppe. $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ sind in einem relativ ähnlichen Maß am Ergebnis beteiligt (Experiment 2b: $pMEQ_{||}$(späte Gruppe) $-$ $pMEQ_{||}$(frühe Gruppe) $= 5{,}0\,\%$; $pMEQ_{\perp}$(späte Gruppe) $-$ $pMEQ_{\perp}$(frühe Gruppe) $= 4{,}0\,\%$; Experiment 2c: $pMEQ_{||}$(späte Gruppe) $-$ $pMEQ_{||}$(frühe Gruppe) $= 6{,}7\,\%$; $pMEQ_{\perp}$(späte Gruppe) $-$ $pMEQ_{\perp}$(frühe Gruppe) $= 6{,}0\,\%$;). Es zeigt sich hier also eine kleine Tendenz zu mehr antizipatorischer Koartikulation im zeitlichen Verlauf der Probandenmessungen.

Bis auf eine Ausnahme ist dieser Zuwachs an antizipatorischer Koartikulation sehr kontinuierlich. Bei Experiment 2b, Zeitpunkt 100 % gibt es jedoch bei $pMEQ_{\perp}$ einen leichten Abfall um 6,7 % beim Vergleich der späten mit den frühen Gruppen (Abbildung 4.3a).

Diese Tatsache könnte ebenfalls mit einem Trainingseffekt erklärt werden. Müller und Sternad (2009) beschreiben, dass sich neben der Änderung der Variabilität auch die Präzision am Zielort vergrößern kann. Bei Experiment 2b ist eine erhöhte Präzision bei der Endeffektorpositionierung durch Training daher naheliegend. Da bei Experiment 2c während der Bewegung keine sichtbaren Ziele angezeigt wurden, erscheint es ebenfalls stimmig, dieses Phänomen dort nicht vorzufinden.

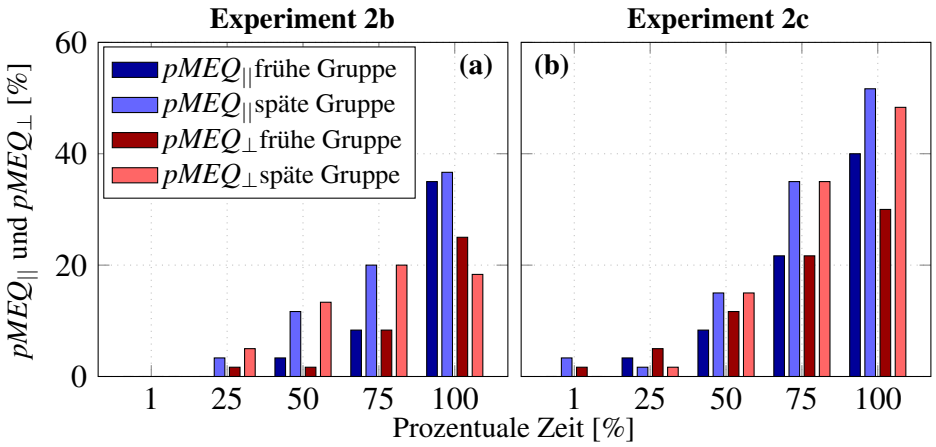

Abbildung 4.3: Verhalten von $pMEQ_{||}$ und $pMEQ_{\perp}$ im ersten Bewegungssegment über die Zeit. Antizipatorische Koartikulation fällt für die frühere Gruppe (Wiederholung 1-20) in den meisten Fällen etwas geringer aus als für die spätere Gruppe (Wiederholung 31-50). (Experiment 2b und 2c)

Ob die möglichen Auswirkungen bei carry-over Koartikulation zu den ermittelten Trainingseffekten bei antizipatorische Koartikulation ähnlich sind, lässt sich leider anhand der Daten nur schwer bestimmen, da in den Versuchen zur carry-over Koartikulation relativ kleine Wiederholungszahlen verwendet wurden, welche eine immerhin schon recht ausgeprägte carry-over Koartikulation aufweisen.

Sosnik et al (2004) beschreiben in ihrer Studie einen deutlicheren Trainingseffekt bei Sequenzbewegungen. Dieser wurde aber möglicherweise durch den Versuchsaufbau stark verstärkt. Die Probanden sollten so schnell wie möglich Wegpunkte auf einer zweidimensionalen Fläche verbinden. Das Training dieser Bewegung wurde über mehrere Tage durchgeführt. Sosnik et al (2004) beschreiben es als Koartikulation, wenn die Probanden die anfänglich geraden Verbindungen zwischen den einzelnen Wegpunkten aufgeben und zu einem gekrümmten Endeffektorpfad übergehen. Dabei ändert sich auch das Geschwindigkeitsprofil und die Isochronie der einzelnen Bewegungssegmente (bestimmt durch die Wegpunkte) wird verletzt. Insgesamt verkürzt sich die Bewegungszeit. Sosnik et al (2004) beschreiben, dass Koartikulation zu einer neuen Bewegungseinheit führt, die anders ist als

die Summe der Einzelelemente. In ihrer Studie würde man Koartikulation gerne über eine neue Arbeitsdefinition beschreiben, in welcher zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Bewegungseinheiten durch ein komplett neues Bewegungssegment ersetzt werden. Ich denke jedoch, es wäre zu kurz gefasst, wenn man Koartikulation erst erkennen würde, wenn innerhalb einer Bewegungssequenz durch aufwendiges Training die komplette Struktur angepasst und optimiert wird. Bereits in untrainierten Sequenzbewegungen gibt es antizipatorische und carry-over Koartikulation, durch welche benachbarte Bewegungssegmente beeinflusst werden. Koartikulation tritt also nicht nur dort auf, wo die gesamte Bewegung augenscheinlich zu einer Einheit wird, sondern übt bereits bei Bewegungssequenzen über scheinbar feste Bewegungseinheiten hinweg Einflüsse aus. Koartikulation kann bereits, wie in hiesiger Studie gezeigt, in einfachen und alltäglichen Bewegungen ohne offensichtliche Verbesserungsnotwendigkeiten (z.B. maximale Geschwindigkeit) vorkommen und sich auf die Bewegungsausführung auswirken.

