Aus dem Institut für Physiologie und Anatomie der Deutschen Sporthochschule Köln
Geschäftsführender Leiter: Professor Dr. med. Otmar Bock

Mechanismen der sensomotorischen Adaptation unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses sensorischer Informationsquellen

von der Deutschen Sporthochschule Köln
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Sportwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Monika Thomas

Köln, Februar 2010

Erster Referent:	Prof. Dr. med. O. Bock
Zweiter Referent:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Heuer
Vorsitzende des Prüfungsausschusses:	Prof. Dr. phil. I.A.F. Hartmann-Tews
Tag der Disputation:	25.05.2010

Hierdurch versichere ich an Eides statt: Ich habe diese Dissertation selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen angefertigt; sie hat noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen. Wörtlich übernommene Textstellen, auch Einzelsätze oder Teile davon, sind als Zitate kenntlich gemacht.

_____

Köln, im Februar, 2010 Monika Thomas

Vorwort

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. Otmar Bock für die Überlassung des Themas und die sehr gute Betreuung während meiner Promotionszeit. Durch die stets offene Türe war es immer möglich, Fragen zu stellen, Probleme zu diskutieren und Gespräche zu führen, was eine große Hilfe und Unterstützung war.

Ein weiteres Dankeschön geht an alle meine lieben Kollegen. Die vielen motivierenden Worte, die große Hilfsbereitschaft bei Problemen jeglicher Art und vor allem das freundschaftliche Arbeitsklima waren unbezahlbar. Zusätzlich danke ich Lutz Geisen und Frau Bartels für die Programmierung der Software. Für die geduldige und schnelle Hilfe bei Problemen mit der Software und Hardware, vor allem des „Phantoms“, danke ich ganz besonders Lutz Geisen und Hartmut Schink.

Zusätzlich bedanke ich mich bei den Diplomanden Steffen Hoeppener, Verena Rohde und Yaimysel Chavéz Perez sowie den studentischen Hilfskräften Stefanie Meuter, Maike Böttger, Britta Herbst und Ann-Christin Kleidt für die hilfreiche Unterstützung bei der Datenerhebung und -auswertung. Außerdem gilt mein Dank allen Probanden, die sich bereit erklärt haben an den Experimenten teilzunehmen.

Ein besonderer Dank gilt Susen Werner, Petra Guardiera und Pia Frede für die wertvolle, motivierende Unterstützung zur Fertigstellung meiner Arbeit.

Natürlich bedanke ich mich ganz besonders bei meinen Eltern, meinen Geschwistern und Großeltern, die durch ihre liebevolle und ermutigende Unterstützung Halt gegeben und erheblich dazu beigetragen haben, mein Ziel zu erreichen. Die wichtigste Person war mein Freund Udo Müller. Seine große Geduld und Unterstützung in jeglicher Hinsicht war ermutigend und gab mir immer wieder wichtige Kraft. Danke, dass du da warst und meine Launen so lange ertragen hast!

Teile dieser Arbeit sind bereits mit Einverständnis des Doktorvaters Prof. Dr. med. O. Bock bei der Zeitschrift Human Movement Science zur Veröffentlichung eingereicht:
Thomas, M. & Bock, O. (akzeptiert). Is sensorimotor adaptation to position- and velocity-dependent visual distortions based on distinct adaptive processes? Human Movement Science.

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des DLR (Förderkennzeichen 50WB9942) und der DFG (Förderkennzeichen BO 649/8) gefördert.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Versuchsaufbau aller Experimente (außer Exp. 5). 29

Abb. 2: Monitorabbild aller Experimente (außer Exp. 1 und 5). 29

Abb. 3: Originalbewegungen des Cursors und des Effektors. 32

Abb. 4: Monitorabbild von Exp. 1. 36

Abb. 5: Zeitlicher Verlauf des initialen Fehlerwinkels zum Zeitpunkt 150 ms nach Bewegungsbeginn ($error_t$) (Exp. 1). 40

Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der V_{max} (Exp. 1). 43

Abb. 7: $Error_t$ der voradaptierten Bedingungen identisch der Darstellung in Abb. 5 und die jeweilige Annahme (graue Linie) (Exp. 1). 44

Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 2). 48

Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ der Gruppe V^-_{pos} F^-_{pos} (Alt) (Exp. 2). 51

Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 3). 55

Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 4). 65

Abb. 12: Zeitkonstanten (t) der Adaptationsphasen über die Gruppenmittelwerte des Parameters $error_t$ (Exp. 4). 66

Abb. 13: Darstellung des Versuchsaufbaus von Exp. 5. 67

Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 5). 72

Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 6a/b). 82

Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Stabw_$error_t$ (Exp. 6a/b). 84

Abb. 17: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 7). 93

Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der Stabw_$error_t$ (Exp. 7). 95

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anzahl, Geschlechterverteilung und mittleres Alter ± Standardabweichung der Probanden der Exp. 1-7. 27

Tab. 2: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 1. 37

Tab. 3: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 1) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}. ... 40

Tab. 4: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} (Exp. 1). 41

Tab. 5: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für V^-_{geschw} (Exp. 1). 41

Tab. 6: Ergebnisse der ANOVAs der $Dist_{150}$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und Vel_{150} für V^-_{geschw} (Exp. 1). 41

Tab. 7: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 1) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}. 42

Tab. 8: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der V_{max} für V^-_{pos} / V^+_{pos} (Exp. 1). 42

Tab. 9: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der V_{max} für V^-_{geschw} (Exp. 1). 43

Tab. 10: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 2. 46

Tab. 11: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos}. 49

Tab. 12: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung gung des $error_t$ (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos}. 49

Tab. 13: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ (Exp. 2) für F^-_{pos}. 49

Tab. 14: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos}. 50

Tab. 15: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos} von AD1 der phasenweisen Adaptation und der Adaptation der alternierenden Gruppe. 51

Tab. 16: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 3. 53

Tab. 17: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 3). 54

Tab. 18: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} (Exp. 3). 54

Tab. 19: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für F^-_{geschw} (Exp. 3). 55

Tab. 20: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 3) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{geschw}. 56

Tab. 21: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 4. 63

Tab. 22: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 4) für die Adaptations- und Deadaptationsphase. 65

Tab. 23: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 5. 69

Tab. 24: Ergebnisse der ANOVA des $error_t$ (Exp. 5). 70

Tab. 25: Relevante extrahierte Ergebnisse des Post-hoc Tests der signifikanten Interaktion Block * Gruppe des $error_t$ (Exp. 5). 70

Tab. 26: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 6a/b. 79

Tab. 27: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 6a/b) der Adaptationsphase an F^+_{geschw}, F^+_{pos} und V^+_{geschw}. 80

Tab. 28: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 6a/b) der Deadaptationsphase von F^-_{geschw}, F^-_{pos} und V^+_{geschw}. 81

Tab. 29: Ergebnisse der ANOVAs der $Stabw_error_t$ (Exp. 6a/b) der Adaptationsphase an F^+_{geschw}, F^+_{pos} und V^+_{geschw}. 83

Tab. 30: Ergebnisse der ANOVAs der $Stabw_error_t$ (Exp. 6a/b) der Deadaptationsphase von F^-_{geschw}, F^-_{pos} und V^+_{geschw}. 83

Tab. 31: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 7. 89

Tab. 32: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 7) der Adaptationsphase an F^-_{geschw} und V^+_{pos}. 91

Tab. 33: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für F^+_{geschw} (Exp. 7). 92

Tab. 34: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 7) der Deadaptationsphase von F^+_{geschw}. 92

Tab. 35: Ergebnisse der ANOVAs der $Stabw_error_t$ (Exp. 7) der Adaptationsphasen an F^+_{geschw}. 94

Tab. 36: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der $Stabw_error_t$ für F^+_{geschw} (Exp. 7). 94

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Motorisches Lernen 2

1.2 Sensomotorische Adaptation 3

1.3 Sensomotorische Adaptation als Gegenstand der Forschung 4

1.4 Strategische Kontrolle und Rekalibrierung 7

1.5 Transferuntersuchungen 9

1.6 Unterschiede und Gemeinsamkeiten verschiedener mechanischer Diskordanzen 14

1.7 Zur Relevanz der visuellen und propriozeptiven Rückmeldung 17

1.8 Zielsetzung der Arbeit 22

2 Experimente 26

2.1 Allgemeine Methodik 26

2.1.1 Versuchspersonen 26

2.1.2 Apparatur 27

2.1.3 Versuchsdesign 30

2.1.4 Statistische Auswertung 32

2.2 Experimente 1-3 (Transfer) 35

2.2.1 Exp. 1: Spezielle Methodik 35

2.2.2 Exp. 1: Ergebnisse 38

2.2.3 Exp. 2: Spezielle Methodik 45

2.2.4 Exp. 2: Ergebnisse 47

2.2.5 Exp. 3: Spezielle Methodik 52

2.2.6 Exp. 3: Ergebnisse 53

2.2.7 Exp. 1-3: Diskussion 57

2.3 Experimente 4-5 (Coriolis) 62

2.3.1 Exp. 4: Spezielle Methodik 62

2.3.2 Exp. 4: Ergebnisse 64

2.3.3 Exp. 5: Spezielle Methodik 66

2.3.4 Exp. 5: Ergebnisse 69

2.3.5 Exp. 4-5: Diskussion 73

2.4 Experiment 6a/b (Vibration) 77
2.4.1 Exp. 6a: Spezielle Methodik 77
2.4.2 Exp. 6b: Spezielle Methodik 79
2.4.3 Exp. 6a/b: Diskussion 85
2.5 Experiment 7 (Vibration) 88
2.5.1 Exp. 7: Spezielle Methodik 88
2.5.2 Exp. 7: Ergebnisse 90
2.5.3 Exp. 7: Diskussion 95

3 Allgemeine Diskussion 99
3.1 Methodenkritik 100
3.2 Adaptive Mechanismen 101
3.3 Der Einfluss der Sinnesmodalitäten 106
3.4 Fazit 109
3.5 Praktische Relevanz 110
3.6 Ausblick 111

4 Zusammenfassung 112

5 Literatur I

6 Anhang

1 Einleitung

Im Verlauf seiner Entwicklung lernt der Mensch in unterschiedlichen Lebensphasen verschiedene Fähigkeiten und Fertigkeiten und sammelt stetig wachsende Erfahrung. Das Lernen und im Speziellen das Bewegungslernen ist ein essentieller Bestandteil unseres gesamten Lebens. In den jeweiligen Lebensaltern ist die Intensität mit der ein Mensch lernt oder sich an ihn umgebende Verhältnisse anpasst unterschiedlich ausgeprägt. In der Kindheit sind Lernprozesse sehr intensiv und prägen grundlegend die motorische Leistungsfähigkeit eines Menschen, so dass die motorische Entwicklung bei der Beurteilung der kindlichen Entwicklung oft im Mittelpunkt steht. Aber auch in späteren Lebensphasen bis hin ins Seniorenalter ist Bewegungslernen in anderem Umfang und anderer Ausprägung von Bedeutung. Im Unterschied zum elementaren Bewegungslernen in der Kindheit sind es zunehmend Anpassungsprozesse gelernter Bewegungsmuster an neue Umweltbedingungen, die eine Rolle spielen. Der Sport ist ein Bereich, indem solche Anpassungsprozesse ständig von wesentlicher Bedeutung sind, beispielsweise in Form einer adäquaten Anpassung des eigenen Bewegungsverhaltens an Aktionen des Gegners bei Mannschaftsportarten. In hohem Alter kann motorische Lernfähigkeit mitunter sogar lebenserhaltend sein: so müssen beispielsweise auftretende körperliche Schwächen oder Verletzungen kompensiert werden. Entsprechend ist es von Nöten das Bewegungsverhalten beispielsweise bei auftretenden Muskelatrophien oder bei der Nutzung von Gehhilfen anzupassen.

Umso wichtiger ist es motorische Lernprozesse zu verstehen. Effektives Lernen ist abhängig von zahlreichen Determinanten. Viele intrinsische Aspekte auf neurophysiologischer Ebene haben darauf erheblichen Einfluss. Hinzu kommen extrinsische Aspekte bezüglich der Beschaffenheit unserer Umwelt sowie die Wechselwirkung beider Aspekte. Folglich stellen Erkenntnisse über die Informationsverarbeitung und -umsetzung unseres Nervensystems eine wichtige Grundlage für das Verständnis motorischer Lernprozesse dar. Das Ziel dieser Arbeit ist es, zu einem Erkenntnisgewinn bezüglich der Funktionalität motorischer Lernprozesse beizutragen. Dabei stehen die Aspekte der Transferleistungen von bereits Gelerntem auf unbekannte Bedingungen sowie der Einfluss der Informationsaufnahme über den sensorischen Apparat im Vordergrund. Die Untersuchung von Transferleistungen, wie sie in der vorliegen-

den Arbeit praktiziert wird, bietet eine sinnvolle Möglichkeit, um Rückschlüsse auf die Art und Weise der Verarbeitung von Anpassung an unterschiedliche Bedingungen zu ziehen. Die Erforschung des Einflusses der sensorischen Informationen bietet die Möglichkeit die Abhängigkeit der Funktionalität motorischer Lernprozesse von bestimmten Umweltinformationen festzustellen.

1.1 Motorisches Lernen

Für das Bewegungslernen ist der sensorische Apparat ein lebenswichtiger Bestandteil. Durch unsere Sinne nehmen wir Informationen aus der Umwelt auf, aus denen Bewegungen resultieren können, welche die Sprache mit einbeziehen. Auf diese Weise findet Kommunikation mit der Umgebung statt. Die Umwelt als extrinsischer Faktor und Informationsvermittler ist folglich erheblich an der Effektivität der Lernprozesse beteiligt. Je mehr handlungsauffordernde Gegebenheiten existieren, desto mehr Reize treiben die motorische Entwicklung vor allem im Kindesalter voran. Beispiele sind Spielzeuge, Treppen oder Bäume, die zum Klettern reizen und genutzt werden können. Durch Lernen entstehen neuronale Netzwerke, die sich durch ein reichhaltiges Angebot an Reizen vielfältiger entwickeln können. Erfahrung und Übung ermöglichen das Lernen, also eine relativ dauerhafte Veränderung des Bewegungsverhaltens, definiert als eine Reihe von internen Prozessen (Schmidt & Lee 1999). Daraus resultiert ein automatisiertes Bewegungsverhalten, welches keiner Aufmerksamkeit mehr bedarf (Seitz 2001). Die Auseinandersetzung mit der Umwelt kann sowohl unbewusst (implizites Lernen) als auch bewusst (explizites Lernen) geschehen. Während das Lernen von Grundfertigkeiten wie Laufen im Kindesalter überwiegend implizit abläuft, unterliegen Lernprozesse später immer mehr expliziten Einflüssen. Größtenteils sind jedoch beide Formen an Lernprozessen beteiligt und nur schwer voneinander abgrenzbar.

Für ein effektives, situationsangepasstes Bewegungsverhalten reicht es nicht aus, einmal gelernte Bewegung automatisiert anwenden zu können. Vielmehr sind Modifikationen unabdingbar, um auf wechselnde Umwelteinflüsse reagieren zu können. Auf der Grundlage einer gelernten Bewegung muss sich das Verhalten anpassen können, was eine gewisse Plastizität des Nervensystems voraussetzt. Bei einem solchen Prozess handelt es sich folglich nicht um komplettes Neulernen einer Bewegung, sondern ein gelerntes Bewegungsmuster wird modifiziert. Ein nachvollziehbares Beispiel hierfür ist die Anpassung an Fahreigenschaften unter-

schiedlicher Autos. Wenn die Fahreigenschaften eines bestimmten Autos verinnerlicht wurden, welches über Bremskraftverstärker, Servolenkung und Automatikgetriebe verfügt, dann gehen das Bremsen mit der richtigen Intensität sowie das Lenken automatisch von statten. Das Fahren eines Autos ohne Bremskraftverstärker, ohne Servolenkung und mit manuellem Getriebe wird daraufhin fehleranfällig. Mit der Zeit lernt der Fahrer sich anzupassen und das Fahren dieses Autos funktioniert fehlerfrei und automatisiert. In diesem Zusammenhang spricht man auch von **sensomotorischer Adaptation**. Allerdings kann das Neulernen einer Bewegung von dem Umlernen eines bereits vorhandenen Bewegungsmusters nicht immer klar abgegrenzt werden.