5 Schlussfolgerung

Es wurden redundante und möglichst natürliche Punkt-zu-Punkt-Bewegungssequenzen untersucht. Bei diesen Bewegungssequenzen ist jedes einzelne Bewegungssegment in den Kontext anderer Bewegungssegmente eingebettet. Welchen Einfluss hat dieser Kontext auf die Bewegung oder genauer, welchen Einfluss haben die einzelnen Bewegungssegmente einer Bewegungssequenz aufeinander? Die Experimente und Analysen dieser Studie machen es möglich diese einleitende Frage (*1.4 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit*) besser zu beantworten. Durch die einfach gehaltenen und alltäglichen Bewegungssequenzen (Umplatzierung eines Objektes) und einen Versuchsaufbau, der keine zusätzlichen Ansprüche an die Probanden stellt, werden zudem Rückschlüsse auf ähnliche Alltagsbewegungen ermöglicht.

Die Ergebnisse sind sehr konsistent und zeigen, dass sich die einzelnen Bewegungssegmente einer Sequenz gegenseitig beeinflussen. Antizipatorische Koartikulation, der Einfluss nachfolgender Bewegungssegmente auf vorangehende Segmente, kann gezeigt werden. Zusätzlich wird carry-over Koartikulation, der Einfluss vorangehender Bewegungssegmente auf nachfolgende Segmente, ebenfalls und sehr deutlich sichtbar.

Bei den Analyse erweisen sich die Methode der Ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) und die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ) als geeignet, um die Einflüsse des Kontextes zu untersuchen. Zudem kann hierbei zwischen der Endeffektorebene (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable variieren) und der Gelenkwinkelebene (Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable invariant lassen) unterschieden werden. Als Aufgabenvariable wird sowohl die dreidimensionale Endeffektorposition als auch die dreidimensionale Endeffektorposition zusammen mit der für den Endeffektor (zylindrisches Objekt) relevanten zweidimensionalen Endeffektor-Orientierung gemessen. Beide Aufgabenvariablen führen zu ähnlichen Ergebnissen. Allerdings muss bei der Verwendung der Methode der MEQ der Einfluss eines Bias mitberücksichtigt werden, welcher bei sehr ähnlichen Bedingungen auftritt.

Antizipatorische Koartikulation wird durch Bewegungsplanung bedingt und zeigt sich, wenn auch deutlich schwächer als carry-over Koartikulation, in einem ähnlichen Maß und über die Zeit zunehmend auf Endeffektorebene wie auf Gelenkwinkelebene. Der Anteil auf Endeffektorebene lässt vermuten, dass sich Bewegungsplanung auf die räumlichen Ziele einer Bewegung bezieht. Antizipatorische Koartikulation kann hierbei nur innerhalb

eines kleinen Zeitraumes und lediglich in einem an dem unterschiedlichen Kontext direkt benachbarten Bewegungssegment nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass carry-over Koartikulation durch Bewegungsregelung und zu geringerem Teil auch durch Bewegungsplanung zustandekommt. Carry-over Koartikulation lässt sich mit den Experimenten sehr deutlich zeigen und tritt vor allem auf Gelenkwinkelebene, aber auch in gewissem Maß auf Endeffektorebene auf. Carry-over Koartikulation nimmt über die Zeit leicht ab und lässt sich auch über mehr als ein Bewegungssegment gut nachweisen. Der Anteil auf Gelenkwinkelebene und damit das Auftreten von motorisch äquivalenten Lösungen lässt sich gut durch eine Pseudo-Inverse beschreiben. Hierbei bedingen die unterschiedlichen Gelenkwinkelkonfigurationen zu Beginn einer Bewegung (unterschiedliche Startpunkte) auch die unterschiedlichen Gelenkwinkelkonfigurationen zu Ende einer Bewegung (gleiche Zielpunkte). Bei dieser Bewegungsregelung müssen allerdings noch Einschränkungen berücksichtigt werden, welche durch Muskeldynamiken hervorgerufen werden können. Der Anteil auf Endeffektorebene, der bei carry-over Koartikulation zu finden ist, und Experimente, bei denen es durch eine Pause möglicherweise nicht oder nur zu eingeschränkter Planung der Bewegungssequenzen kommt, lassen zudem vermuten, dass neben der Bewegungsregelung auch die Bewegungsplanung eine, wenn auch unaufälligere Rolle spielt.

Zusätzlich kann noch eine Kombination aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation innerhalb eines einzelnen Segmentes einer Bewegungssequenz gezeigt werden. Diese lässt vermuten, dass sich die verschiedenen Prozesse, welche zu Koartikulation führen, nicht oder nur kaum gegenseitig beeinflussen.

Zusammenfassung

Typische Bewegungen, wie sie täglich in unserem Alltag vorkommen, stehen nicht allein, sondern sind in eine Sequenz von Bewegungen eingebettet. Betrachtet man eine Bewegungssequenz mit ihren einzelnen Bewegungssegmenten, so wird jedes dieser Segmente durch seine Nachbarsegmente in einen jeweils anderen Kontext gestellt. Die generelle Fragestellung meiner Arbeit ist, wie ein solcher Kontext die Bewegung beeinflusst. Hierzu untersuche ich den Einfluss einzelner Bewegungssegmente einer Bewegungssequenz aufeinander. Wie beeinflussen nachfolgende Bewegungssegmente vorangehende Segmente (antizipatorische Koartikulation) und wie beeinflussen vorangehende Bewegungssegmente nachfolgende Segmente (carry-over Koartikulation)?

In dieser Studie werden möglichst natürliche, redundante Armbewegungssequenzen untersucht. Die Bewegungen sind möglichst einfach aufgebaut und werden nicht durch zusätzliche Anforderungen an die Probanden (z.B. Geschwindigkeitsvorgaben) beeinflusst. Der Proband sitzt hierbei vor einem Monitor-Tisch und bewegt mit dem rechten Arm und der Schulter ein zylindrisches Objekt von einer auf dem Monitor dargestellten Position zur nächsten. Das Objekt wird hierzu von der Startposition angehoben und zur nächsten Position bewegt und von dort weiter zur nächsten. Es werden Bewegungssequenzen aus zwei Bewegungssegmenten (Startposition, erste Zielposition und zweite Zielposition) und drei Bewegungssegmenten untersucht. Das Objekt wird hierbei von der Hand des Probanden umschlossen und kann als Endeffektor bezeichnet werden. Neben der Bewegung des Endeffektors im Raum werden über am Arm angebrachte Marker auch die Gelenkwinkel des Armes ermittelt. Die Methode der Ungeregelten Mannigfaltigkeit (UCM) und die Methode der motorischen Äquivalenz (MEQ) machen es hierbei möglich Gelenkwinkelkonfigurationen zu unterscheiden, welche die Aufgabenvariable invariant lassen (Gelenkwinkelebene) und Gelenkwinkelkonfigurationen, welche die Aufgabenvariable variieren (Endeffektorebene). Als Aufgabenvariable wird bei der sogenannten 3D-Hypothese die dreidimensionale Endeffektorposition angesehen. Bei der parallel hierzu untersuchten 3D+Ori2-Hypothese wird als Aufgabenvariable die Kombination der dreidimensionalen Endeffektorposition mit der für den Endeffektor (zylindrisches Objekt) relevanten zweidimensionalen Orientierung betrachtet.

Es wurden sieben Experimente durchgeführt, welche insgesamt, aber auch besonders bezüglich antizipatorischer und carry-over Koartikulation ein sehr konsistentes Bild zeigen:

Die Varianzanalyse der Bewegungen mit der Methode der UCM ergab, dass der in der Literatur bereits häufig nachgewiesene UCM-Effekt auch für alle hier durchgeführten Experimente repliziert werden kann. Es gilt demnach, dass die Varianz einer Bewegung bei Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor (Endeffektorposition bzw. Endeffektorposition plus zweidimensionale Orientierung des Endeffektors) nicht betreffen, größer ist als bei Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor betreffen. Die Hypothese der UCM besagt hierzu, dass das Nervensystem die für die Aufgabe relevanten Gelenkwinkelkonfigurationen stärker regeln muss als die für die Aufgabe irrelevanten Konfigurationen.

Bereits im ersten Experiment konnte gezeigt werden, dass Koartikulation mit Hilfe der Methode der MEQ gerade im Hinblick auf die Unterscheidung von Gelenkwinkelkonfigurationen auf Endeffektor- und Gelenkwinkelebene verwendet werden kann. Hierzu werden Bewegungssegmente mit unterschiedlichem Kontext (unterschiedliche Nachbarsegmente) miteinander verglichen. Aus den gemittelten Gelenkwinkelkonfigurationen der einzelnen Bedingungen erhält man die Länge eines Differenzvektors, welche auf den UCM-Unterraum (enthält Gelenkwinkelkonfigurationen, welche den Endeffektor invariant lassen / Gelenkwinkelebene) und den dazu orthogonalen Unterraum (ORT; Endeffektorebene) projiziert wird. Allerdings muss an dieser Stelle beachtet werden, dass es sich hier um eine Längenangabe handelt, welche demnach auf positive Werte beschränkt ist. Unterscheiden sich die zu vergleichenden Bedingungen nicht oder nur kaum voneinander, führt dies zu einem im mathematischen Sinne positiven Bias. Man umgeht dieses Problem jedoch, indem man sich stattdessen direkt auf die mehrdimensionalen Gelenkwinkelkonfigurationen bezieht. Durch einfaktorielle multivariate Varianzanalysen (MANOVAs) können Vergleiche zwischen den Bedingungen auf Endeffektor- und Gelenkwinkelebene vorgenommen werden. Der Faktor ist hierbei der Bewegungskontext. Die Ergebnisse können innerhalb eines Experimentes oder, bedingt durch die einheitlichen Versuchsaufbauten, zwischen den Experimenten verglichen werden.

Vergleicht man Bewegungssegmente, welche sich im nachfolgenden Bewegungssegment unterscheiden, so kann antizipatorische Koartikulation untersucht werden. Antizipatorische Koartikulation lässt sich in Experiment 1 und 2a schwach nachweisen. Untersucht man antizipatorische Koartikulation dagegen mit den Experimenten 2b, 2c und 4 etwas genauer und mit mehr Wiederholungen, so wird der Effekt recht deutlich. Antizipatorische Koartikulation steigt über die Zeit an und wirkt sich auf die Endeffektorebene und die Gelenkwinkelebene ähnlich aus. Antizipatorische Koartikulation kann jedoch nicht über mehr als ein Bewegungssegment nachgewiesen werden (Experiment 4). Wird

eine Bewegungssequenz durch eine zweisekündige Pause unterbrochen, zeigt sich keine antizipatorische Koartikulation (Experiment 3a und 3b). Möglicherweise wird die Bewegungssequenz hier nicht mehr als zusammenhängend angesehen. Antizipatorische Koartikulation ist durch Bewegungsplanung bedingt. Viele Studien gehen davon aus, dass sich Bewegungsplanung auf die räumlichen Ziele einer Bewegung bezieht. Der hier gefundene Anteil antizipatorischer Koartikulation, der sich auf die Endeffektorebene bezieht, unterstützt diese Hypothese. Der gleichzeitige Anteil auf Gelenkwinkelebene könnte durch ein Fehlen direkter Prozesse, welche Gelenkwinkelkonfigurationen innerhalb der Gelenkwinkelebene invariant oder stabil halten müssten, erklärt werden.

Bei Experiment 2b und 2c wurden zusätzlich die Endeffektorpositionen zu Ende des ersten Bewegungssegmentes (hohe antizipatorische Koartikulation) untersucht. Während viele Probanden dazu tendierten die Endeffektorposition entgegen der nachfolgenden Zielposition zu platzieren, platzierten wenige Probanden den Endeffektor in Richtung der nachfolgenden Zielposition. Obwohl in beiden Fällen alle Probanden antizipatorisches Verhalten zeigten, muss beachtet werden, dass sich die Strategien der Probanden dennoch unterscheiden und es daher zu unterschiedlichen Bewegungslösungen kommen kann.

Vergleicht man Bewegungssegmente, welche sich im vorangehenden Bewegungssegment unterscheiden, so kann carry-over Koartikulation untersucht werden. Carry-over Koartikulation erweist sich als sehr robust und kann in allen entsprechenden Experimenten (1, 2a, 3a und 4) gut gezeigt werden. Das Ausmaß an carry-over Koartikulation sinkt dabei nur leicht über die Zeit und kann über mehr als ein Bewegungssegment deutlich nachgewiesen werden. Carry-over Koartikulation findet besonders auf Gelenkwinkelebene, aber auch zu geringeren Teilen auf Endeffektorebene statt. Mit der Pseudo-Inversen kann carry-over auf Gelenkwinkelebene durch Bewegungsregelung beschrieben werden. Die anfänglich unterschiedlichen Gelenkwinkelkonfigurationen bedingen hier die unterschiedlichen Gelenkwinkelkonfigurationen zu Ende einer Bewegung mit gleicher Endposition. Das Auftreten von Eigenbewegung zeigt jedoch, dass diese Erklärung allein nicht ausreichend ist. Martin et al (2009) erstellten hierzu ein neuronales Modell, welches die inverse Kinematik mit Muskeldynamiken kombiniert und so das Auftreten von Eigenbewegung erklärt, auch wenn Eigenbewegung im zugrundeliegenden Bewegungsplan selbst nicht vorkommt.