1.2 Sensomotorische Adaptation

Der Begriff Sensomotorik impliziert, dass sowohl sensorische als auch motorische neuronale Prozesse bei der Anpassung von Bewegungsmustern an veränderte äußere Bedingungen beteiligt sind. Eine gelernte Bewegung basiert auf einem abgespeicherten Zusammenhang zwischen einer Umweltinformation - aufgenommen durch die Sensoren - und der motorischen Antwort. Dieser Zusammenhang ist neuronal repräsentiert und wird in der Literatur als „internes Modell“ bezeichnet (Flanagan et al. 1999, Wolpert et al. 2001). Allerdings ist diese Begrifflichkeit wenig deskriptiv und hinterlässt die Vorstellung der Existenz einzelner abgespeicherter Zusammenhänge. Im Gegensatz dazu beschreiben die Begriffe **sensomotorische Transformation** (Mistry & Contreras-Vidal 2004) oder **sensomotorische Transformationsregel** (Bock et al. 2005c) den Sachverhalt anschaulicher. Daraus geht deutlich hervor, dass eine definierte sensorische Information in eine durch den abgespeicherten Zusammenhang adäquate motorische Antwort transformiert wird. Kommt es zu einer Veränderung dieses repräsentierten Zusammenhangs zwischen Sensorik und Motorik – beispielsweise durch das Tragen einer Brille – ist die Transformation fehlerhaft und resultiert in einer inadäquaten Bewegungsausführung. Diesen Sachverhalt beschreibt der Begriff **sensomotorische Diskordanz** (Howard 1971). Infolge dessen kommt es zu adaptiven Prozessen auf neuronaler Ebene, bis der inadäquate ursprünglich repräsentierte Zusammenhang zwischen sensorischen Reizen und motorischer Konsequenz den neuen Umständen entsprechend modifiziert wurde. Als Resultat ist die Bewegungsausführung wieder fehlerfrei.

Diskordanzen können im Zusammenhang mit jeglicher sensorischer Rückmeldung auftreten. Auf visueller Ebene ergeben sich Diskordanzen im Alltagsleben verhältnismäßig häufig, wie zum Beispiel beim Tragen einer neuen Brille oder bei einer Handlung während des Blickes in den Spiegel. Auch die propriozeptive Sinnesmodalität, welche für die Eigenwahrnehmung zuständig ist, ist in vielen Situationen betroffen. Die Propriozeption beinhaltet alle Rezeptoren, die Informationen über den eigenen Körper vermitteln sowie zum Beispiel Muskelspindelrezeptoren zur Kraftwahrnehmung und Gelenkrezeptoren zur Wahrnehmung der Stellung der Gelenke (siehe hierzu Kapitel 1.7). Eine propriozeptive Diskordanz entsteht beispielsweise beim Fahren eines Autos mit ungewohnten Eigenschaften wie oben beschrieben. Häufig stehen die visuelle und propriozeptive Sinnesmodalität in engem Zusammenhang und sind parallel an einem Adaptationsvorgang beteiligt.

1.3 Sensomotorische Adaptation als Gegenstand der Forschung

Schon früh waren Forscher am Verständnis von sensomotorischen Lernprozessen interessiert. Der Beginn dieses Forschungsbereiches geht auf den Wissenschaftler Stratton zurück. Er fand heraus, dass sich Bewegungsverhalten an externe Veränderungen anpasst (Stratton 1897). Dazu verwendete er in einem Selbstversuch eine Prismenbrille, welche die visuelle Rückmeldung um ein bestimmtes Maß verzerrte und so eine **visuelle Diskordanz** hervorrief. Im 20. Jahrhundert wurde dieses Forschungsgebiet auf eine psychologisch fundierte Basis gebracht (Kohler 1955). Im Laufe der Zeit etablierten sich zunehmend mehr Forscher auf diesem Gebiet und untersuchten das Adaptationsverhalten von zielgerichteten Bewegungen unter Verwendung von Prismenbrillen (Dewar 1970, Taub & Goldberg 1973). Zusätzlich etablierten sich immer mehr computergestützte Methoden, wie die Verfolgung eines beweglichen Zielpunktes mit einem Fadenkreuz gesteuert durch einen Joystick. Aufgabe dabei war es Fadenkreuz und Joystick deckungsgleich zu halten, während beide Positionen jedoch inkongruent waren (Bock et al. 2001). Neben solchen Folgebewegungen mit verzerrter visueller Rückmeldung ist die Adaptation an eine Rotation der visuellen Rückmeldung während ballistischer Zielzeigebewegungen eine der gängigsten Methoden (Bock et al. 2003, Krakauer et al. 1999, Tong et al. 2002). Dabei haben Probanden die Aufgabe, schnelle und genaue Zeigebewegungen zumeist mit dem dominanten Arm von einer definierten Startposition zu verschiedenen auf einer Kreisbahn liegenden Zielpositionen auszuführen. Da die Experimente der vorliegenden Arbeit ausschließlich Zeigebewegungen beinhalten, wird der Fokus im Folgenden auf

Studien mit dieser Methodik gelegt. Zur Auslösung einer visuellen Diskordanz kann zum Beispiel währenddessen die visuelle Rückmeldung um einen bestimmten Winkel α um den Startpunkt gedreht werden. So konnte beispielsweise die Adaptation an eine um $\alpha = 60°$ rotierte Rückmeldung nachgewiesen werden (Bock 2005). Neben einer rotierten visuellen Rückmeldung konnte ebenfalls die Adaptationsfähigkeit an eine rechts-links Umkehr sowie oben-unten Umkehr sowie der Kombination aus beidem gezeigt werden (Bock 2003, Bock & Schneider 2001, Bock et al. 2001, Caselli et al. 2006). Außerdem wurden eine Verzerrung der Amplitudenlänge als visuelle Diskordanz verwendet und die Adaptationsfähigkeit nachgewiesen (Bock 1992, Heuer & Hegele 2008, Krakauer et al. 2000, Vindras & Viviani 2002). Somit konnte in zahlreichen Studien die Adaptationsfähigkeit an verschiedene visuelle Diskordanzen belegt werden.

Im breiten Forschungsfeld der sensomotorischen Adaptation wird neben dem Anpassungsverhalten an visuelle Diskordanzen auch das an **mechanische Diskordanzen** untersucht. Der entscheidende Unterschied zwischen visuellen und mechanischen Diskordanzen besteht darin, dass es bei einer visuellen Diskordanz zu einer Diskrepanz zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung kommt, da sich nur die visuelle Rückmeldung verändert. Bei mechanischen Diskordanzen wird der agierende Arm durch ein extern generiertes Kraftfeld tatsächlich auf unterschiedliche Art und Weise ausgelenkt, so dass die Störung auf propriozeptiver und visueller Ebene gleichermaßen entsteht. Ein solches Kraftfeld wird gängigerweise durch ein sogenanntes robotisches Manipulandum hervorgerufen (Pipereit et al. 2006, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994). Dabei handelt es sich um einen Roboter mit dreigelenkigem Hebelarm, der durch eine programmierte Kraft den agierenden Arm des Probanden auslenkt. Dazu ist der agierende Arm mit dem Ende des Hebelarms meist durch Greifen des stiftähnlichen Endes verbunden. Somit werden die robotischen Kräfte durch einen direkten Angriffspunkt unmittelbar auf den agierenden Arm übertragen und die Auslenkung erfolgt in Richtung des generierten Kraftfeldes. Zumeist wirken die Kraftfelder orthogonal zur intendierten Bewegungsrichtung des Arms. Dabei ist das Ausmaß der Kraft je nach Art der Störung abhängig von der Geschwindigkeit der Armbewegung (Pipereit et al. 2006) oder der Position in Bezug auf den Bewegungsstartpunkt (Tong et al. 2002). Diese unterschiedlichen kinematischen Bezüge resultieren in unterschiedlichen Auslenkungsmustern. Eine **geschwindigkeitsabhängige Kraft** bei einer ballistischen Zeigebewegung hat zur Folge, dass zu Bewegungsbeginn und –ende keine Kraft wirkt und die stärkste Auslenkung etwa in der Mitte der Bewegung mit einer Intensität proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit entsteht. Im Gegensatz dazu steigert sich

die Intensität der Kraft und somit die Auslenkung bei einer **positionsabhängigen Kraft** proportional zur Entfernung zum Bewegungsstartpunkt mit der stärksten Auslenkung am Ende der Bewegung. Die Adaptationsfähigkeit sowohl an geschwindigkeitsabhängige- als auch an positionsabhängige Kraftfelder konnte ebenfalls durch zahlreiche Studien bestätigt werden (Krakauer et al. 1999, Shadmehr & Brashers-Krug 1997, Shadmehr & Moussavi 2000, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994, Tong et al. 2002).

Eine weitere Form der Generierung eines Kraftfeldes stellt die Nutzung der **Corioliskraft** dar, die sich Lackner & DiZio (1994) als erste Forscher in diesem Zusammenhang zu Nutze machten. Der sogenannte Corioliseffekt wird durch ein rotierendes System ausgelöst und hat unter anderem zur Folge, dass sich bewegende Objekte senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung ausgelenkt werden. Die Intensität dieses Corioliseffektes ist von drei Parametern abhängig (Bourdin et al. 2001) und wie folgt definiert:

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{w}),$$

wobei m die Masse des bewegten Objektes ist, $\vec{v}$ der Geschwindigkeitsvektor der Objektbewegung relativ zum Rotationssystem und $\vec{w}$ der Vektor der Winkelgeschwindigkeit der Rotation. Die Corioliskraft wirkt entgegengesetzt zur Rotationsrichtung. Da das Ausmaß der Auslenkung unter anderem abhängig ist von der Bewegungsgeschwindigkeit des Objektes kann der Corioliseffekt als geschwindigkeitsabhängig wirkende Kraft angesehen werden. Um Probanden der Corioliskraft auszusetzen, sitzen diese im Zentrum einer rotierenden Plattform, während sie mit dem Arm Zeigebewegungen zu präsentierten Zielen ausführen (Bourdin et al. 2001, Lackner & Dizio 1994). Durch den Corioliseffekt wird der agierende Arm entsprechend ausgelenkt. Die Adaptationsfähigkeit an diese Störung wurde durch verschiedene Studien gezeigt (Bourdin & Bock 2006, Bourdin et al. 2001, Dizio & Lackner 1995, Lackner & Dizio 1994, Lackner & DiZio 2002, Lackner & DiZio 2005, Lai et al. 2003).

Zusammenfassend unterscheiden sich in der Adaptationsforschung verwendete Störungen folglich zum einen in ihrer physikalischen Beschaffenheit (visuell oder mechanisch) und zum anderen in Bezug auf die kinematische Kopplung zum agierenden Arm (geschwindigkeitsabhängig oder positionsabhängig), wobei die bisher verwendeten visuellen Störungen ausschließlich positionsabhängig waren.

Zur Quantifizierung der Adaptationsleistung wird vornehmlich die Genauigkeit der Bewegungen anhand verschiedener Variablen untersucht. Mit Einführung einer Störung nimmt die

Genauigkeit der Bewegungen deutlich ab und verbessert sich im Verlauf der Übungsphase wieder. Die Darstellung eines typischen Adaptationsverlaufs erfolgt gängigerweise mit Hilfe des produzierten Richtungsfehlers, der gegen den Zeitgang aufgetragen wird und im Verlauf abnimmt (Bock et al. 2005a, Pipereit et al. 2006, Sainburg et al. 2003, Seidler et al. 2006). Ebenfalls gängige Parameter sind Reaktionszeit (Goedert & Willingham 2002, Seidler et al. 2006), maximale Bewegungsgeschwindigkeit (Lackner & Dizio 1994, Seidler et al. 2006) oder die Bewegungsvariabilität (Cordo et al. 1994, Pipereit et al. 2006). Das Ausmaß des anfänglichen Fehlers und der Zeitgang der Fehlerreduktion sind unter anderem abhängig von der Intensität der Störung, der Anzahl der präsentierten Zielpositionen und der Art der Störung.

1.4 Strategische Kontrolle und Rekalibrierung

Die oben beschriebene Adaptationsleistung beinhaltet verschiedene Prozesse (McNay & Willingham 1998, Redding & Wallace 1996). Einerseits findet auf neuronaler Ebene eine Anpassung der intern repräsentierten sensomotorischen Transformation statt. Der interne Zusammenhang wird relativ dauerhaft verändert, woraufhin die motorischen Antworten im neuen Kontext automatisiert und ohne bewusste Kontrolle ablaufen (Bock, 2005; McNay und Willingham, 1998). In diesem Zusammenhang spricht man von **Rekalibrierung**. Andererseits laufen während des Lernprozesses der sensomotorischen Adaptation neben der Rekalibrierung auch Prozesse **strategischer Kontrolle** ab, welche in erheblichem Maße zum Lernerfolg beitragen. Dabei werden kognitive Strategien genutzt um Fehler zu reduzieren und die ursprüngliche Bewegungsgenauigkeit wieder herzustellen (Bock, 2005; Bock et al., 2005a; McNay und Willingham, 1998; Redding und Wallace, 1996). Diese Strategien umfassen verschiedene Mechanismen, die unter anderem Fehlerkorrekturen sowie die bewusste Kontrolle der Bewegung aufgrund sensorischer Rückmeldung beinhalten. Es wird vermutet, dass der Anteil beider Prozesse während des Adaptationsverlaufs variiert. Während zu Beginn der Adaptation strategische Prozesse als dominierend angenommen werden, steigert sich im Verlauf der Adaptation zunehmend die Rekalibrierung.

Eine Möglichkeit den Anteil der Rekalibrierung von strategischen Effekten abzugrenzen ist die Überprüfung der sogenannten **Nacheffekte**. Hierbei werden unterschiedliche Untersuchungsmethoden benutzt, die meistens im Anschluss an eine Adaptationsphase Verwendung finden.

Als eine Methode sei zunächst die **Deadaptation** genannt, die durch das plötzliche Abschalten der Störung nach vollendeter Adaptation charakterisiert ist (Brashers-Krug et al. 1996, Kitazawa et al. 1997, Lazar & Van Laer 1968, Mather & Lackner 1975, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994). Einen deutlichen Hinweis auf erfolgte Rekalibrierung nach einer Adaptation liefern fehlerhafte Bewegungsausführungen in die entgegengesetzte Richtung zur vorher generierten Störung unter dieser störungsfreien Normalbedingung (Kitazawa et al. 1997, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994). Die Höhe des Fehlers zu Beginn der Deadaptation gibt Aufschluss über den Anteil der Rekalibrierung, da Strategien nach Wegfall der Störung nicht mehr ins Gewicht fallen. Wenn während der Adaptationsphase keine Rekalibrierung stattgefunden hat, unterscheidet sich das Fehlerausmaß während der Deadaptation nicht von dem während der Grundbedingung vor der Adaptation und ist somit nur nahezu Null. Grundsätzlich ist das Ausmaß der Deadaptation geringer als das der Adaptationsleistung, was auf einen zusätzlichen Anteil strategischer Kontrolle während der Adaptation hinweist.

Darüber hinaus kann als Nacheffekt ebenfalls die **Persistenz** überprüft werden, indem nach der Adaptation die Bewegungen ohne visuelle Rückmeldung durchgeführt werden. Somit kann der Einfluss der strategischen Kontrolle weitgehend ausgeschlossen werden, so dass die Bewegungsausführung allein auf die Rekalibrierung zurückgeführt wird (Bock, 2005). Diese Art von Untersuchung ist jedoch für die Adaptation an visuelle Diskordanzen verwendbar. Bei mechanischen Diskordanzen müsste zusätzlich das während der Adaptation generierte Kraftfeld ausgeschaltet werden. Dann allerdings handelt es sich unter Umständen um eine bewusst wahrgenommene, veränderte Bedingung, die ebenfalls wieder unter strategischem Einfluss stünde. In der vorliegenden Arbeit werden sowohl visuelle als auch mechanische Diskordanzen verwendet. Um eine einheitliche Überprüfung des Nacheffekte zu gewährleisten, wird aus diesem Grund die Deadaptation als Untersuchungsmethode verwendet.