Der vergleichsweise geringe aber vorhandene Anteil von carry-over Koartikulation auf Endeffektorebene lässt sich womöglich durch Bewegungsplanung erklären. Diese Vermutung kann durch die Ergebnisse von Experiment 3a im Vergleich zu Experiment 2a unterstützt werden. Hier zeigt sich ein Rückgang von carry-over Koartikulation bei Bewe-

gungssegmenten, welche durch eine zweisekündige Pause getrennt sind. Es kann vermutet werden, dass hierdurch Planung über die gesamten Bewegungssequenzen verhindert oder zumindest eingeschränkt wird.

Vergleicht man Bewegungssegmente, welche sich im vorangehenden und im nachfolgenden Bewegungssegment unterscheiden (3er-Sequenz), so kann für ein Bewegungssegment sowohl antizipatorische als auch carry-over Koartikulation untersucht werden. Diese kombinierte Koartikulation ähnelt der Summe aus antizipatorischer und carry-over Koartikulation und lässt somit vermuten, dass Prozesse, welche zu Koartikulation führen (Bewegungsplanung, Bewegungsregelung), relativ unabhängig voneinander ablaufen und sich nicht oder nur kaum gegenseitig beeinflussen.

Die Ergebnisse zur 3D- und 3D+Ori2-Hypothese (dreidimensionale Endeffektorposition bzw. dreidimensionale Endeffektorposition plus zweidimensionale Orientierung des Endeffektors als Aufgabenvariable) sind sich bei der UCM-Varianzanalyse relativ ähnlich. Zumeist fällt bei der 3D+Ori2-Hypothese die Varianz auf Endeffektorebene etwas stärker aus als bei der 3D-Hypothese, wohingegen die Varianz auf Gelenkwinkelebene relativ konstant bleibt. Daher kann man davon ausgehen, dass der UCM-Effekt nicht primär durch die Variation der Endeffektor-Orientierung zustande kommen kann. Auch die MEQ-Analyse zeigt, dass die Werte für Koartikulation auf Endeffektorebene bei der 3D+Ori2-Hypothese größer ausfallen als bei der 3D-Hypothese. Die Werte auf Gelenkwinkelebene dagegen bleiben gleich. Somit kann Koartikulation auf Gelenkwinkelebene ebenfalls nicht primär auf die Endeffektor-Orientierung zurückgeführt werden. Diese Ergebnisse erscheinen nachvollziehbar, wenn man bedenkt, dass die (senkrechte) Endeffektor-Orientierung, wenn auch von gewisser Relevanz, nicht zur expliziten Aufgabenstellung während der Bewegung gehörte.

Insgesamt machen die Ergebnisse der Studie sehr deutlich, dass es bereits in natürlichen und redundanten, aber möglichst einfach gehaltenen Bewegungssequenzen zur Koartikulation (Kontextabhängigkeit) kommt. Durch die Vergleichbarkeit von antizipatorischer und carry-over Koartikulation konnte es zu einer besseren Einsicht in die Prozesse von Bewegungsplanung und -regelung kommen, welche vor allem durch die Unterscheidung von Gelenkwinkel- und Endeffektorebene begünstigt wurde.

Summary

Typical every-day movements do not stand alone, but are normally framed by other movements. Together they form a sequence of movement segments. In such a sequence the context of each movement segment is specified by its neighbors. Is there a context dependency on the movement and how does this dependency look like? This is the general question of this thesis. Therefore, the dependence of a movement segment on its successor (anticipatory coarticulation) and the dependence of a movement segment on its predecessor (carry-over coarticulation) is examined.

For this purpose redundant and naturalistic movement sequences of the arm are studied. The movements are quite simple and only very few instructions or restrictions are given to the participants. The participants performed a two- or three-segmented movement task, while they were sitting in front of a horizontally arranged monitor. With the right arm and the shoulder they lifted and moved a cylindrical object to successive positions on the monitor. While doing so their hand was enclosed around the object, so the object can be referred to as end-effector. Together with the end-effector trajectories the joint angles of the arm are examined by recording markers on object, arm and shoulder. The joint angles can be analyzed systematically by using the method of the uncontrolled manifold (UCM) and the method of the motor equivalence (MEQ). These methods enable to differentiate between task-relevant (level of the end-effector) and task-irrelevant joint angles configurations (level of joint angles). In the 3D-hypothesis the three-dimensional position of the object is task-relevant. In the 3D+Ori2-hypothesis another task-variable is studied in parallel. Here the 3D position of the object is combined with the orientation of the object in 2D (discarding rotation around the vertical long axis of the object).

The study contains seven experiments. These experiments show a very consistent picture, especially regarding to anticipatory and carry-over coarticulation:

The UCM effect is already known from the literature and could be replicated for all experiments. For all trails the variance observed in direction of joint space that leaves the task-variable invariant is higher than variance in direction of joint space that affects the task variable (3D end-effector position / 3D end-effector position plus 2D orientation). Therefore, the hypothesis of the UCM supposes that the nervous system controls especially the joint angle configurations that are relevant for the task.

Already experiment 1 demonstrates that the method of the MEQ is able to show coarticulation and differentiates between joint angle configurations on the level of the end-effector and the level of joint angles. Therefore, movement segments with different context (different preceding or succeeding movement segment) are compared. The length of the mean difference vector is computed from the averaged joint angles configurations of the conditions and projected into the UCM-subspace (contains joint angle configurations that keep the end-effector invariant / level of joint angles) and the orthogonal subspace (ORT; level of the end-effector). However, this mean difference vector refers to a distribution of lengths. If there is no or only a small difference between the conditions, it results in a positive bias. This problem can be avoided by analyzing the difference vectors of the joint angles configurations themselves using multivariate analysis of variance (MANOVA). Conditions can be compared on the level of the end-effector and on the level of the joint angles. The factor is the movement context. The results can be compared within the experiments and, because of the similar setup, also between the experiments.

By comparing movement segments with different succeeding segments anticipatory coarticulation can be studied. Anticipatory coarticulation can already be found in experiment 1 and 2a, but its intensity is quite weak. Experiments 2b, 2c and 4 are performed with more repetitions. There anticipatory coarticulation is quite distinct. Anticipatory coarticulation increases over time at both levels, the level of the end-effector and the level of joint angles. It only can be found within one movement segment (movement segment directly adjacent to the different context; experiment 4). In experiment 3a and 3b the movement sequence is disconnected by a break of two seconds. This procedure prevents the occurrence of anticipatory coarticulation. It may occur that the sequence is no longer perceived as such. Anticipatory coarticulation is clearly a result of motor planning. Additionally, in many studies it is supposed that motor planning refers to the spatial goals of a movement. The amount of anticipatory coarticulation on the level of the end-effector found here, would support this hypothesis. The amount of anticipatory coarticulation on the level of joint angles found, does not contradict this. There is no process that stables joint angles configurations.

Additionally, the end-effector position at the end of the first segment (high anticipatory coarticulation) was examined in experiment 2b and 2c. Many participants drift opposite to the subsequent target of the second segment, but a few drift towards the subsequent target. Despite the fact that in both cases all participants show anticipatory behavior it must be noted that the strategies of the participants are different and therefore different movement solutions are possible.

By comparing movement segments with different preceding segments carry-over coarticulation can be studied. Carry-over coarticulation is very robust and can be easily shown in all relevant experiments (1, 2a, 3a and 4). It decreases with increasing distance from the preceding movement segment and can be detected over more than one movement segment. Carry-over coarticulation could be found especially on the level of joint angles but also slightly on the level of the end-effector. The concept of pseudo-inverses explain carry-over coarticulation on the level of joint angles by motion control. The initial joint angle configurations at different end-effector positions lead to different final joint angle configurations at the same end-effector positions. However, the observation of strong self-motion shows that the explanation is not sufficient. A neural dynamic model by Martin et al (2009) combines the pseudo-inverse with dynamic muscle models and can therefore explain the occurrence of self-motion even if it does not exist in the underlying motor plan.

The component of carry-over coarticulation on the level of end-effector is relatively small but not zero and may reflect movement planning. This idea is supported by the results of experiment 3a compared to experiment 2a. The experiment shows a decline of carry-over coarticulation if the movement segments are interrupted by a break of two seconds. It is assumed that this prevents or at least limits the planning of the movement sequence as one movement.

By comparing movement segments with different preceding and different succeeding segments (three-part sequence, experiment 4) both anticipatory and carry-over coarticulation can be analyzed for one segment. This combined coarticulation resembles closely the sum of individual anticipatory and carry-over coarticulation. Therefore it can be supposed that the processes that lead to coarticulation (movement planning and control) are quite independent.

The results of the 3D- and 3D+Ori2-hypothesis (three-dimensional position of the end-effector or three-dimensional position of the end-effector plus two-dimensional orientation of the end-effector as task variable) are quite similar for the UCM analysis of variance. In most cases, the variance on the end-effector level is little stronger for the 3D+Ori2- than for the 3D-hypothesis. The variance on the joint angles level is relatively constant for both hypotheses. That is why it can be assumed that the UCM effect is not primarily caused by variation in end-effector orientation. Likewise, the MEQ method shows that coarticulation on the level of the end-effector is stronger for the 3D+Ori2- than for the 3D-hypothesis. Coarticulation on the level of joint angles is again equal for both hypotheses. Consequently, coarticulation on the level of joint angles can not primarily be caused by

the orientation of the end-effector. Altogether, these results are understandable because keeping the object vertically oriented has a certain relevance but is not explicitly part of the task.

All in all the results of this thesis make it quite clear. Coarticulation (context dependence) can already be found in naturalistic, redundant and quite simple movement sequences. The comparability between anticipatory and carry-over coarticulation and especially the distinction between the level of the end-effector and the level of joint angles gives additional insights in processes of movement planning and motor control.