Der **Retentionstest** dient ebenfalls zur Quantifizierung der Nacheffekte. Hierbei wird überprüft, wie viel des zuvor Gelernten bewahrt wurde und wieder abgerufen werden kann (Bock 2001, Brashers-Krug et al. 1996). Durch diese Herangehensweise konnte herausgefunden werden, dass angeeignetes Wissen während einer Adaptationsphase sich anschließend über einen bestimmten Zeitraum hinweg festigt. Diese Festigung wird **Konsolidierung** genannt (McGaugh 2000). In dieser Phase wird während der Lernphase erworbenes Wissen weiter verarbeitet und von einem anfänglich labilen, störungsanfälligen Zustand in einen stabilen, resistenteren verändert (Robertson 2004). Die Entdeckung der Konsolidierung wurde vor über

100 Jahren durch Mueller und Pilzecker begründet, die in ihren Untersuchungen herausfanden, dass die Speicherung von neu Gelerntem durch eine sich unmittelbar anschließende, andere Lernphase behindert wurde (Mueller & Pilzecker 1900).

Nacheffekte können zudem anhand von **Transferuntersuchungen** quantifiziert werden, welche die sequentielle Adaptation an unterschiedliche Bedingungen beinhalten. In zahlreichen Studien konnte gezeigt werden, dass adaptiertes Verhalten beispielsweise auf ungeübte Zielrichtungen (Bock 1992), ungeübte Amplitudengrößen (Bock & Burghoff 1997, Goodbody & Wolpert 1998) und neue Arbeitsbereiche (Krakauer et al. 2000, Shadmehr & Moussavi 2000) übertragen werden kann. Im Zusammenhang mit der Erkenntnis von Redding & Wallace (1996), dass strategische Kontrolle aufgabenspezifisch ist, wurde die Übertragung der Adaptation auf neue Bedingungen als Hinweis auf erfolgte Rekalibrierung gedeutet.

Transferuntersuchungen dienen zudem als etablierte Methode zur Feststellung in welchem Umfang eine, durch Adaptation entstandene, interne Repräsentation des gelernten sensomotorischen Zusammenhangs zur Verfügung steht. Die Fragestellung nach der Übertragung von Gelerntem auf veränderte Bedingungen (z.B.: ungeübte Hand, neue Arbeitsbereiche) stellt einen sehr umfangreichen Forschungsbereich dar und konnte bis heute nicht abschließend geklärt werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in spezifischer Weise mit dieser komplexen Thematik. Deshalb wird dieser Forschungsbereich im folgenden Kapitel ausführlich dargestellt.

1.5 Transferuntersuchungen

In der Literatur ist die Terminologie nicht einheitlich und man spricht neben Transfer ebenfalls von Generalisierung (Kitazawa et al. 1997, Krakauer et al. 2000, Shadmehr & Moussavi 2000, Tong & Flanagan 2003). In dieser Arbeit wird einheitlich der Begriff **Transfer** verwendet.

Die Fragestellung nach den Transfermöglichkeiten von Gelerntem impliziert verschiedene Bereiche. Wie schon erwähnt beschäftigt sich ein Gebiet mit der Untersuchung des Transfers der Adaptationsleistung auf die nicht-trainierte Hand (Anguera et al. 2007, Bock et al. 2005c, Imamizu & Shimojo 1995, Kitazawa et al. 1997, Sainburg & Wang 2002, Wang & Sainburg

2003). Von den Ergebnissen des intermanuellen Transfers versucht man die Lokalisation der internen Repräsentation abzuleiten, so dass gefundener Transfer als Anhaltspunkt für eine Lokalisation in den sensomotorischen Bahnen oberhalb der Verzweigung der separaten Extremitätenkontrolle dient (Imamizu & Shimojo 1995). Die Vielfältigkeit der unterschiedlichen Untersuchungsergebnisse zeigt jedoch, dass zugrundeliegende Prozesse in wesentlich komplexerer Art und Weise abzulaufen scheinen. Teilweise war der gefundene Transfer unvollständig (Choe & Welch 1974, Sainburg & Wang 2002) oder es wurde gar kein Transfer gefunden, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass armspezifisch sensomotorische Transformationen parallel existieren können (Bock et al. 2005c).

Für diese Arbeit von zentralem Interesse ist der Transfer zwischen unterschiedlichen Arten von Diskordanzen. In diesem Zusammenhang muss zunächst auf Untersuchungen mit **gleichen Diskordanzen unterschiedlicher Polarität oder Intensität** eingegangen werden, da diese Ergebnisse als wichtige Grundlage dienen. Unterschiedliche Polarität meint, dass die Störungen einmal im Uhrzeigersinn und einmal gegen den Uhrzeigersinn agieren. Unterschiedliche Intensitäten werden bei visuellen Störungen durch Rotation um unterschiedlich große Winkel und bei mechanischen Störungen durch unterschiedlich starke Kraftfelder hervorgerufen. Um gegenseitige Einflüsse von sukzessive gelernten Störungen zu untersuchen, nutzen zahlreiche Forscher die gleiche Methodik wie Mueller und Pilzecker (1900, s.o.) (Brashers-Krug et al. 1996, Caithness et al. 2004, Krakauer et al. 2005, Krakauer et al. 1999, Miall et al. 2004, Shadmehr & Brashers-Krug 1997). Sie ließen zum Beispiel Probanden an eine visuelle Rotation gegen den Uhrzeigersinn (+R) adaptieren, gefolgt von einer Adaptation an eine visuelle Rotation im Uhrzeigersinn (-R) und nochmals +R als Retentionstest, also ergab sich die Reihenfolge +R –R +R. Das Ergebnis zeigte eine schlechtere Retention von +R verglichen mit Kontrollprobanden, die nur an +R, nicht aber an –R adaptierten (Krakauer et al. 1999, Wigmore et al. 2002). Somit schien die eingeschobene Adaptation an die entgegengesetzte Störung (-R) die Retention der ersten Adaptation und somit die Konsolidierung der Adaptation an +R deutlich zu stören. Diesen offensichtlich negativen Effekt interpretierten sie als **Interferenz**, implizierend, dass die gegensätzliche Adaptation um begrenzte Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses konkurriert (Krakauer et al. 1999, Wigmore et al. 2002). Da die Veränderung von sensomotorischen Transformationen mit einem Rechenaufwand des Nervensystems einhergeht, ist naheliegend, dass Adaptation einen erhöhten Rechenaufwand zur Folge hat (Heuer 1984). Die vermutete Interferenz würde folglich dadurch entstehen, dass die Ausbildung der jeweiligen sensomotorischen Transformation beider Adaptationsbedingungen

auf gleiche oder sich überlagernde Ressourcen angewiesen ist, so dass nicht ausreichend Ressourcen für beide Bedingungen zur Verfügung stehen.

Interferenz wird ebenfalls als negativer Transfer bezeichnet, welcher in einer weiteren Studie durch den Vergleich der aufeinanderfolgenden Adaptationsphasen an +R gefolgt von –R nachgewiesen wurde (Miall et al. 2004). In dieser Studie wurde eine schlechtere Adaptationsleistung zu Beginn der zweiten Adaptationsphase an –R, verglichen mit der ersten an +R, festgestellt. In weiteren Studien konnte ein negativer Transfer zwischen der Adaptation an entgegengesetzte visuelle Rotationen bestätigt werden (Caithness et al. 2004, Krakauer et al. 2005). Studien, welche die Adaptation an entgegengesetzt wirkende Kraftfelder untersuchten, kamen zu gleichen Ergebnissen, sowohl für geschwindigkeitsabhängige Kraftfelder (Caithness et al. 2004, Shadmehr & Brashers-Krug 1997) als auch für positionsabhängige Kraftfelder (Bays et al. 2005, Caithness et al. 2004). Alle bisherigen Studien, die einheitlich eine Verschlechterung der Retention oder Adaptationsleistung feststellten, nutzten *gleiche* Arten von Diskordanzen mit *unterschiedlicher* Polarität. Jedoch stützt sich die allgemeine Interpretation, dass die Adaptation an gleiche Diskordanzen interferiert, auf unzureichende Hinweise und bietet zunächst nur einen möglichen Erklärungsansatz. Interferenz bedeutet, dass jede Adaptation mit der Ausbildung einer dafür speziellen, internen Repräsentation einhergeht. Es wäre jedoch ebenso denkbar, dass die Adaptation an beide Diskordanzen auf einer gemeinsamen sensomotorischen Transformation basiert. Dies würde bedeuten, dass diese jeweils adäquat an die neue Bedingung angepasst wird und somit die verschlechterte Retention (Krakauer et al. 1999, Wigmore et al. 2002) beziehungsweise der negative Transfer (z.B. Caithness et al. 2004, Miall et al. 2004) erklärt werden können. Eine weitere Studie, die gleiche Diskordanzen mit unterschiedlichen Intensitäten verwendete, bestärkt diese Interpretation (Lazar & Van Laer 1968). Hier adaptierten die Probanden erst an eine kleine visuelle Störung R und im Anschluss an eine größere visuelle Störung k * R. Man fand heraus, dass die Probanden zu Beginn der zweiten Adaptationsphase einen deutlichen Vorteil gegenüber Kontrollprobanden hatten, die nur an die große Störung k * R adaptierten. Dieser Vorteil zeigt, dass die zweite Adaptationsphase anscheinend auf der vorangegangenen Adaptation aufbaute. Diese Tatsache ist ein deutliches Indiz dafür, dass eine gemeinsame interne Repräsentation der sensomotorischen Transformation für beide Störgrößen existiert, welche sich jeweils störungsadäquat graduell anpasst. Diese graduelle Anpassung konnte auch in weiteren Studien zusätzlich für Störungen mit entgegengesetzter Polarität (+R und –R) gezeigt werden (Abeele & Bock 2001b, Abeele & Bock 2001a, Bock et al. 2003). Jedoch zeigte sich dabei auch, dass

diese graduelle Verstellbarkeit nicht für jede visuelle Rotation um einen Winkel von 0° - 180° einheitlich funktioniert (Abeele & Bock 2001b, Abeele & Bock 2001a, Bock et al. 2003). Bei Störungen, die größer waren als 90° wurden die Bewegungen um 180° gespiegelt und die Anpassung verlief graduell aus der entgegengesetzten Richtung.

Bei zusammenfassender Betrachtung der Ergebnisse, ist es naheliegend, die Annahme existierender interferierender Prozesse zu verwerfen. Es wird deutlich, dass eine Voradaptation mit ungleicher Polarität (+R und –R) einen negativen Effekt auf eine weitere Adaptation hat, da sich der Ausgangspunkt für die anschließende Adaptation weiter entfernt. Im Gegensatz dazu kann von einer Voradaptation mit gleicher Polarität profitiert werden. Folglich gibt es deutliche Hinweise darauf, dass die Adaptation an gleiche Diskordanzen auf gemeinsamen Verarbeitungsmechanismen basiert. Die als Interferenz interpretierten Ergebnisse der anderen Studien sind ebenfalls kompatibel mit dieser Auslegung.

Eine nicht so ausführliche Datenlage und somit keine ausreichende Interpretationsgrundlage existiert für den Transfer zwischen **unterschiedlichen Arten von Diskordanzen**. Alle bisherigen Studien nutzten als methodische Herangehensweise die Überprüfung des Retentionseffektes nach Müller und Pilzecker (1900 s.o.). Tong et al. (2002) fanden auf diese Art und Weise heraus, dass die Adaptation an ein positionsabhängiges Kraftfeld eine deutliche Reduktion des Retentionseffektes einer vorherigen Adaptation an eine visuelle Rotation um $\alpha = 30°$ zur Folge hatte. Zu gleichen Ergebnissen kamen Bays et al. (2005), indem sie die Probanden sowohl an ein positionsabhängiges als auch an ein geschwindigkeitsabhängiges Kraftfeld adaptieren ließen. In beiden Studien wurden Störungen verwendet, die in entgegengesetzte Richtungen wirkten, also eine unterschiedliche Polarität hatten. Der jeweils negative Effekt auf die Retention der ersten Adaptation wurde wie schon in vergleichbaren Studien mit gleichen Diskordanzen (s.o.) als Interferenz interpretiert, was, wie oben erläutert, nicht eindeutig gezeigt werden konnte. Studien, die den Transfereffekt von Störungen mit gleicher Polarität untersuchen, fehlen bisher jedoch, was dazu führt, dass eine Aussage über die Art und Weise beteiligter Verarbeitungsprozesse nicht grundlegend getroffen werden kann. Handelte es sich tatsächlich um interferierende Prozesse, so wären in diesem Fall ebenfalls negative Transfereffekte zu erwarten.

Eine weitere Studie zeigte, dass die Adaptation an eine am agierenden Arm befestigte zusätzliche Masse keinen Einfluss auf die Retention einer vorherigen Adaptation an eine visuelle

Rotation hatte (Krakauer et al. 1999). Diese Forschergruppe interpretierte dieses Ergebnis damit, dass die Adaptation an die visuelle Rotation intern unabhängig von der Adaptation an die träge Masse repräsentiert ist. Auf den ersten Blick steht dieses Ergebnis zudem in Konflikt mit den zuvor dargestellten Studien. Zunächst ist anzumerken, dass sich die Störungen in den erstgenannten Studien nur entweder durch die physikalische Natur (Tong et al. 2002) oder die kinematische Kopplung zur Handbewegung (Bays et al. 2005) unterschieden. Krakauer et al. (1999) nutzten Störungen, die sowohl auf unterschiedlicher physikalischer Begebenheit (mechanisch und visuell), als auch auf unterschiedlicher kinematischer Kopplung (beschleunigungsabhängig und positionsabhängig) basierten. Naheliegend ist folglich die Vermutung, dass die Adaptation an letztere Störungen aufgrund ihres Unterschiedes in physikalischer Natur *und* Kinematik auf unterschiedlichen adaptiven Mechanismen basiert. Ein weiterer elementarer Unterschied zeigt sich bezogen auf die Wirkungsrichtung der bei Krakauer et al. (1999) verwendeten Störungen. Aus der am Arm befestigten trägen Masse resultierte keine definierte Auslenkungsrichtung im oder gegen den Uhrzeigersinn, so dass ein Effekt auf die Adaptation an die visuelle Störung im Uhrzeigersinn agierend nicht sichtbar wurde. Verbunden mit dieser Sichtweise sind diese Ergebnisse ebenfalls kompatibel mit der Existenz gemeinsamer Verarbeitungsprozesse. Jedoch sprechen sie gegen interferierende Prozesse, die um Ressourcen im Arbeitsgedächtnis konkurrieren müssen. In diesem Fall würde man hier ebenfalls einen negativen Transfereffekt erwarten.

Nach Betrachtung der oben genannten Studien bleibt festzuhalten, dass bisher lediglich negative Transfereffekte sowohl zwischen Störungen unterschiedlicher physikalischer Natur und gleicher kinematischer Kopplung (Tong et al. 2002) als auch zwischen Störungen gleicher physikalischer Natur und unterschiedlicher kinematischer Kopplung (Bays et al. 2005) gefunden werden konnten. Allerdings ist unklar, ob diese tatsächlich auf unterschiedlichen, interferierenden Prozessen basieren oder ob die Adaptation an die unterschiedlichen Arten von Störungen auf gemeinsame Verarbeitungsprozesse zurückzuführen ist. Im zweiten Fall würde bei der Adaptation an gleichgerichtete Störungen ein positiver Transfereffekt erwartet. Ob Störungen, die sich sowohl in ihrer physikalischen Natur, als auch in der kinematischen Kopplung zur Handbewegung unterscheiden unabhängig oder gemeinsam verarbeitet werden bleibt ebenfalls ungeklärt.

Vielfach zeigt sich, dass der gegenseitige Einfluss verschiedener Adaptationen nicht von der Hand zu weisen ist. Jedoch existieren ebenfalls Studien, die zeigen, dass einige definierte

Faktoren dazu führen können, dass an Störungen unabhängig voneinander adaptiert werden kann und die entsprechenden sensomotorischen Transformationen nebeneinander bestehen können (Bock et al. 2005c, Gandolfo et al. 1996, Ghahramani & Wolpert 1997, Hwang et al. 2003, Mistry & Contreras-Vidal 2004, Osu et al. 2004, Wada et al. 2003, Woolley et al. 2007). Man bezeichnet dieses Phänomen gängigerweise als kontextabhängiges Kodieren („contextual cueing“). In diesem Zusammenhang konnte unter anderem gezeigt werden, dass die rechte und linke Hand unabhängig voneinander an entgegengesetzte visuelle Störungen adaptieren können (Bock et al. 2005c). Darüber hinaus führten unterschiedliche Arbeitsbereiche (Ghahramani & Wolpert 1997, Hwang et al. 2003) und teilweise farbliches Kodieren (Osu et al. 2004, Wada et al. 2003) zu unabhängiger Adaptation.

1.6 Unterschiede und Gemeinsamkeiten verschiedener mechanischer Diskordanzen

Die Tatsache, dass unterschiedliche Methoden zur Generierung von mechanischen Diskordanzen in Form von robotischen Kräften und der Corioliskraft in Studien Verwendung finden, führt zu der Fragestellung, ob beide Störungsarten in ihrer Wirkungsweise und neuronalen Verarbeitung vergleichbar sind. Zumeist werden Corioliskraft und robotisch generierte Kräfte als vergleichbare Störungen angesehen. Lackner & DiZio (2005) bestreiten jedoch diese Analogie. Im Vergleich zur robotischen Kraft, die nur extern hervorgerufen wird, wird die Corioliskraft ebenfalls durch den agierenden Arm erwirkt (Lackner & DiZio 2005). Außerdem besteht bei robotischer Kraft ein definierter Angriffspunkt der Kraft und das kraftübertragende Objekt wird aktiv gegriffen. Im Gegensatz dazu ist bei der Corioliskraft kein direkter mechanischer Kontakt zur Übertragung der Kraft vorhanden, so dass die Mechanorezeptoren der Haut keine Informationen über die Kraftparameter liefern können (Lackner & Dizio 1994). Vielmehr wirkt die Corioliskraft auf den gesamten agierenden Arm ohne definierten Angriffspunkt, was zur Folge hat, dass die Kraft von den Probanden im Laufe der Zeit nicht mehr wahrgenommen wird. Aufgrund dieser deutlichen Unterschiede ordnen sie die Adaptation an beide Störungen unterschiedlichen Mechanismen zu. Die Adaptation an robotische Kräfte wird mit dem Erlernen der Nutzung eines Gegenstandes mit eigenen Eigenschaften in Verbindung gebracht und dieser Lernmechanismus kann mit der Anpassung an eine neue externe Bedingung nicht gleichgesetzt werden, wie es während der Adaptation an die Corioliskraft der Fall ist (Cothros et al. 2006, Lackner & DiZio 2005).

Davidson et al. (2005) überprüften, ob die Adaptation an eine robotische Kraft objektbezogen stattfindet, in dem in ihrer Studie während eines Transferexperiments die Kraft einerseits über einen Griff des genutzten Roboters auf die Hand übertragen wurde oder über Manschetten direkt auf den Ober- und Unterarm. Es konnte ein negativer Transfer zwischen beiden Bedingungen festgestellt werden, was zeigte, dass die Adaptation an beide Bedingungen nicht unabhängig voneinander war (Davidson et al. 2005). Cothros et al. (2006) untersuchten in ihrer Studie anhand einer Transferuntersuchung ebenfalls, ob die Adaptation an eine robotische Kraft eine interne Repräsentation in Bezug zu den dynamischen Eigenschaften des entsprechenden Objektes ausbildet, oder ob eine allgemeine sensomotorische Transformation angepasst wird. Sie fanden heraus, dass das adaptierte Verhalten nach einer Adaptation an eine robotische Kraft auf Armbewegungen im freien Raum in geringem Maße übertragen wurde. Die Retention der Adaptation an die robotische Kraft wurde jedoch durch die Bewegungen im freien Raum nicht beeinflusst, wohl aber durch Bewegungen mit dem Roboter ohne Kraft. Dieses Ergebnis lässt keine eindeutige Erklärung zu. Ersteres deutet auf die Rekalibrierung der internen Repräsentation der Armdynamik hin, während zweites mit der Ausbildung einer kontextspezifischen Transformation bezüglich der Objekteigenschaften einhergeht. Eine dritte Studie in diesem Zusammenhang untersuchte ebenfalls die Nacheffekte einer Adaptation an ein robotisches Kraftfeld auf Armbewegungen im freien Raum (Kluzik et al. 2008). Dazu wurden die Probanden im ersten Fall einer gängigen abrupten Störung ausgesetzt. Im zweiten Fall wurde die Störung graduell eingeführt. Die Adaptation an die abrupt eingeführte Störung wies geringere Nacheffekte auf die freien Armbewegungen auf, als die Adaptation während der graduellen Bedingung. Darüber hinaus wurde die Retention der Adaptation an das abrupt eingeführte Kraftfeld nicht durch die freien Armbewegungen beeinflusst, was für die graduelle Bedingung der Fall war. Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass die Adaptation an robotische Kräfte tatsächlich auf freie Armbewegungen generalisiert werden kann und somit eine generalisierte Veränderung der internen Repräsentation der Armdynamik auslöst. Der Unterschied zur Adaptation an die abrupt eingeführte Störung ist möglicherweise durch kognitive Strategien zu erklären. Die Adaptation an die graduell eingeführte Störungen läuft implizit ab, während die Adaptation an die abrupt eingeführte Störung durch die plötzliche hohe Abweichung bewusst erfahren wird und der Einsatz kognitiver Strategien zur Reduzierung des Fehlers intensiver ist. Eine positive Auswirkung auf den Lernerfolg durch implizites Lernen im Gegensatz zu explizitem Lernen konnte gezeigt werden (Hwang et al. 2006, Kagerer et al. 1997). Durch diese Tatsache ist der größere Effekt der graduellen Adaptation an das robotische Kraftfeld im Gegensatz zur abrupten Adaptation erklärbar.

Allgemein betrachtet liefern die oben aufgezeigten Studien Hinweise dafür, dass bei robotischer Adaptation generalisierte, interne Repräsentationen ausgebildet werden, also keine objektbezogene Adaptation stattfindet, so dass die Interpretation von Lackner & DiZio (2005) deutlich angezweifelt werden muss. Diese stützen ihre Interpretation auf die Tatsache inkongruenter zeitlicher Verläufe der Adaptation an beide Störungen. In bisherigen Studien wurden für die Adaptation an eine robotische geschwindigkeitsabhängige Kraft 200-300 Bewegungen benötigt (Ghahramani & Wolpert 1997, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994, Tong et al. 2002), während die Adaptation an Corioliskräfte innerhalb von maximal 20 Bewegungen abgeschlossen war (Bourdin & Bock 2006, Coello et al. 1996, Lackner & Dizio 1994). Die Interpretation dieser Ergebnisse ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten, da zwischen diesen Studien deutliche Unterschiede bestehen, die ebenfalls als Erklärung für unterschiedliche Zeitverläufe in Erwägung gezogen werden müssen. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der präsentierten Anzahl möglicher Zielpositionen. Studien in denen die Corioliskraft Verwendung fand, bedienten sich nur einer Zielposition (Coello et al. 1996, Lackner & Dizio 1994) ausgehend von einer definierten Startposition. Im Gegensatz dazu umfassen Studien mit robotischen Kräften gängigerweise Bewegungen zu acht möglichen Zielpositionen, die gleichmäßig auf einer Kreisbahn mit zentraler Startposition angeordnet sind und somit einen Bewegungsbereich von 360° abdecken (Bays et al. 2005, Pipereit et al. 2006, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994). Bei der Adaptation an eine visuelle Rotation konnte tatsächlich gezeigt werden, dass die Adaptation an acht kreisförmig angeordnete Zielpunkte langsamer verläuft als nur an einen Zielpunkt (Krakauer et al. 2000). Darüber hinaus nutzten Franklin et al. (2007) während einer Adaptation an ein robotisches Kraftfeld nur ein Ziel was zur Folge hatte, dass die Probanden nach weniger als 20 Bewegungen adaptiert waren. Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Anzahl präsentierter Zielpositionen einen wesentlichen Einfluss auf die Adaptationsgeschwindigkeit hat. Anhand weiterer Studien wird jedoch deutlich, dass dieser Zusammenhang auf einem komplexeren System basiert. Es konnte kein Unterschied für ein, drei und sieben Ziele gefunden werden, wenn diese auf einem Kreisbogen von 60° angeordnet waren (Bourdin & Bock 2006). Daher kann man schlussfolgern, dass vor allem die Größe des Arbeitsbereiches einen Einfluss auf die Adaptationsgeschwindigkeit hat, was eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Intensität der Ergebnisse für robotisch generierte Kraftfelder (Ghahramani & Wolpert 1997, Shadmehr & Brashers-Krug 1997, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994) und Corioliskräfte (Lackner & Dizio 1994) sein kann.

Darüber hinaus ist als möglicher Einflussfaktor auf unterschiedliche Adaptationsgeschwindigkeiten die Intensität der wirkenden Kräfte zu nennen. Unterschiedlich starke Kräfte führen initial zu unterschiedlich großer Auslenkung. Die Konsequenz könnten voneinander abweichende Zeitverläufe während der Adaptation sein. Hinweise auf diesen Zusammenhang liefern die Studien von Lai et al. (2003) und Takahashi et al. (2001). Lai et al. (2003) fanden bei einer randomisierten Generierung unterschiedlicher Kraftintensitäten (1,2 N bis 7,3 N) einer positionsabhängigen Kraft einen Zusammenhang zwischen Kraftstärke und Größe des initialen Fehlerwinkels. Außerdem waren die Probanden nach 250 Bewegungen an die beiden kleinsten Intensitäten (1,2 N und 2,4 N) vollständig adaptiert, während die Adaptation an die stärkeren Diskordanzen unvollständig war. Diese Ergebnisse können nur als ein erster Hinweis für einen Zusammenhang dienen, da infolge des gewählten Paradigmas Wechselwirkungen zwischen den Adaptationen an die einzelnen Intensitäten entstanden sein können. Eine Korrelation zwischen initialem Zeigefehler und Kraftstärke konnten auch Takahashi et al. (2001) mit einem ähnlichen Versuchsparadigma feststellen. Da in Studien zur Adaptation an Corioliskräfte die initiale Auslenkung deutlich kleiner ist als die in Studien zur Adaptation an robotische Kräfte, liegt die Vermutung nahe, dass durch die Anpassung der verwendeten Kräfte ähnliche Zeitverläufe der Adaptation erreicht werden könnten. Allgemein betrachtet wird deutlich, dass die Tatsache inkongruenter zeitlicher Adaptationsverläufe während der Adaptation an robotische Kräfte und Corioliskräfte als Interpretationsgrundlage für die Existenz unterschiedlicher Adaptationsmechanismen wissenschaftlich unzureichend begründet ist. Bislang liegen zur Fragestellung nach gemeinsamen oder unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen für die Adaptation an robotische Kräfte und die Corioliskraft keine eindeutigen Ergebnisse vor.

1.7 Zur Relevanz der visuellen und propriozeptiven Rückmeldung

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, sind sensorische Rückmeldungen für motorische Lernprozesse unabdingbar. Sensorische Informationen geben Hinweise über die Position des Arms. Dazu werden die Informationen aus verschiedenen sensorischen Quellen integriert und transformiert, so dass eine adäquate Handlung entstehen kann. Die wohl wichtigsten Informationen erhalten wir aus visueller und propriozeptiver Rückmeldung (Graziano 1999, van Beers et al. 1998). Die propriozeptive Rückmeldung umfasst ein System verschiedener Rezeptoren, die die eigene Körperwahrnehmung ermöglichen. Diese Rezeptoren befinden sich in Muskelspin-

deln, Sehnen (Golgi-Sehnenorgane), Gelenken und der Haut und sind verantwortlich für Kraft-, Positions- und Bewegungssinn. Ein besonders hoher Einfluss auf Kontrolle und Wahrnehmung von Körperorientierung, -konfiguration und Bewegungsausführung wird in diesem Zusammenhang den Muskelspindeln zugesprochen (Lackner & DiZio 2000).

Kommt es zu einer Diskordanz, so dienen die sensorischen Rückmeldungen zur Feststellung von fehlerhaften Bewegungen und bilden die Grundlage für unmittelbare oder mittelbare Fehlerkorrekturen. Allerdings ist bislang unklar, welche der Informationen, die wir über unsere visuellen und propriozeptiven Sinneskanäle erhalten, notwendig sind, um an eine Diskordanz zu adaptieren. Um dieser Fragestellung nachzugehen, liegt es nahe, eine der Sinnesmodalitäten während einer Adaptationsaufgabe auszuschalten oder zu stören, um die Relevanz dieser Informationsquelle während der Adaptation zu überprüfen. Das Ausschalten der visuellen Rückmeldung während einer Lernaufgabe stellt keine große Schwierigkeit dar und wurde schon in mehreren Studien praktiziert (Bernier et al. 2005, Franklin et al. 2007, Osu et al. 2004, Scheidt et al. 2005, Tong et al. 2002). Im Gegensatz dazu gestaltet sich das Ausschalten der propriozeptiven Rückmeldung als wesentlich schwieriger, da zahlreiche Rezeptoren als Informationsquellen zur Verfügung stehen (s.o.).

Eine Methode, die Relevanz der Propriozeption auf das motorische Lernen zu erforschen, stellt die Durchführung von Adaptationsexperimenten mit deafferentierten Patienten dar (Bard et al. 1995, Guédon et al. 1998, Ingram et al. 2000, Lajoie et al. 1992). Diese Studien kommen zu konträren Ergebnissen. Teilweise konnten deafferentierte Probanden besser adaptieren als gesunde Kontrollprobanden (Lajoie et al. 1992), zeigten ein vergleichbares Adaptationsverhalten (Bard et al. 1995, Ingram et al. 2000) oder waren gar nicht in der Lage zu adaptieren (Bard et al. 1995, Guédon et al. 1998). Auch wenn deafferentierte Patienten dadurch gekennzeichnet sind, dass ihre Afferenzen nicht aber ihre Efferenzen funktionslos sind (Gentilucci et al. 1994), sind die aus diesem Grund scheinbar optimalen Voraussetzungen zur Erforschung der Relevanz der Propriozeption kritisch zu hinterfragen. Zum einen ist das Probandenkollektiv sehr begrenzt und zum anderen haben diese im Laufe des alltäglichen Lebens Strategien entwickelt den Verlust der Propriozeption zu kompensieren. Zudem sind diese Probanden nach mehrmaligen Teilnahmen an unterschiedlichen Versuchen nicht mehr naiv. Das hat zur Folge, dass die Übertragung der Ergebnisse auf gesunde Probanden sehr fraglich ist und erklärt möglicherweise zudem unterschiedliche Ergebnisse.

Um die Propriozeption auszuschalten, setzten weitere Studien die Hypnose als Methode ein (Wallace & Garret 1973) oder sie bedienten sich anästhesistischen Blockern (Gandevia et al. 1993). Jedoch ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studien ebenfalls zu hinterfragen, da durch Hypnose zusätzlich die kognitive und zentralnervöse Funktionsfähigkeit beeinträchtigt werden. Auch der Einsatz anästhesistischer Blocker eignet sich nicht als gute Methode, da diese spezifisch auf bestimmte Rezeptoren wirken und somit ebenfalls Efferenzen beeinträchtigen können. Zudem sind sie unangenehm für die Versuchperson (Bock et al. 2007). Darüber hinaus wurde transkranielle Magnetstimulation (TMS) als Methode zur Herabsetzung der Propriozeption verwendet (Balslev et al. 2004). Bei TMS handelt es sich um eine nichtinvasive Methode bei der mit Hilfe starker Magnetfelder, die über eine Magnetspule auf das Gehirn einwirken, Teilbereiche des Gehirns aktiviert oder gehemmt werden können. Zur Herabsetzung der Propriozeption wurde über den anterioren parietalen Kortex ein Magnetfeld auf die vermutete Lokalisation der Verarbeitung der propriozeptiven Signale aus der Hand appliziert. Jedoch ist auch diese Methode kritisch zu betrachten, da nicht genau definierbar ist, welche zentralnervösen Bereiche tatsächlich erreicht werden.