Anhang

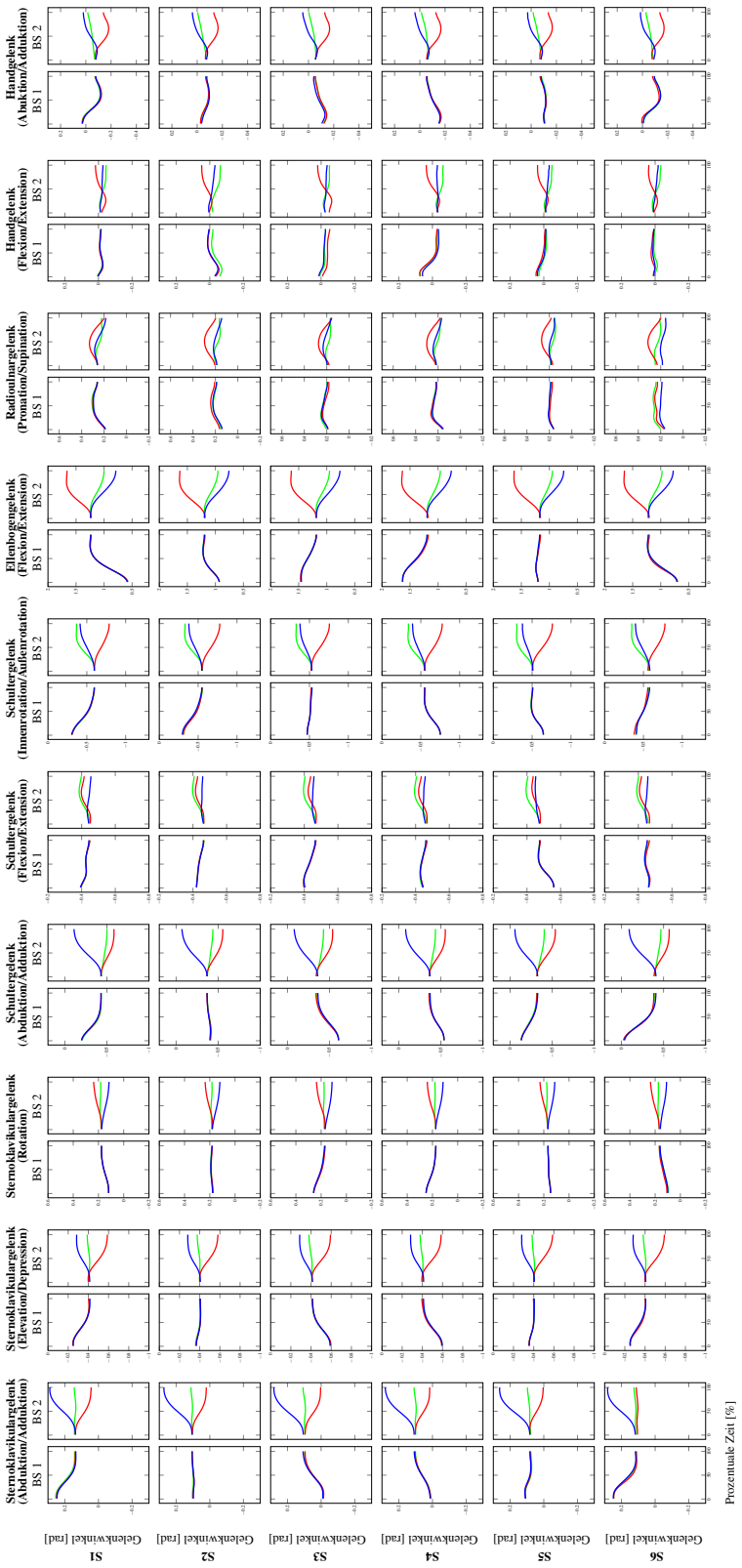

Abbildung 5.1: Die Darstellung aller zehn Winkel beim Vergleich von Bedingungen mit jeweils gleichen Startpositionen zeigt keine eindeutigen Hinweise auf antizipatorischen Koartikulation. (Experiment 1)

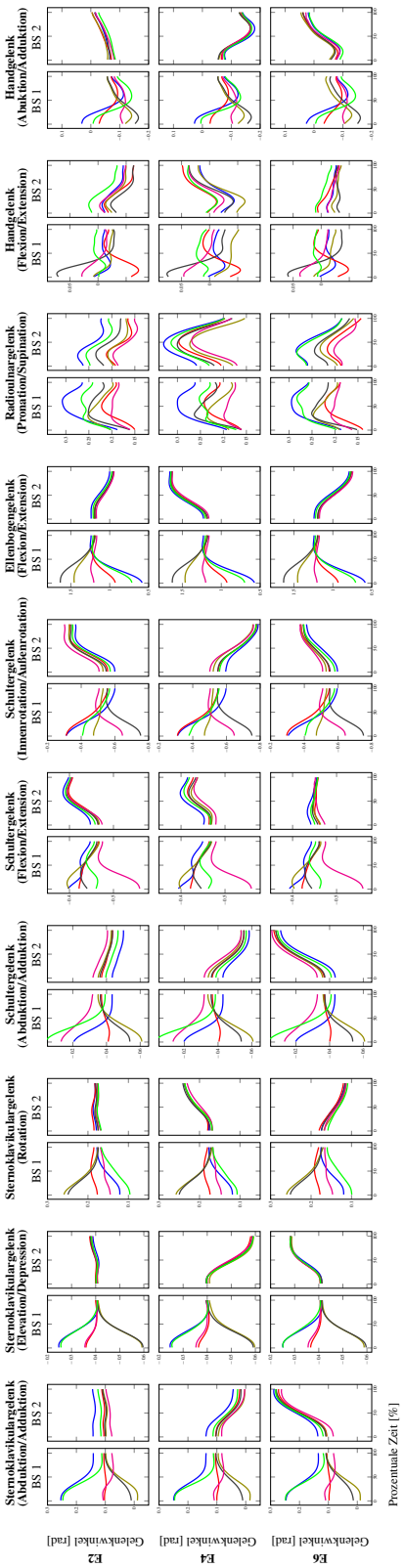

Abbildung 5.2: Die Darstellung aller zehn Winkel beim Vergleich von Bedingungen mit jeweils gleichen Endpositionen, zeigt direkte Hinweise auf carry-over Koartikulation. (Experiment 1)

Literaturverzeichnis

Abend W, Bizzi E, Morasso P (1982) Human arm trajectory formation. Brain 105(Pt 2):331–348

Aivar MP, Brenner E, Smeets JBJ (2005) Correcting slightly less simple movements. Psicológica 26:61–79

Ansuini C, Santello M, Massaccesi S, Castiello U (2006) Effects of end-goal on hand shaping. J Neurophysiol 95(4):2456–2465

Ansuini C, Giosa L, Turella L, Altoè G, Castiello U (2008) An object for an action, the same object for other actions: effects on hand shaping. Exp Brain Res 185(1):111–119

Bernstein NA (1967) The coordination and regulation of movements. London: Pergamon

Brown LE, Rosenbaum DA (2002) Motor Control: Models. In: Nadel L (ed) The Encyclopedia of Cognitive Science, Macmillan, pp 127–133

Brüwer M, Cruse H (1990) A network model for the control of the movement of a redundant manipulator. Biol Cybern 62(6):549–555

Bullock D, Bongers RM, Lankhorst M, Beek PJ (1999) A vector-integration-to-endpoint model for performance of viapoint movements. Neural Netw 12(1):1–29

Cohen RG, Rosenbaum DA (2004) Where grasps are made reveals how grasps are planned: generation and recall of motor plans. Exp Brain Res 157(4):486–495

Crawford JD, Vilis T (1991) Axes of eye rotation and Listing's law during rotations of the head. J Neurophysiol 65(3):407–423

Cruse H, Brüwer M, Dean J (1993) Control of Three- and Four-Joint Arm Movement: Strategies for a Manipulator With Redundant Degrees of Freedom. J Mot Behav 25(3):131–139

Daniloff R, Moll K (1968) Coarticulation of lip rounding. J Speech Hear Res 11(4):707–721

Domkin D, Laczko J, Jaric S, Johansson H, Latash ML (2002) Structure of joint variability in bimanual pointing tasks. Exp Brain Res 143(1):11–23

Donders F (1847) Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges. In: Holländischen Beitragen zu den Anatomischen und Physiologischen Wissenschaften, Amsterdam, vol 1, pp 104–145

Dounskaia N (2007) Kinematic invariants during cyclical arm movements. Biol Cybern 96(2):147–163

Ehrig RM, Taylor WR, Duda GN, Heller MO (2006) A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints. Journal of biomechanics 39(15):2798–2809

Engel KC, Flanders M, Soechting JF (1997) Anticipatory and sequential motor control in piano playing. Exp Brain Res 113(2):189–199

Feldman AG (1986) Once more on the equilibrium point hypothesis (λ-model) for motor control. J Mot Behav 18:15–54

Fitts PM (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. J Exp Psychol 47(6):381–391

Flash T, Hogan N (1985) The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. J Neurosci 5(7):1688–1703