Eine durchaus effektive und einfacher durchführbare Methode zur Beeinflussung der Propriozeption bietet im Gegensatz zu den zuvor genannten Methoden der Einsatz von Vibration. Sie wird aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit eingesetzt. Anhand zahlreicher Studien fand man heraus, dass die Vibration eines Muskels mit einer Frequenz zwischen 80 und 120 Hz die Aktivität der dazugehörigen Muskelspindelrezeptoren steigert. Dies führt zu einer Erregung der Motoneuronen innerhalb des vibrierten Muskels und einer Hemmung der antagonistischen Motoneuronen (Matthews 1972). Es kommt zu einer reflektorischen Kontraktion des vibrierten Muskels. Wird die Kontraktion des vibrierten Muskels durch Fixation verhindert, kommt es zu einer Bewegungsillusion in Richtung des vibrierten Muskels (Goodwin et al. 1972, Naito et al. 2002, Roll & Vedel 1982). Zahlreiche Studien machten sich diesen sogenannten „tonic vibration effect“ zu Nutze, um den Einfluss propriozeptiver Informationen auf das menschliche Bewegungsverhalten und den Positionssinn zu untersuchen (Bernier et al. 2007, Lackner 1984, Lackner & Taublieb 1984, Verschueren et al. 1999). Als ein weiterer Effekt der Vibration wurde eine Unempfindlichkeit der Muskelspindeln festgestellt (Roll et al. 1989). So kommt es beispielweise bei Armbewegungen unter Vibration ohne visuelle Rückmeldung zu Bewegungsfehlern in Folge eines nicht mehr korrekt funktionierenden Positionssinns (Inglis & Frank 1990, Vedel & Roll 1983). Darüber hinaus konnte in einer weiteren Studie herausgefunden werden, dass die gleichzeitige Vibration von Agonist und Antagonist

bei identischer Frequenz dazu führt, dass die Bewegungsillusion aufgehoben wird, die Unempfindlichkeit der Spindelrezeptoren gegenüber physiologischen Reizen jedoch bestehen bleibt (Gilhodes et al. 1986). Auch Calvin-Figuiere et al. (1999) konnten in ihrer Studie feststellen, dass die gleichzeitige Vibration antagonistischer Muskulatur weder zu einer Bewegungsillusion noch zu motorischer Aktivität führt. Die Einschränkung von Positions- und Kraftsinn in diesem Zusammenhang konnte von mehreren Studien bestätigt werden (Bock et al. 2007, Bock et al. 2005b, Pipereit et al. 2006). Dieses Phänomen machten sich Bock et al. (2005b) zu Nutze, um die Methode der Agonist-Antagonist Vibration zur Untersuchung des Einflusses der Propriozeption auf die sensomotorische Adaptation zu etablieren.

Im Zusammenhang mit der Fragestellung nach der Relevanz verschiedener Sinnesmodalitäten bei sensomotorischer Adaptation ist es wichtig, zwischen visuellen und mechanischen Diskordanzen zu differenzieren. Wird eine visuelle Diskordanz eingeführt, so kommt es zu einer Diskrepanz zwischen dem, was wir sehen und dem, was wir fühlen. Bei einer Zeigebewegung repräsentiert die visuelle Rückmeldung folglich eine andere Position als die tatsächliche Handposition. Es gibt Vermutungen, die darauf hinweisen, dass während einer sensomotorischen Adaptation an eine solche visuelle Diskrepanz die propriozeptive Rückmeldung unterdrückt wird und die visuelle Rückmeldung dominiert. So konnte herausgefunden werden, dass während der Adaptation an eine visuelle Rotation die Muskelspindelaktivität herabgesetzt wird. Möglicherweise dient dies als Strategie, um den Konflikt zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung zu unterdrücken (Jones et al. 2001). Während der Adaptation passt sich daraufhin die Transformation zwischen propriozeptiven Koordinaten und visuellen Koordinaten an (Redding et al. 2005). Einige Autoren behaupten, diese Diskrepanz zwischen sensorischen Quellen sei entscheidend, um überhaupt eine Adaptation hervorzurufen (Guédon et al. 1998, Redding & Wallace 2002). Dabei stützten sich beispielsweise Guédon et al. (1998) auf das Ergebnis ihrer Studie mit einem deafferentierten Patienten, der im Anschluss an eine Adaptationsphase keine Nacheffekte zeigte. Dies zeigte deutlich, dass keine Adaptation statt gefunden hatte. Bei einer mechanischen Störung, beispielsweise hervorgerufen durch ein robotisches Manipulandum, entsteht eine solche Diskrepanz zwischen zwei Sinneseindrücken, wie sie oben beschrieben wurde, nicht. Vielmehr handelt es sich in diesem Zusammenhang um eine Diskrepanz zwischen intendierter und tatsächlicher Bewegung, während Propriozeption und visuelle Rückmeldung übereinstimmen. Nach der Adaptationsphase an eine mechanische Störungen konnten ebenfalls Nacheffekte gefunden werden (Pipereit et al. 2006). Dies bedeutet, dass eine Rekalibrierung stattgefunden haben muss. Es liegt in diesem

Zusammenhang nahe, zu vermuten, dass eine Rekalibrierung innerhalb der propriozeptiven Sinneskanäle stattfindet. Der Kraftaufwand, der aufgebracht werden muss, um die gewünschte, zielgerichtete Bewegung durchzuführen, steht anschließend in neuem Zusammenhang mit der entsprechenden Bewegung beziehungsweise Positionierung des Arms.

Demzufolge nachvollziehbar konnte festgestellt werden, dass die visuelle Sinnesmodalität keinen Einfluss auf die Adaptation an mechanische Störungen hat (Franklin et al. 2007, Osu et al. 2004, Scheidt et al. 2005, Tong et al. 2002). Die Probanden adaptierten in den entsprechenden Studien ohne visuelle Rückmeldung sowohl an mechanische, geschwindigkeitsabhängige Diskordanzen (Franklin et al. 2007, Osu et al. 2004, Scheidt et al. 2005) als auch an mechanische, positionsabhängige Diskordanzen (Franklin et al. 2007, Tong et al. 2002) genauso gut wie mit visueller Rückmeldung.

Im Gegensatz dazu konnte die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung für die Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung nachwiesen werden (Pipereit et al. 2006). Diese Forschergruppe fand in ihrer Studie eine Verschlechterung der Adaptationsleistung sowie einen schlechteren Nacheffekt für eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung, wenn die Muskulatur des Handgelenks mit der Agonist-Antagonist Vibration stimuliert wurde. Dieses Ergebnis ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass die Propriozeption eine relevante Informationsquelle für die Adaptation an diese Störungsart ist. Der schlechtere Nacheffekt unter Einfluss der Vibration lässt darüber hinaus vermuten, dass propriozeptive Signale bei der Rekalibrierung involviert sind (Pipereit et al. 2006). In einer weiteren Studie konnte gezeigt werden, dass bei der Adaptation an eine mechanische Störung die Augenbewegungen nur bei intakter Propriozeption adaptierten, nicht aber unter Vibration des agierenden Arms (Vercher et al. 2003).

Neben dem Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung untersuchten Pipereit et al. (2006) ebenfalls den Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an eine visuelle Rotation. Sie fanden heraus, dass Probanden, die der Agonist-Antagonist Vibration ausgesetzt wurden genauso gut an die Rotation adaptierten wie nicht vibrierte Kontrollprobanden. Folglich ist die Präsens propriozeptiver Rückmeldung für die Adaptation an die visuelle Rotation nicht notwendig. Dieses Ergebnis bestärkt die oben erläuterte Vermutung, dass die Propriozeption während der Adaptation an

eine visuelle Rückmeldung unterdrückt wird, um die Anpassung an die Diskordanz zu ermöglichen.

Der Unterschied in der Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung auf eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung und eine visuelle Rotation ist aufgrund der oben beschrieben Charakteristika der jeweiligen Störungen durchaus naheliegend. Demzufolge kann vermutet werden, dass die physikalische Natur einer Störung für die Notwendigkeit propriozeptiver Informationen entscheidend ist. Allerdings kann diese Vermutung als nicht ausreichend wissenschaftlich begründet angesehen werden. Zum einen basiert diese Erkenntnis auf den Ergebnissen nur einer Studie und zum anderen unterscheiden sich die Störungsarten in dieser Studie neben der physikalischen Natur in einem weiteren Aspekt. Auch die kinematische Kopplung zu Handbewegung war in der Studie von Pipereit et al. (2006) bei der mechanischen, geschwindigkeitsabhängigen Störung und der visuellen Rotation eine andere.
Eine Unabhängigkeit der Notwendigkeit bestimmter Sinnesmodalitäten von der kinematischen Kopplung zur Handbewegung wurde noch nicht gezeigt und muss ebenfalls als Einflussfaktor in Betracht gezogen werden. Cordo et al. (1994) fanden heraus, dass die Enkodierung von Geschwindigkeit über Muskelspindeln geregelt wird. Daraus resultierend könnte die Tatsache, dass die mechanische Störung geschwindigkeitsabhängig war ebenfalls zur Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung geführt haben. Somit wäre nicht oder nicht alleinig die physikalische Natur der Störung verantwortlich für die Gewichtung der propriozeptiven Signale, sondern die Kinematik. Anhand der bisher einzigen Studie von Pipereit et al. (2006) zu dieser Thematik kann dieser Sachverhalt nicht geklärt werden.

1.8 Zielsetzung der Arbeit

Der Forschungsbereich der sensomotorischen Adaptation ist im Laufe der Zeit umfangreicher geworden. Mittlerweile haben sich zahlreiche Teilbereiche der Adaptationsforschung herauskristallisiert, die sich mit speziellen Thematiken, basierend auf zahlreichen methodischen Ansätzen, auseinandersetzen. Ein Bereich mit dem sich ebenfalls die vorliegende Arbeit beschäftigt, zielt darauf ab, Erkenntnisse über neuronale Verarbeitungsmechanismen während motorischer Lernprozesse unter verschiedenen Aufgabenbedingungen zu gewinnen.

Dabei steht in dieser Arbeit die Fragestellung im Vordergrund, ob bei der sensomotorischen Adaptation an unterschiedliche Störungsarten gemeinsame oder spezialisierte adaptive Mechanismen, die möglicherweise interferieren, beteiligt sind. Ein zusätzlicher Schwerpunkt wird hier auf die Untersuchung des Einflusses der propriozeptiven Sinnesmodalität bei der Adaptation gelegt. In mehreren Studien konnte schon gezeigt werden, dass die visuelle Sinnesmodalität keinen Einfluss auf die Adaptation an mechanische Störungen hat. Somit wird der Einfluss dieser Informationsquelle auf die Adaptation nicht explizit untersucht. Unbekannt ist jedoch sowohl für die visuelle, als auch die propriozeptive Rückmeldung, inwiefern diese einen Einfluss auf mögliche Transfereffekte zwischen einzelnen Störungen haben. Deshalb wird darüber hinaus geprüft, ob Transfereffekte von der Präsens einer gemeinsamen Sinnesmodalität während beiden Adaptationsphasen abhängig sind. Anhand verschiedener Versuchsparadigmen bei Zielzeigebewegungen werden die beschriebenen Zielsetzungen in sieben Experimenten systematisch behandelt.

Die Experimente 1-3 untersuchen den Transfer zwischen Störungen, die sich entweder in ihrer physikalischen Beschaffenheit (visuell oder mechanisch), in ihrer kinematischen Kopplung zur Handbewegung (geschwindigkeitsabhängig oder positionsabhängig) oder beidem unterscheiden. Bisherige bezugnehmende Erkenntnisse basieren auf wenigen Studien deren Ergebnisse, wie in Kapitel 1.5 dargestellt, nicht eindeutig interpretierbar sind. Sowohl interferierende als auch gemeinsame Verarbeitungsprozesse sind nicht auszuschließen, da Störungen mit entgegengesetzter Wirkrichtung (unterschiedlicher Polarität), nicht aber mit gleicher Polarität verwendet wurden.

➔ Indem bei der sequentiellen Adaptation sowohl Störungen mit gleicher Polarität (beide im Uhrzeigersinn agierend) als auch unterschiedlicher Polarität verwendet werden, sollen eindeutige Schlüsse gezogen werden können. Denn durch positive Transfereffekte im ersten Fall könnten interferierende Adaptationsprozesse ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus wird in den Experimenten 4 und 5 die Adaptation an geschwindigkeitsabhängige robotische Kräfte und die Corioliskraft bezüglich gemeinsamer oder spezialisierter Verarbeitungsprozesse gesondert untersucht. Für die Adaptation an diese Störungen postulieren Lackner & DiZio (2005) unterschiedliche Adaptationsmechanismen. Im Fall der robotischen Kraft wird eine objektbezogene Adaptation vermutet, während die Corioliskraft eine Adapta-

tion an externe Bedingungen hervorrufen soll. Dabei stehen zum einen unterschiedliche Zeitgänge der Adaptation an beide Störungen sowie unterschiedliche Angriffspunkte der Kraft begründend im Vordergrund (Kapitel 1.6). Diese Tatsachen können jedoch nicht als ausreichende Hinweise auf unterschiedliche Adaptationsmechanismen angesehen werden.

➔ Durch die Adaptation an robotische Kräfte unterschiedlicher Intensität sowie mit unterschiedlichen Angriffspunkten der Kraft werden der Zusammenhang zwischen Zeitgang der Adaptation und Kraftintensität sowie Angriffspunkt der Kraft untersucht (Exp. 4). Die Adaptationsmechanismen werden anhand eines Transferexperiments zwischen beiden Störungsarten analysiert (Exp. 5).

Aufbauend auf die Erkenntnisse von Pipereit et al. (2006) wird in zwei weiteren Experimenten der Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an unterschiedliche Störungen weiter untersucht. Anhand der Agonist-Antagonist Vibration wurden bisher nur eingelenkige Bewegungen aus dem Handgelenk untersucht. Darüber hinaus ist bisher unklar, ob die physikalische Natur einer Störung oder die kinematische Kopplung zur Handbewegung entscheidend ist für die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung bei der Adaptation an verschiedene Störungen.

➔ Durch eine erweiterte Methode der Agonist-Antagonist Vibration wird die Propriozeption bei mehrgelenkigen Bewegungen aus dem gesamten Arm herabgesetzt. Es wird untersucht, ob die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung bei der Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung repliziert werden kann. Zusätzlich wird der Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an eine visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung und eine mechanische, positionsabhängige Störung analysiert.

Inwiefern Transfereffekte zwischen unterschiedlichen Störungsarten auf der Verfügbarkeit oder der Nutzung der gleichen Sinnesmodalität basieren ist bisher unbekannt und soll abschließend in Experiment 7 untersucht werden.

➔ Die einwandfreie Nutzung der gleichen Sinnesmodalität bei der sequentiellen Adaptation an eine visuelle positionsabhängige Störung und eine mechanische geschwindigkeitsabhängige Störung wird durch Ausschalten der visuellen Rückmeldung oder durch Vibration während dieses Transferexperiments ausgeschlossen.

Zusammenfassend ergeben sich für diese Arbeit folgende übergeordnete Fragestellungen:

1. Basiert die Adaptation an Störungen, die sich entweder in ihrer physikalischen Natur, ihrer kinematischen Kopplung zu Handbewegung oder beidem unterscheiden auf gemeinsamen oder unterschiedlichen, interferierenden Adaptationsmechanismen?

2. Ist die Adaptation an robotische Kräfte und Corioliskräfte unabhängig voneinander oder basiert sie auf gemeinsamen adaptiven Mechanismen?

3. Ist die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung bei der Adaptation an unterschiedliche Arten von Störungen abhängig von deren physikalischer Natur oder deren kinematischer Kopplung zur Handbewegung?

4. Basiert die mögliche Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen auf der Nutzung gleicher Sinnesmodalitäten?

2 Experimente

2.1 Allgemeine Methodik

Im Ganzen umfasste diese Arbeit 7 Experimente, in denen die Probanden Zielzeigebewegungen unter verschiedenen Bedingungen durchführten:

- Bei den Experimenten 1-3 handelte es sich um Transferexperimente (siehe Einleitung, S. 8), die hauptsächlich der Untersuchung möglicher gemeinsamer Verarbeitungsprozesse der Adaptation an verschiedene Diskordanzen dienten.
- Experimente 4 und 5 beleuchteten Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Adaptation an ein Kraftfeld hervorgerufen durch Corioliskraft und ein an Kraftfeld hervorgerufen durch ein robotisches Manipulandum.
- Experiment 6a/b hatte die Untersuchung der Rolle der Propriozeption bei der Adaptation sowohl an Kraftfelder als auch an eine visuelle dynamische Diskordanz zum Ziel.
- Experiment 7 hatte als weiteres Transferexperiment die Hauptfragestellung, ob der Transfer zwischen visuellen und mechanischen Diskordanzen abhängig ist vom Vorhandensein der propriozeptiven beziehungsweise visuellen Sinnesmodalität.

2.1.1 Versuchspersonen

An allen Experimenten nahmen insgesamt 296 Probanden teil. Alle Probanden waren naiv bezüglich der durchgeführten Aufgaben und haben folglich nur jeweils einmal an einem der 7 Experimente teilgenommen. Zum größten Teil bestand das Probandengut aus Sportstudenten der Deutschen Sporthochschule Köln. Bei den Probanden für Experiment 5 handelte es sich um Studenten und Mitarbeiter des „Institut du Science du Sport“ der Université de la Mediterannée in Marseille. Die genaue Anzahl, das Alter und die Geschlechterverteilung innerhalb der einzelnen Experimente sind Tabelle 1 zu entnehmen. Es gab keinerlei gesundheitliche Einschränkungen, welche die sensomotorische Leistungsfähigkeit behindert hätten. Vorhandene Sehschwächen waren entsprechend korrigiert. Vor der Durchführung des jeweiligen Experiments wurden die Probanden über den Verlauf aufgeklärt und unterzeichneten eine Ein-

verständniserklärung. Die Teilnahme war freiwillig und der Versuch konnte jederzeit sowohl durch den Probanden, als auch durch den Versuchsleiter abgebrochen werden. Die durchgeführten Experimente wurden jeweils zuvor von der Ethikkommission der Deutschen Sporthochschule Köln, sowie von der Ethikkommission der Université de la Mediterannée in Marseille (Exp. 5) genehmigt. Für die Teilnahme an den Experimenten 4 und 6 wurde pro Proband eine Aufwandsentschädigung von 10 € (Exp. 4) beziehungsweise 12€ (Exp. 6) gezahlt.

Tab. 1: Anzahl, Geschlechterverteilung und mittleres Alter ± Standardabweichung der Probanden der Exp. 1-7.

	Exp	n	männlich	weiblich	Alter
Transfer	1	60	32	28	22,9 ± 2,3
	2	70	29	41	23,6 ± 2,9
	3	40	20	20	22,9 ± 2,1
Coriolis	4	32	19	13	22,1 ± 1,8
	5	14	11	3	26,1 ± 2,0
Vibration	6a	28	13	15	23,7 ± 3,5
	6b	24	12	12	24,1 ± 2,3
	7	32	15	17	24,5 ± 3,7

1-3: Transferexperimente, 4, 5: Experimente zur Unterscheidung von unterschiedlich applizierten Kräften, 6, 7: Experimente zur Überprüfung des Einflusses der Propriozeption.

2.1.2 Apparatur

Eine Ausnahme bezüglich der allgemeinen Apparatur und des Versuchsdesigns stellt Experiment 5 dar. Folgende Beschreibung schließt dieses Experiment deshalb aus (siehe dazu spezielle Methodik Exp. 5). In allen anderen Experimenten hatten die Probanden die Aufgabe so schnell und so genau wie möglich Zeigebewegungen mit dem dominanten Arm von einem Startpunkt zu verschiedenen Zielpositionen auszuführen. Währenddessen saßen die Probanden auf einem höhenverstellbaren Stuhl vor einer horizontalen Arbeitsfläche (Abb. 1). Oberhalb war ein Computermonitor befestigt, dessen Bild auf eine darunter befestigte undurchsichtige Plexiglasscheibe projiziert wurde. Monitor, Plexiglasscheibe und Arbeitsfläche waren parallel zueinander angebracht und hatten jeweils den gleichen Abstand von einander. Diese

Positionierung erlaubte die Darbietung von Startpunkt und Zielen (Monitorbild) in der Ebene der Arbeitsfläche. Die Ziele waren kreisförmig und in gleichem Abstand zueinander (45° Abstand gemessen von der Startposition) positioniert, so dass ein Handlungsfeld von 360° abgedeckt wurde (Abb. 2). Startpunkt und Ziele leuchteten alternierend auf. Es handelte sich um acht Ziele (bzw. 16 Ziele in Exp. 7), die in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden (Abb. 2).

Die undurchsichtige Plexiglasscheibe, so wie ein angebrachter Sichtschutz verhinderten die direkte visuelle Kontrolle des agierenden Arms (Effektor) auf der Arbeitsfläche. Eine indirekte visuelle Rückmeldung über die jeweilige Position des Effektors wurde über einen ebenfalls über das virtuelle Monitorabbild dargebotenen Cursor gewährleistet. Gleichzeitig wurde die Position des Effektors registriert. Dies geschah je nach Experiment über unterschiedliche Geräte:

- Exp. 1 und Exp. 6b: Hier wurde ein Digitalisiertablett (SummaSketch® III Professional, Summagraphics) verwendet auf dem die Zeigebewegungen mit Hilfe eines dazugehörigen Stifts aufgenommen wurden (Abb. 1a) (siehe auch Kapitel 2.2.1, S. 35)
- Exp. 2, Exp. 3, Exp. 4, Exp. 5, Exp. 6a, Exp. 7: Hier war der agierende Arm mit dem Arm eines robotischen Manipulandums (PHANTOM^{TM} Premium Haptic Device 1.5A, Sensable Technologies. Inc. oder PHANTOM^{TM} Premium Haptic Device 3.0, Sensable Technologies. Inc.) verbunden welches die Effektorposition im zweidimensionalen Raum erfasste (Abb. 2b-d) (siehe auch in Spezieller Methodik der entsprechenden Exprimente).

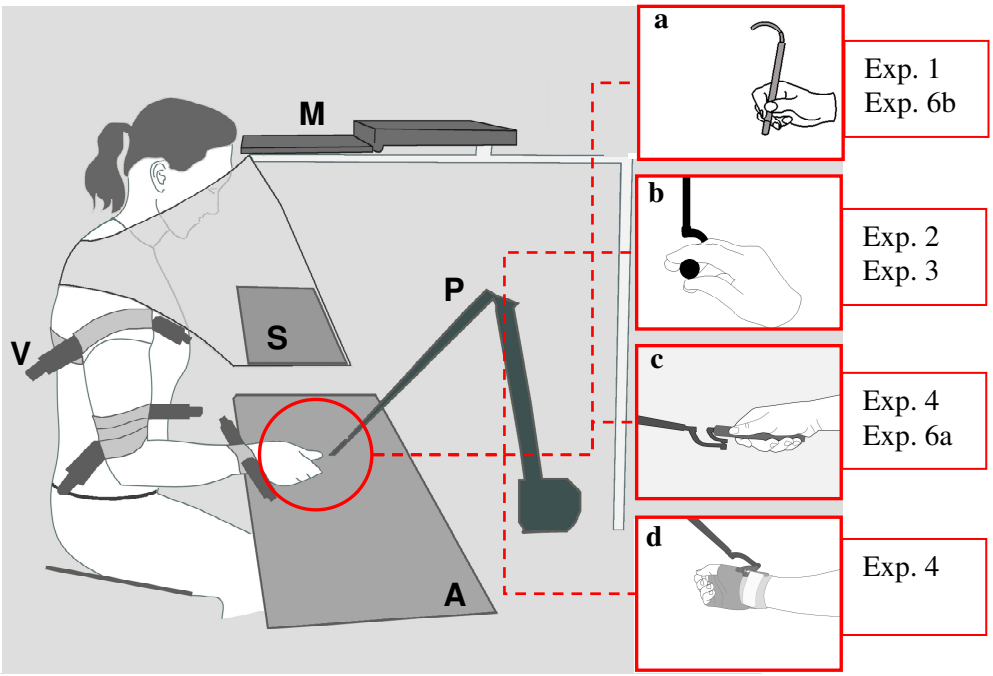

Abb. 1: Versuchaufbau aller Experimente (außer Exp. 5). Das Abbild des Monitors (M) wurde auf den undurchsichtigen Spiegel (S) projiziert, so dass es in der Ebene der Arbeitsfläche (A) erschien. Je nach Experiment arbeiteten die Probanden mit einem Stift angeschlossen an ein Digitalisiertablett dargestellt in **a** (Exp. 1, 6b), mit der Stifthaltung dargestellt in **b** (Exp. 2, 3), dem stiftähnlichen Ende des Phantoms (P) mit der Stifthaltung dargestellt in **c** (Exp. 4, 6a) oder am Handgelenk verbunden mit dem Phantom durch eine Manschette dargestellt in **d** (Exp. 4).

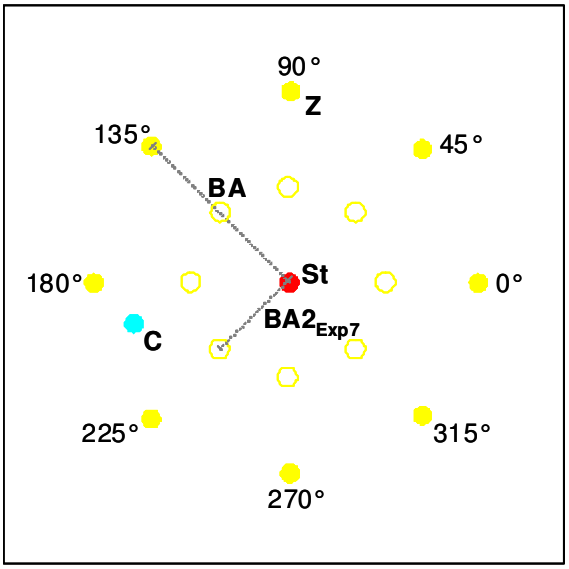

Abb. 2: Monitorabbild aller Experimente (außer Exp. 1 und 5). Dargestellt sind Startpunkt (St), alle möglichen Zielpositionen (Z), der Cursor (C) und die Bewegungsamplitude (BA), die je nach Experiment in ihrer Länge variierte. Die zweite Bewegungsamplitude (BA2) existierte ausschließlich in Exp. 7, so dass 16 Ziele dargeboten wurden.

2.1.3 Versuchsdesign

Alle Experimente (außer Exp. 5) wurden in Episoden von 25 oder 30 sek Dauer unterteilt. Diese Dauer entsprach jeweils einer Anzahl von 7 - 25 Bewegungen. Nach einer Gewöhnungsphase von meist 3 Episoden Dauer mit valider visueller Rückmeldung (Effektor und Cursorposition stimmten überein) folgte eine Adaptationsphase. Währenddessen wurden die Probanden entweder einer visuellen oder einer mechanischen Störung ausgesetzt (siehe Einleitung Kapitel 1.3). Weiterhin war die Störung jeweils entweder positionsabhängig oder geschwindigkeitsabhängig, so dass folgende vier Störungen verwendet wurden:

- **visuelle, positionsabhängige Störung (V_{pos}):** hierbei handelte es sich um eine Rotation der visuellen Rückmeldung im (V^-_{pos}) oder gegen (V^+_{pos}) den Uhrzeigersinn um einen definierten Winkel α, der je nach Experiment entweder 30° oder 60° betrug.
- **visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung (V_{geschw}):** in diesem Fall wurde die visuelle Rückmeldung in Bezug auf die tatsächliche Handposition orthogonal zur momentanen Bewegungsrichtung der Hand im (V^-_{geschw}) oder gegen (V^+_{geschw}) den Uhrzeigersinn ausgelenkt. Die Auslenkungsamplitude war abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit, so dass gilt:

  *orthogonale Auslenkung [mm] = c * Bewegungsgeschwindigkeit [mm/s},*

  wobei c als Konstante je nach Experiment variierte.
- **mechanische, positionsabhängige Störung (F_{pos}):** hierbei wird der Effektor durch ein generiertes Kraftfeld im (F^-_{pos}) oder gegen (F^+_{pos}) den Uhrzeigersinn orthogonal zur momentanen Bewegungsrichtung ausgelenkt. Dabei stand die Auslenkungsamplitude in Relation zur Distanz ausgehend vom Startpunkt, so dass gilt:

  $F_{pos}[N] = c * radiale\ Distanz\ vom\ Startpunkt\ [mm],$

  wobei c als Konstante je nach Experiment variierte.
- **mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung (F_{geschw}):** hierbei wird der Effektor durch ein generiertes Kraftfeld ebenfalls im (F^-_{geschw}) oder gegen (F^+_{geschw}) den Uhrzeigersinn orthogonal zur momentanen Bewegungsrichtung ausgelenkt. Dabei stand die Auslenkungsamplitude in Relation zur jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeit, so dass gilt:

  $F_{geschw}[N] = c * v[mm/s],$

  wobei v die Bewegungsgeschwindigkeit war und c als Konstante je nach Experiment variierte.

Die Länge der Adaptationsphase sowie die Störungsart variierten je nach Experiment. Bei Transferexperimenten folgte nach der ersten Adaptationsphase eine weitere Adaptationsphase mit einer anderen Störung als während der ersten Phase. Bei den anderen Experimenten schloss sich der ersten Adaptationsphase eine Deadaptationsphase an, bei der die Rückmeldung wie in der Grundbedingung der tatsächlichen Handposition entsprach. Typische Bewegungspfade während der Grundbedingung sowie zu Beginn und am Ende der Adaptation sind für jede verwendete Störung in Abb. 3 dargestellt.[1] Es wird deutlich, dass die Probanden während der Grundbedingung geradlinige, zielgerichtete Bewegungen durchführten. Mit Einsetzen der jeweiligen Störungen zu Beginn der Adaptation weichen die Bewegungsrichtungen des Cursors stark von den Zielrichtungen ab. Während sowohl die Rotation (V_{pos}) als auch die positionsabhängige Kraft (F^{-}_{pos}) zu Beginn der Adaptation eine geradlinige Ablenkung in Richtung der Störung zur Folge haben, sind die Bewegungen zu Beginn der Adaptation an die geschwindigkeitsabhängigen Störungen (V^{-}_{geschw} und F^{-}_{geschw}) deutlich gekrümmt. Am Ende der Adaptation sind die Bewegungsrichtungen des Cursors je nach Störung wieder mehr oder weniger zielgenau.

[1] Die Intensität und Polarität (im oder gegen den Uhrzeigersinn) variierten je nach Experiment. Exemplarisch sind für jede Störungsart (V_{pos}, V_{geschw}, F_{pos} und F_{gesch}) nur jeweils Bewegungen einer Intensität und Polarität dargestellt, da sich die Bewegungsausführungen außer in Ausmaß und Richtung nicht nennenswert unterschieden.

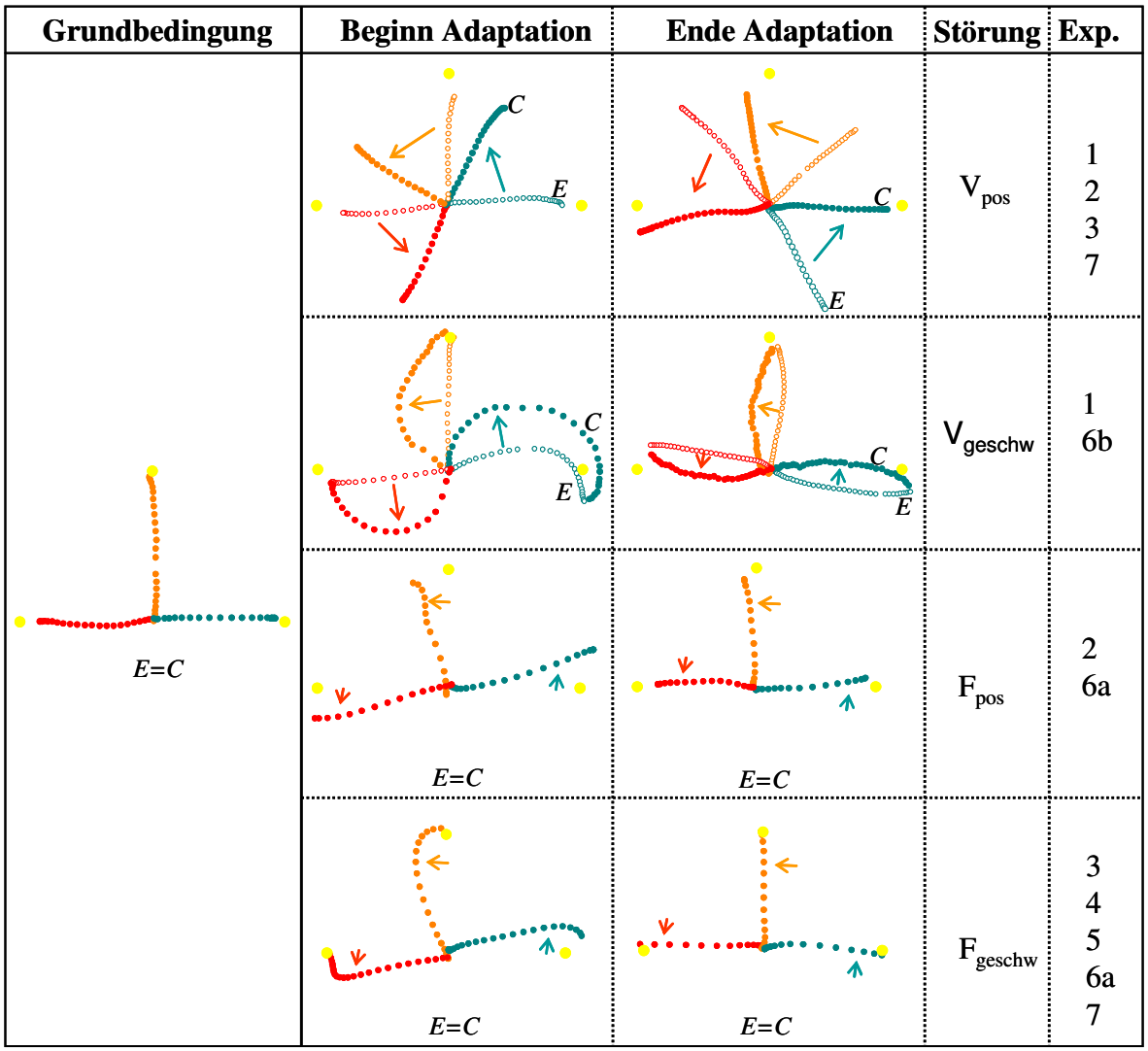

Abb. 3: Originalbewegungen des Cursors und des Effektors. Abgebildet sind beispielhaft typische Bewegungspfade jeweils eines Probanden zu drei der möglichen 8 (bzw. 16, Exp. 7) Zielpositionen für die Grundbedingung und den Beginn und das Ende der jeweiligen Adaptationsphase für die in dieser Arbeit verwendeten visuellen (V_{pos}, V_{geschw}) und mechanischen Störungen (F_{pos}, F_{geschw}). Die gelben Punkte repräsentieren die Zielpositionen und die Pfeile die induzierte Auslenkung. Für die visuellen Störungen sind sowohl der Effektor (E), als auch der Cursorpfad (C) dargestellt. Für die mechanischen Störungen stimmte beides überein.