Georgopoulos AP, Kalaska JF, Massey JT (1981) Spatial trajectories and reaction times of aimed movements: effects of practice, uncertainty, and change in target location. J Neurophysiol 46(4):725–743

Georgopoulos AP, Schwartz AB, Kettner RE (1986) Neural population coding of movement direction. Science 233:1416–1419

Gera G, Freitas S, Latash M, Monahan K, Schöner G, Scholz J (2010) Motor Abundance Contributes to Resolving Multiple Kinematic Task Constraints. Motor Control 14:83–115

Gielen CC, Vrijenhoek EJ, Flash T, Neggers SF (1997) Arm position constraints during pointing and reaching in 3-D space. J Neurophysiol 78(2):660–673

Goodale MA, Pelisson D, Prablanc C (1986) Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. Nature 320(6064):748–750

Gribble PL, Ostry DJ, Sanguineti V, Laboissière R (1998) Are complex control signals required for human arm movement. Journal of Neurophysiology 79:1409–1424

Grimme B, Fuchs S, Perrier P, Schöner G (2011) Limb versus speech motor control: a conceptual review. Motor Control 15(1):5–33

Hasan Z (1986) Optimized movement trajectories and joint stiffness in unperturbed, inertially loaded movements. Biol Cybern 53(6):373–382

Herbort O, Butz MV (2009) Anticipatory planning of sequential hand and finger movements. J Mot Behav 41(6):561–569

Hermens F, Gielen S (2004) Posture-based or trajectory-based movement planning: a comparison of direct and indirect pointing movements. Exp Brain Res 159(3):340–348

Hollerbach MJ, Flash T (1982) Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement. Biol Cybern 44(1):67–77

Jacquier-Bret J, Rezzoug N, Gorce P (2009) Adaptation of joint flexibility during a reach-to-grasp movement. Motor Control 13(3):342–361

Jerde TE, Soechting JF, Flanders M (2003) Coarticulation in fluent fingerspelling. J Neurosci 23(6):2383–2393

Kelso JA (2009) Synergies: atoms of brain and behavior. Adv Exp Med Biol 629:83–91

Klein CA, , Huang CH (1983) Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators. In: Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, IEEE, vol SMC-13

Klein Breteler MD, Hondzinski JM, Flanders M (2003) Drawing sequences of segments in 3D: kinetic influences on arm configuration. J Neurophysiol 89(6):3253–3263

Krüger M, Borbely B, Eggert T, Straube A (2012) Synergistic control of joint angle variability: influence of target shape. Hum Mov Sci 31(5):1071–1089

Lacquaniti F, Terzuolo C, Viviani P (1983) The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. Acta Psychol (Amst) 54(1-3):115–130

Lashley KS (1933) Integrative functions of the cerebral cortex. American Physiological Society 13(1):1–42

Lashley KS (1951) The problem of serial order in behavior. In: LA J (ed) Cerebral Mechanisms in Behavior, NY: John Wiley, New York, pp 112–131

Latash ML, Scholz JP, Schöner G (2007) Toward a new theory of motor synergies. Motor Control 11(3):276–308

Leardini A, Cappozzo A, Catani F, Toksvig-larsen S, Petitto A, Sforza V, Cassanelli G, Giannini S (1999) Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location. J Biomech 32:99–103

Liegeois A (1977) Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics 7(12):842–868

Lu TW, O'Connor JJ (1999) Bone position estimation from skin marker co-ordinates using global optimisation with joint constraints. J Biomech 32(2):129–134

Marteniuk RG, MacKenzie CL, Jeannerod M, Athenes S, Dugas C (1987) Constraints on human arm movement trajectories. Can J Psychol 41(3):365–378

Martin V, Scholz JP, Schöner G (2009) Redundancy, self-motion, and motor control. Neural Comput 21(5):1371–1414

Mason AH (2007) Performance of unimanual and bimanual multiphased prehensile movements. J Mot Behav 39(4):291–305

Mattos D, Schöner G, Zatsiorsky VM, Latash ML (2015) Task-specific stability of abundant systems: Structure of variance and motor equivalence. Neuroscience 310:600–615

Mattos DJ, Latash ML, Park E, Kuhl J, Scholz JP (2011) Unpredictable elbow joint perturbation during reaching results in multijoint motor equivalence. J Neurophysiol 106(3):1424–1436

Morasso P (1981) Spatial control of arm movements. Exp Brain Res 42(2):223–227

Müller H, Sternad D (2009) Motor learning: changes in the structure of variability in a redundant task. Adv Exp Med Biol 629:439–456

Murray RM, Li Z, Sastry SS (1994) A mathematical introduction to robotic manipulation. In: Boca Raton, FL: CRC Press

Nelson WL (1983) Physical principles for economies of skilled movements. Biol Cybern 46(2):135–147

Reisman DS, Scholz JP, Schöner G (2002) Differential joint coordination in the tasks of standing up and sitting down. Journal of Electromyography and Kinesiology 12:493–505

Rosenbaum DA, Marchak F, Barnes HJ, Vaughan J, Slotta JD, Jorgensen MJ (1990) Constraints for action selection: Overhand versus underhand grips. In: Jeannerod M (ed) Attention and Performance XIII, NJ: Erlbaum, Hillsdale, S 321–342

Rosenbaum DA, van Heugten CM, Caldwell GE (1996) From cognition to biomechanics and back: the end-state comfort effect and the middle-is-faster effect. Acta Psychol (Amst) 94(1):59–85

Rosenbaum DA, Meulenbroek RG, Vaughan J, Jansen C (1999) Coordination of reaching and grasping by capitalizing on obstacle avoidance and other constraints. Exp Brain Res 128(1-2):92–100

Rosenbaum DA, Cohen RG, Meulenbroek RGJ, Vaughan J (2006) Plans for grasping objects. In: Latash ML, Lestienne F (eds) Motor Control and Learning, Springer US, Boston, MA, pp 9–25

Schaal S (2002) Arm and hand movement control. In: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, 2nd edn, edited by Arbib MA. Cambridge, MA: MIT Press, pp 110–113

Scholz JP, Schöner G (1999) The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. Exp Brain Res 126(3):289–306

Scholz JP, Schöner G, Latash ML (2000) Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting. Exp Brain Res 135:382–404

Scholz JP, Danion F, Latash ML, Schöner G (2002) Understanding finger coordination through analysis of the structure of force variability. Biol Cybern 86(1):29–39

Scholz JP, Schöner G, Hsu WL, Jeka JJ, Horak F, Martin V (2007) Motor equivalent control of the center of mass in response to support surface perturbations. Exp Brain Res 180(1):163–179