2.1.4 Statistische Auswertung

Zur Berechnung verschiedener relevanter Parameter wurde jede einzelne Bewegung anhand eines Auswertprogramms[2] analysiert. Durch dieses Programm wurde für jede Hinbewegung zu den jeweiligen Zielpunkten ein Start- und ein Endpunkt festgelegt. Der Bewegungsbeginn

[2] Bei dem Auswertprogramm handelte es sich um verschiedene im Laufe der Zeit immer wieder erweiterte Versionen des sogenannten tkt (Version 4.0-5.6.), welches innerhalb des Instituts für Physiologie und Anatomie durch den Informatiker L.Geisen entwickelt wurde.

wurde zum Zeitpunkt einer erreichten Geschwindigkeit von 32 mm/s festgelegt. Das Ende der Bewegung wurde beim erneuten Unterschreiten dieser Geschwindigkeitsschwelle definiert[3]. Bewegungen, bei denen eine bestimmte Maximalgeschwindigkeit nicht erreicht wurde, wurden von weiteren Analysen ausgeschlossen. Die zu erreichende Maximalgeschwindigkeit variierte je nach Experiment und war unter anderem abhängig von der jeweilig verwendeten Bewegungsamplitude. Mit der Information über Start- und Zielposition konnten durch das Auswertprogramm aus den registrierten x-y Koordinaten und der jeweiligen Abtastrate des verwendeten Aufzeichnungsgerätes zahlreiche Parameter errechnet werden. Für die weitere Auswertung und statistische Analysen wurde für verschiedene Parameter der Median und teilweise die Standardabweichung über alle Bewegungen jeder einzelnen Episode verwendet. Zur graphischen Darstellung der Daten wurde der Mittelwert über alle Probanden der Mediane jeder Episode und als Streuungsmaß deren Standardabweichung ermittelt. Die Daten werden im Folgenden ohne Grundbedingung dargestellt, da diese auch in den statistischen Analysen nicht berücksichtigt wird. Die Erhebung der Grundbedingung diente nur zur Überprüfung des Ausgangsniveaus und wies innerhalb der Experimente keine Gruppenunterschiede auf.

Folgende Parameter waren für diese Arbeit relevant und wurden für die statistischen Analysen verwendet:

- **Initialfehler ($error_t$):** Der Initialfehler wurde als Winkel zwischen gewollter und tatsächlicher Bewegungsrichtung des Cursors einheitlich für alle Versuche zum Zeitpunkt 150 ms nach Bewegungsbeginn errechnet. Der Fehler wurde sehr früh in der Bewegung bestimmt um mögliche Bewegungskorrekturen aus den Analysen auszuschließen,

- **Standardabweichung des Initialfehlers ($Stabw_error_t$):** Über alle Bewegungen innerhalb einer Episode wurde die Standardabweichung des $error_t$ berechnet. Diese diente als Maß für die Variabilität des Zeigefehlers innerhalb der Episoden,

- **Bewegungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt 150 ms nach Bewegungsbeginn (Vel_{150}):** Dieser Parameter wurde bei geschwindigkeitsabhängigen Störungen zur Überprüfung der Validität des Initialfehlers erhoben. Bei variierenden Geschwindigkeiten oder Gruppenunterschieden konnte nicht ausgeschlossen werden, dass unter-

[3] Ausnahmen, bei denen die Geschwindigkeitsschwelle nach der Hinbewegung nicht erreicht wurden, konnten manuell bearbeitet werden. Das Ende wurde in diesem Fall beim Geschwindigkeitsminimum definiert.

schiedliche Initialfehler auf unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten zurückzuführen sind. Somit wurde in diesem Fall zur Überprüfung zusätzlich der **initiale Fehlerwinkel zum Zeitpunkt des Erreichens einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle ($error_v$)** analysiert. Diese Geschwindigkeitsschwelle variierte je nach Experiment in Abhängigkeit der jeweils verwendeten Bewegungsamplitude und konnte somit nicht als genereller, einheitlicher Fehlerwinkel über alle Experimente dienen,

- **Zurückgelegte Distanz zum Zeitpunkt 150 ms nach Bewegungsbeginn ($Dist_{150}$):** Dieser Parameter wurde bei positionsabhängigen Störungen zur Überprüfung der Validität des Initialfehlers erhoben. Ein Einfluss unterschiedlicher Distanzen auf die Größe des Initialfehlers konnte in diesem Fall ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Zur Überprüfung wurde hier der **initiale Fehlerwinkel zum Zeitpunkt des Erreichens einer bestimmten Distanz ($error_d$)** erhoben. Wie auch $error_v$ konnte dieser Fehler nicht als genereller, einheitlicher Fehlerwinkel dienen,

- **Maximale Bewegungsgeschwindigkeit (V_{max}).**

Die statistische Auswertung erfolgte über Varianzanalysen (ANOVAs) und wurde anhand des Programms STATISTICA 8.0 durchgeführt. Die im Einzelnen gerechneten ANOVAs, sowie spezifische weitere Analysen einzelner Experimente sind in den speziellen Methodiken der Experimente dargestellt. Als Post-hoc Test wurde grundsätzlich der Fisher LSD Test durchgeführt. Die erreichten Signifikanzniveaus werden in der Ergebnisdarstellung wie folgt dargestellt:

$p \leq 0{,}001$ entspricht ***,

$p \leq 0{,}01$ entspricht **,

$p \leq 0{,}05$ entspricht *,

$p > 0{,}05$ entspricht $^{n.s.}$.

2.2 Experimente 1-3 (Transfer)

Dieser Bereich umfasste insgesamt 3 Transferexperimente. Ziel dieser Experimente war es die Wechselwirkungen zwischen der Adaptation auf unterschiedliche Arten von Störungen zu untersuchen:

- Störungen mit ***gleichen*** physikalischen Eigenschaften, aber ***unterschiedlicher*** kinematischer Kopplung zur Hand (Experiment 1)
- Störungen mit ***unterschiedlichen*** physikalischen Eigenschaften, aber ***gleicher*** kinematischer Kopplung zur Hand (Experiment 2)
- Störungen mit ***unterschiedlichen*** physikalischen Eigenschaften und ***unterschiedlicher*** kinematischer Kopplung zur Hand (Experiment 3)

Allen drei Experimenten ist als Transferexperiment gemeinsam, dass die Probanden aufeinanderfolgend in zwei Adaptationsphasen jeweils zwei verschiedenen Arten von Störungen ausgesetzt wurden. Je nach Experiment variierte die Intensität der gewählten Störungen, um zusätzlich mögliche unterschiedliche Adaptationsstrategien für verschiedene Störungsintensitäten mit zu berücksichtigen. Mit der Intensität variierte ebenfalls die Länge der Adaptationsphase, die je nach Schweregrad der Störung in Vorversuchen entsprechend angepasst wurde.

Im Folgenden werden die jeweilige spezielle Methodik und die Ergebnisse für jedes Experiment erläutert. Außerdem erfolgt jeweils eine experimentspezifische Diskussion. Weiterhin erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse gemeinsam für Exp. 1-3.

2.2.1 Exp. 1: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

In Experiment 1 handelte es sich bei der Arbeitsfläche um ein Digitalisiertablett (SummaSketch® III Professional, Summagraphics), auf welchem die Probanden mit einem dazugehörigen Stift, gehalten mit der dominanten Hand, die Zeigebewegungen durchführten (Abb. 1a). Anhand dieses Systems wurde die jeweilige Stiftposition mit einer räumlichen Auflösung von 0,028 cm und einer Abtastrate von 60 Hz in Form kartesischer Koordinaten registriert.
Der während des gesamten Versuchs dargebotene Cursor war ein türkiser Kreis (C) (ø 6 mm). Ausgehend vom zentral positionierten roten Startpunkt (St) (ø 10 mm) wurden sternförmig in acht verschiedene Richtungen visuelle Ziele (Z) in Form von gelben Balken

(Länge: 10 cm * Breite: 1 cm), anstatt wie bei den anderen Experimenten in Form von Zielpunkten, präsentiert (Abb. 4). Die Ziele erschienen für jeweils 750 ms und der Startpunkt erlosch nach 500 ms Deckungsgleichheit mit der Stiftposition.

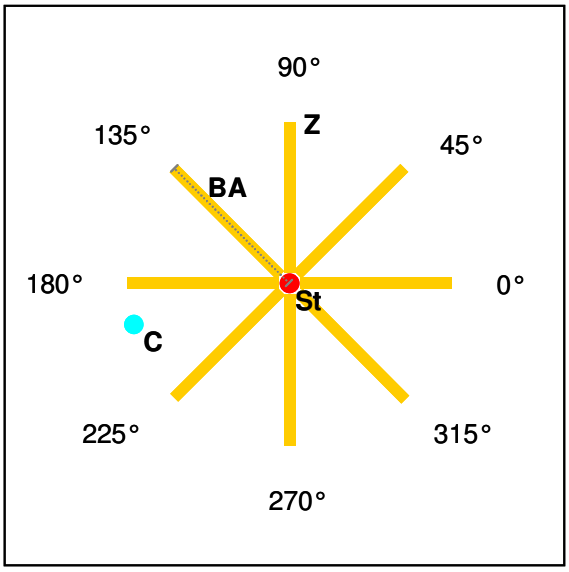

Abb. 4: Monitorabbild von Exp. 1. Dargestellt sind Startpunkt (St), die möglichen Ziele (Z), der Cursor (C) und die Bewegungsamplitude (BA).

Versuchsdesign

Um eine Adaptation hervorzurufen wurden in diesem Experiment zwei verschiedene ***visuelle Diskordanzen*** verwendet: zum einen eine **positionsabhängige** Störung in Form einer visuellen Rotation um α = 60° im (V^-_{pos}) oder gegen (V^+_{pos}) den Uhrzeigersinn; zum anderen eine **geschwindigkeitsabhängige** Störung im Uhrzeigersinn (V^-_{geschw}) für die gilt: *orthogonale Auslenkung [mm] = -0,05 * Bewegungsgeschwindigkeit [mm/s].*

Die verwendeten Diskordanzen unterschieden sich folglich in ihrer Kinematik in Bezug zur Handbewegung, nicht aber in ihrer physikalischen Natur.

Das Experiment war in insgesamt 63 Episoden von 30 sek Dauer unterteilt. Die Pause zwischen den einzelnen Episoden betrug 5 sek.

Nach 3 Episoden in der Grundbedingung folgten zwei Adaptationsphasen von jeweils 30 Episoden Länge. Die beiden Adaptationsphasen waren durch eine Pause von 5 min unterteilt.

Die Probanden wurden in 7 Gruppen aufgeteilt. Je nach Gruppe unterschied sich die Reihenfolge der präsentierten Störungen (V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}). Zusätzlich wurde der Cursor bei beiden Störungen entweder in die gleiche (V^-_{pos} und V^-_{geschw}) oder in entgegengesetzte (V^+_{pos} und V^-_{geschw}) Richtungen ausgelenkt.

Drei der sieben Gruppen dienten als Kontrollgruppen, welche anstatt der zweiten Adaptationsphase eine Deadaptationsphase von ebenfalls 30 Episoden Länge durchführten. Der gruppenspezifische Ablauf sowie die Gruppenbezeichnungen sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 1.

Gruppe	n	GB (3 Episoden)	AD1 (30 Episoden)	AD2 (30 Episoden)
$V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$	10	keine Diskordanz	V^-_{pos}: -60°	V^-_{geschw}
$V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$	10		V^+_{pos}: +60°	V^-_{geschw}
$V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$	10		V^-_{geschw}	V^-_{pos}: -60°
$V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$	10		V^-_{geschw}	V^+_{pos}: +60°
V^-_{pos}-CTR	5		V^-_{pos}: -60°	DE-AD: keine Diskordanz
V^+_{pos}-CTR	5		V^+_{pos}: +60°	
V^-_{geschw}-CTR	10		V^-_{geschw}	

Angegeben sind Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), 1. Adaptationsphase (AD1) und 2. Adaptationsphase (AD2) bzw. Deadaptationsphase (DE-AD). Die Auslenkungsrichtung ist mit - (im Uhrzeigersinn) bzw. + (gegen den Uhrzeigersinn) angegeben.

Statistische Auswertung

Für die Parameter $error_t$, Vel_{150}, $Dist_{150}$, $error_v$, $error_d$ und V_{max} wurde jeweils eine ANOVA mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode separat für die Störungen V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw} gerechnet. Für die Störung V^-_{pos} / V^+_{pos} handelte es sich um eine 4 (alle V^-_{pos} / V^+_{pos} -Bedingungen) * 30 (Episode) ANOVA, für die Störung V^-_{geschw} um eine 3 (alle V^-_{geschw}-Bedingungen) * 30 (Episode) ANOVA.

Als ein weiterer Schritt der Analysen wurden die Daten der zweiten Adaptationsphase der Gruppen $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$, $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$, $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ und $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ mit der Annahme verglichen, dass deren Verlauf die Summe zweier Prozesse widerspiegelt: die Deadaptation der ersten Störung und die Adaptation an die zweite Störung. Daraus ergeben sich folgende Berechnungen:

Annahme (Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$) = DE-AD (Gruppe V^-_{pos}-CTR) + AD1 (Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$, $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$)

Annahme (Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$) = DE-AD (Gruppe V^+_{pos}-CTR) + AD1 (Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$, $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$)

Annahme (Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$) = DE-AD (Gruppe V^-_{geschw}-CTR) + AD1 (Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$)

Annahme (Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$) = DE-AD (Gruppe V^-_{geschw}-CTR) + AD1 (Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$)

Für jeden Probanden wurden die Werte der einzelnen Episoden gemittelt, sowohl für die realen Werte, als auch für die Annahmen, so dass für jeden Probanden jeweils ein Wert für die reale Adaptation und die Annahme zur Verfügung standen. Reale Adaptation und Annahme wurden anschließend für jede Bedingung anhand von t-tests verglichen.