Scholz JP, Dwight-Higgin T, Lynch JE, Tseng YW, Martin V, Schöner G (2011) Motor equivalence and self-motion induced by different movement speeds. Exp Brain Res 209(3):319–332

Schöner G (1995) Recent developments and problems in human movement science and their conceptual implications. Ecological Psychology 7(4):291–314

Schöner G, Scholz JP (2007) Analyzing variance in multi-degree-of-freedom movements: uncovering structure versus extracting correlations. Motor Control 11(3):259–275

Schöner G, Martin V, Reimann H, Scholz J (2008) Motor equivalence and the uncontrolled manifold. In: R Sock YL S Fuchs (ed) 8th International Seminar on Speech Production, INRIA, Strasbourg. France, pp 23–28

Söderkvist I, Wedin P (1993) Determining the movements of the skeleton using well-configured markers. Journal of Biomechanics 26(12):1473–1477

Soechting JF, Flanders M (1992) Organization of sequential typing movements. J Neurophysiol 67(5):1275–1290

Soechting JF, Lacquaniti F (1981) Invariant characteristics of a pointing movement in man. J Neurosci 1(7):710–720

Soechting JF, Buneo CA, Herrmann U, Flanders M (1995) Moving effortlessly in three dimensions: does donders' law apply to arm movement? J Neurosci 15(9):6271–6280

Sosnik R, Hauptmann B, Karni A, Flash T (2004) When practice leads to co-articulation: the evolution of geometrically defined movement primitives. Exp Brain Res 156(4):422–438

van der Steen MM, Bongers RM (2011) Joint angle variability and co-variation in a reaching with a rod task. Exp Brain Res 208(3):411–422

Sternberg S, Monsell S, Knoll RL, Wright CE (1978) The latency and duration of rapid movement sequences: Comparisons of speech and typewriting. In: GE S (ed) Information Processing in Motor Control and Learning, NY: Academic Press, New York, S 117–152

Thier P (2006) Grundlagen zielgerichteter Motorik. In: Kognitive Neurowissenschaften, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Thomaschke R (2012) Investigating ideomotor cognition with motorvisual priming paradigms: Key findings, methodological challenges, and future directions. Frontiers in Psychology 3(519):1–15

Tseng Y, Scholz JP, Schöner G (2002) Goal-equivalent joint coordination in pointing: affect of vision and arm dominance. Motor Control 6(2):183–207

Tseng YW, Scholz JP, Schöner G, Hotchkiss L (2003) Effect of accuracy constraint on joint coordination during pointing movements. Exp Brain Res 149(3):276–288

Uno Y, Kawato M, Suzuki R (1989) Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. minimum torque-change model. Biol Cybern 61(2):89–101

Viviani P, Flash T (1995) Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. J Exp Psychol Hum Percept Perform 21(1):32–53

Viviani P, McCollum G (1983) The relation between linear extent and velocity in drawing movements. Neuroscience 10(1):211–218

van der Wel RP, Rosenbaum DA (2007) Coordination of locomotion and prehension. Exp Brain Res 176(2):281–287

van der Wel RP, Fleckenstein RM, Jax SA, Rosenbaum DA (2007) Hand path priming in manual obstacle avoidance: evidence for abstract spatiotemporal forms in human motor control. J Exp Psychol Hum Percept Perform 33(5):1117–1126

Whitney DE (1969) Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. In: IEEE Transactions on Man-Machine Systems, vol 10, pp 47–53

Yang JF, Scholz JP, Latash ML (2007) The role of kinematic redundancy in adaptation of reaching. Exp Brain Res 176(1):54–69

Eigene Publikationen

Fachzeitschriften

In Submission: Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2017) Carry-over coarticulation is motor equivalent, but anticipatory coarticulation is not. Experimental Brain Research

Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2015) Carry-over coarticulation in joint angles. Experimental Brain Research 233(9):2555–2569

Buchkapitel

Schöner G, Nowak E (2015) Coordination Dynamics. In Jaeger D, Jung R (Eds.) Encyclopedia of Computational Neuroscience, Vol. 1, pp 853-855. Springer New York Heidelberg Dordrecht London

Konferenzbeiträge

Hansen E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2015) Anticipatory and carry-over coarticulation in experiments with two sequential sub-movements. Progress in Motor Control X, Budapest Hungary

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2014) Coarticulation in sequential human arm movements. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, Göttingen, Germany

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2014) Anticipatory and carry-over coarticulation in sequential human arm movements. In: Neuroscience Annual Meeting, Society for Neuroscience, Washington, DC, USA

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2013) Direction-dependent carry-over coarticulation in joint angles. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, Tübingen, Germany

Grimme B., Nowak E., Reimann H., Schöner G. (2013) Evidence for movement primitives in human arm movements: the lift and the transport primitive. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, Tübingen, Germany

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2013) Direction-dependent carry-over coarticulation in joint angles. Progress in Motor Control IX, Montreal, Canada

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2012) Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. In: Neuroscience Annual Meeting, Society for Neuroscience, New Orleans, USA

Nowak E, Grimme B, Reimann H, Schöner G (2012) Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, München, Germany

Grimme B., Nowak E., Reimann H., Schöner G. (2012) Motor equivalence as a method to reveal movement invariants/primitives. Frontiers in Computational Neuroscience. Conference Abstract: Bernstein Conference on Computational Neuroscience, München, Germany

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Eva Hansen
Familienstand	Verheiratet (geb. Nowak)
Geburtsdatum	7. Januar 1985
Geburtsort	Würzburg
Nationalität	Deutsch
E-Mail	eva.hansen@ini.ruhr-uni-bochum.de

Ausbildung und beruflicher Werdegang

seit 2012	**Promotionsstudent der Graduiertenschule Biologie**, *Ruhr-Universität Bochum*
2011-2017	**Wissenschaftlicher Mitarbeiter**, *Ruhr-Universität Bochum*, Institut für Neuroinformatik
2008-2011	**Hilfswissenschaftler**, *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*
2006-2010	**Diplom Biologie, Fachrichtung Neurobiologie**, *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* Diplomarbeit: Psychophysische Untersuchungen zur Bestimmung kritischer Parameter für die dynamische Integration verdeckter Objekte in der Wahrnehmung
2007	**Auslandssemester: Studium in Norwegen**, *Norwegian University of Science and Technology, Trondheim*
2004-2006	**Vordiplom Biologie**, *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*
2004	**Abitur**, *Röntgengymnasium Würzburg*