2.2.2 Exp. 1: Ergebnisse

$error_t$

Für die Bedingung $\mathbf{V^-_{pos}}$ **/** $\mathbf{V^+_{pos}}$ wird deutlich, dass der Fehlerwinkel in allen vier Gruppen im Verlauf der Adaptation abnahm (Abb. 5a). In der ANOVA zeigte sich dementsprechend ein signifikanter Episodeneffekt (Tab. 3). Deutlich wird ebenfalls ein höherer Fehler zu Beginn der Adaptation für Probanden, die in die entgegengesetzte Richtung voradaptiert waren ($V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$) und ein geringerer Eingangsfehler für Probanden, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren ($V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$) im Vergleich zu naiven Probanden. Die ANOVA zeigte einen signifikanten Effekt für Bedingung (Tab. 3). Der Post-hoc Test bestätigte einen signifikanten Unterschied zwischen naiven Probanden, die an V^-_{pos} adaptierten und Probanden, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren (Tab. 4). Außerdem zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen beiden voradaptierten Gruppen. Die Interaktion Episode * Bedingung war ebenfalls signifikant (Tab. 3). Als relevantes Ergebnis zeigte sich hier, dass sich zwischen den naiven Probanden und den Probanden, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren im Verlauf der Adaptation mehr Episoden signifikant unterschieden, als zwischen den naiven Probanden und den Probanden, die in die entgegengesetzte Richtung voradaptiert waren (s. Anhang).

Während der Adaptation der naiven Probanden an die Bedingung $\mathbf{V^-_{geschw}}$ war die Reduktion des Fehlerwinkels deutlich geringer verglichen zur Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} (Abb. 5b). Die ANOVA zeigte einen signifikanten Episodeneffekt (Tab. 3), wobei die Probanden, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren ($V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$) keine weitere Abnahme der Fehler-

winkels aufwiesen. Beim Vergleich aller drei Bedingungen wird das gleiche Muster deutlich wie für V^-_{pos} / V^+_{pos}: Probanden die in die entgegengesetzte Richtung voradaptiert waren ($V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$), begannen die Adaptation mit einem deutlich höheren Fehler und Probanden, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren ($V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$), mit einem deutlich geringeren Fehler als die naiven Probanden. Dementsprechend zeigte sich in der ANOVA ein signifikanter Effekt für Bedingung (Tab. 3). Der Post-hoc Test zeigte, dass sich alle drei Gruppen signifikant voneinander unterschieden (Tab. 5). Die Interaktion Episode * Bedingung war ebenfalls signifikant (Tab. 3). Wie bei der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} zeigten die Ergebnisse des Post-hoc Tests der Interaktion der Adaptation an V^-_{geschw}, dass die Voradaptation in die gleiche Richtung einen größeren Effekt aufwies als die jeweilige Voradaptation in die entgegengesetzte Richtung (s. Anhang). Außerdem zeigten sich deutlichere Effekte beim Vergleich der Bedingungen während der Adaptation an V^-_{geschw} als an V^-_{pos} / V^+_{pos}, was einen größeren Einfluss der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} auf V^-_{geschw} als umgekehrt zeigt.

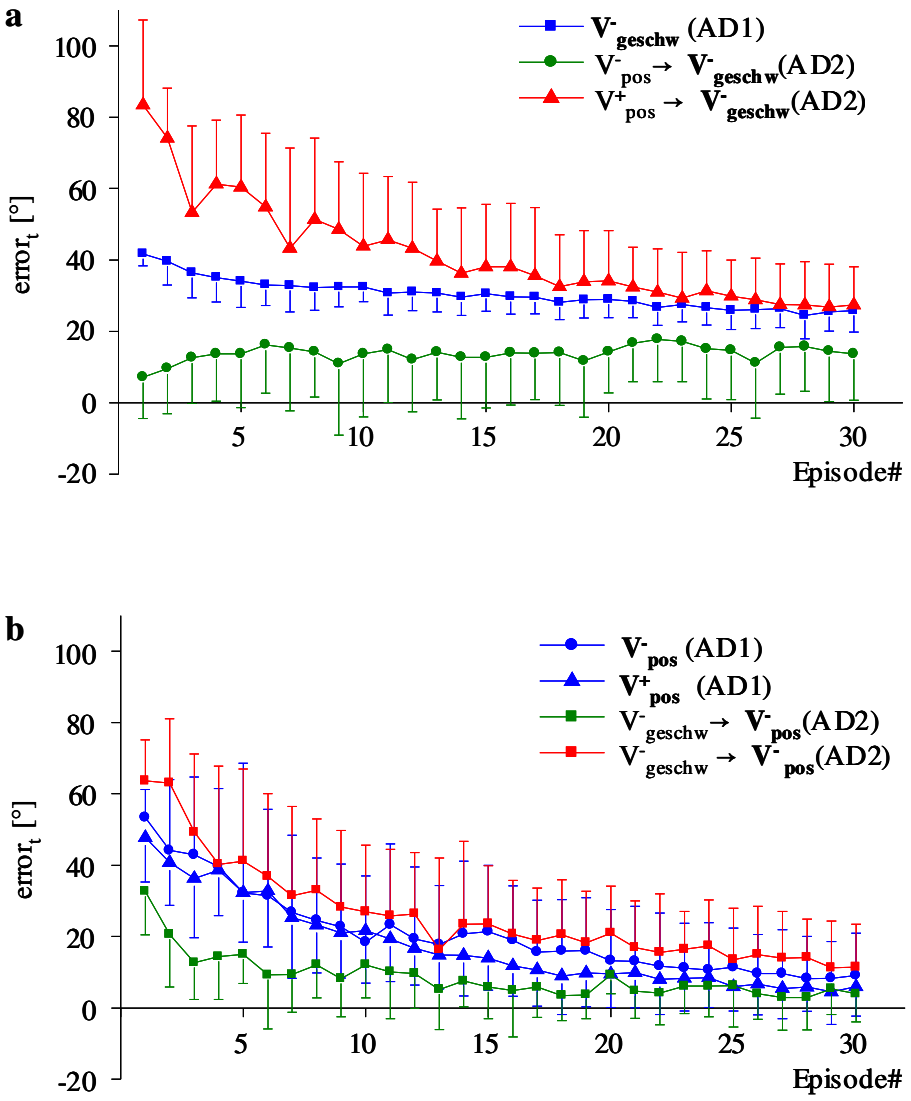

Abb. 5: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ (Exp. 1). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichungen. **a:** Verläufe der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} naiv und voradaptiert und **b:** Verläufe der Adaptation an V^-_{geschw} naiv und voradaptiert.

Tab. 3: Ergebnisse der ANOVAs des error$_t$ (Exp. 1) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}.

Effekt	**V^-_{pos} / V^+_{pos}**	**V^-_{geschw}**
Bedingung	F (3, 46) = 4,49**	F (2, 47) = 25,39***
Episode	F (29, 1334) = 56,11***	F (29, 1363) = 33,69***
Bedingung * Episode	F (87, 1363) = 1,93***	F (58, 1363) = 17,89***

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 4: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ (Exp. 1).

Bedingung	$\mathbf{V^-_{pos}}$ (AD1)	$\mathbf{V^+_{pos}}$ (AD1)	$V^-_{geschw} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	$V^-_{geschw} \rightarrow \mathbf{V^+_{pos}}$ (AD2)
$\mathbf{V^-_{pos}}$ (AD1)		p = 0,397 n.s.	p = 0,009**	p = 0,259 n.s.
$\mathbf{V^+_{pos}}$ (AD1)	p = 0,397 n.s.		p = 0,056 n.s.	p = 0,062 n.s.
$V^-_{geschw} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	p = 0,009**	p = 0,056 n.s.		p = 0,001***
$V^-_{geschw} \rightarrow \mathbf{V^+_{pos}}$ (AD2)	p = 0,259 n.s.	p = 0,062 n.s.	p = 0,001***	

Tab. 5: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für $\mathbf{V^-_{geschw}}$ (Exp. 1).

Bedingung	$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)	$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	$V+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)
$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)		p = 0,000***	p = 0,001***
$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	p = 0,000**		p = 0,000***
$V^+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	p = 0,001***	p = 0,000***	

$error_v$ / $error_d$

Da sich sowohl für die geschwindigkeitsabhängige Störung V^-_{geschw} die Geschwindigkeit Vel_{150} als auch für die positionsabhängige Störung V^-_{pos} / V^+_{pos} die Distanz $Dist_{150}$ zwischen der naiven und den voradaptierten Bedingungen signifikant unterschied (Tab. 6) wurden zusätzlich die störungsspezifischen Parameter $error_v$ (V^-_{geschw}) und $error_d$ (V^-_{pos} / V^+_{pos}) untersucht. Die ANOVAs beider Parameter bestätigten die des $error_t$ und sind somit nicht zusätzlich in den Ergebnissen dargstellt (s. Anhang).

Tab. 6: Ergebnisse der ANOVAs der $Dist_{150}$ für $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ und Vel_{150} für $\mathbf{V^-_{geschw}}$ (Exp. 1).

Effekt	$\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$	$\mathbf{V^-_{geschw}}$
Bedingung	F(3, 46) = 3,75*	F(2, 47) = 3,65*
Episode	F(29, 1334) = 2,45***	F(29, 1363) = 8,53***
Bedingung * Episode	F(87, 1334) = 1,18 n.s.	F(58, 1363) = 1,04 n.s.

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

V_{max}

Wie in Abb. 6a deutlich wird, stieg V_{max} zu Beginn der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} unabhängig von der jeweiligen Bedingung an und zeigte im folgenden Verlauf keine Änderung mehr. Im Gegensatz dazu sank V_{max} während der Adaptation an V^-_{geschw} ebenfalls unabhängig von der Bedingung stetig nahezu bis zum Ende der Adaptation (Abb. 6b). Die ANOVAs für beide Störungen zeigten einen signifikanten Episodeneffekt (Tab. 7). Bei der Adaptation an beide Störungen zeigte sich ein Unterschied zwischen der naiven und den voradaptierten Bedingungen: bei der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} war V_{max} der naiven Bedingung höher als die der voradaptierten Bedingungen; für die Adaptation an V^-_{geschw} verhielt es sich genau umgekehrt. Dementsprechend wies die ANOVA einen signifikanten Effekt für den Faktor Bedingung für beide Störungen (Tab. 7) auf. Der Post-hoc Test bestätigte, dass sich in beiden Fällen die naiven Probanden von den voradaptierten signifikant unterschieden mit Ausnahme der naiven Adaptation an V^+_{pos} und der voradaptierten Bedingung $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (Tab. 8 / Tab. 9). Für V^-_{pos} / V^+_{pos} war die Interaktion Episode * Bedingung nicht signifikant. Für V^-_{geschw} ergab sich zusätzlich ein signifikanter Effekt für die Interaktion Episode * Bedingung. Die relevanten extrahierten Ergebnisse des Post-hoc Tests zeigten einen signifikanten Effekt zwischen einzelnen Episoden der naiven und der voradaptierten Bedingungen vor allem zu Beginn der Adaptation (s. Anhang).

Tab. 7: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 1) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}.

Effekt	**V^-_{pos} / V^+_{pos}**	**V^-_{geschw}**
Bedingung	$F(3, 46) = 3{,}66^*$	$F(2, 47) = 3{,}97^*$
Episode	$F(29, 1334) = 2{,}39^{***}$	$F(29, 1363) = 11{,}76^{***}$
Bedingung * Episode	$F(87, 1334) = 0{,}88^{n.s}$	$F(58, 1363) = 2{,}21^*$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 8: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der V_{max} für V^-_{pos} / V^+_{pos} (Exp. 1).

Bedingung	**V^-_{pos}** (AD1)	**V^+_{pos}** (AD1)	$V^-_{geschw} \rightarrow$ **V^-_{pos}** (AD2)	$V^-_{geschw} \rightarrow$ **V^+_{pos}** (AD2)
V^-_{pos} (AD1)		$p = 0{,}713^{n.s.}$	$p = 0{,}008^{**}$	$p = 0{,}035^*$
V^+_{pos} (AD1)	$p = 0{,}713^{n.s.}$		$p = 0{,}019^*$	$p = 0{,}071^{n.s.}$
$V^-_{geschw} \rightarrow$ **V^-_{pos}** (AD2)	$p = 0{,}008^{**}$	$p = 0{,}019^*$		$p = 0{,}597^{n.s.}$
$V^-_{geschw} \rightarrow$ **V^+_{pos}** (AD2)	$p = 0{,}035^*$	$p = 0{,}071^{n.s.}$	$p = 0{,}597^{n.s.}$	

Tab. 9: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der V_{max} für V^-_{geschw} (Exp. 1).

Bedingung	$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)	$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$(AD2)	$V+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)
$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)		p = 0,021*	p = 0,046*
$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$(AD2)	p = 0,021*		p = 0,775 n.s.
$V+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	p = 0,046*	p = 0,775 n.s.	

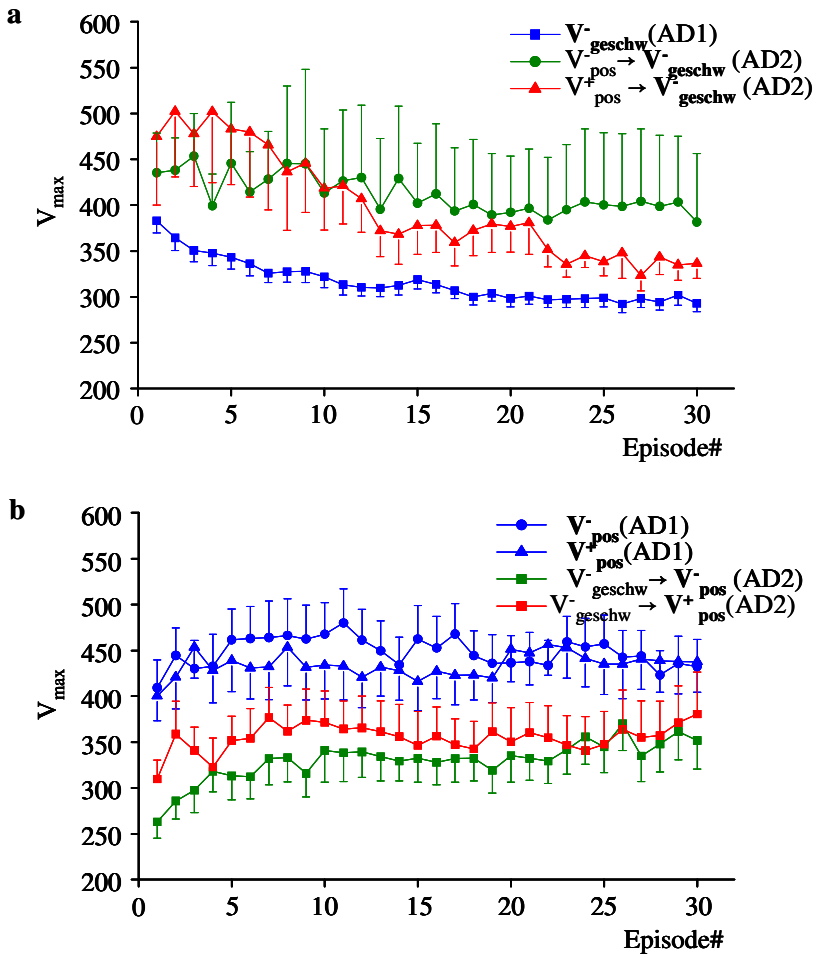

Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der V_{max} (Exp. 1). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung. **a:** Verläufe der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} naiv und voradaptiert und **b:** Verläufe der Adaptation an V^-_{geschw} naiv und voradaptiert.

Annahmen

In Abb. 7 ist die zweite Adaptationsphase der Gruppen $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$, $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$, $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ und $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$, sowie der Verlauf der berechneten Annahme als Summe der Deadaptation der ersten Adaptationsphase und der Adaptation der zweiten Phase dargestellt. Es wird deutlich, dass sich Annahme und realer Verlauf bei Voradaptation in die entgegengesetzte Richtung nicht unterscheiden, während bei Voradaptation in die gleiche Richtung ein Unterschied zu erkennen ist. Dementsprechend zeigten die Ergebnisse der t-Tests keinen signifikanten Effekt zwischen den realen zweiten Adaptationsphasen und den berechneten Annahmen für die Bedingungen, die in die entgegengesetzte Richtung voradaptiert waren (Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$: $t(9) = 0{,}58^{n.s.}$; Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$: $t(9) = -1{,}15^{n.s}$) Der Unterschied für die Bedingungen, die in die gleiche Richtung voradaptiert waren, war signifikant (Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$: $t(9) = -2{,}81^*$; Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$:$t(9) = -4{,}71^{**}$).

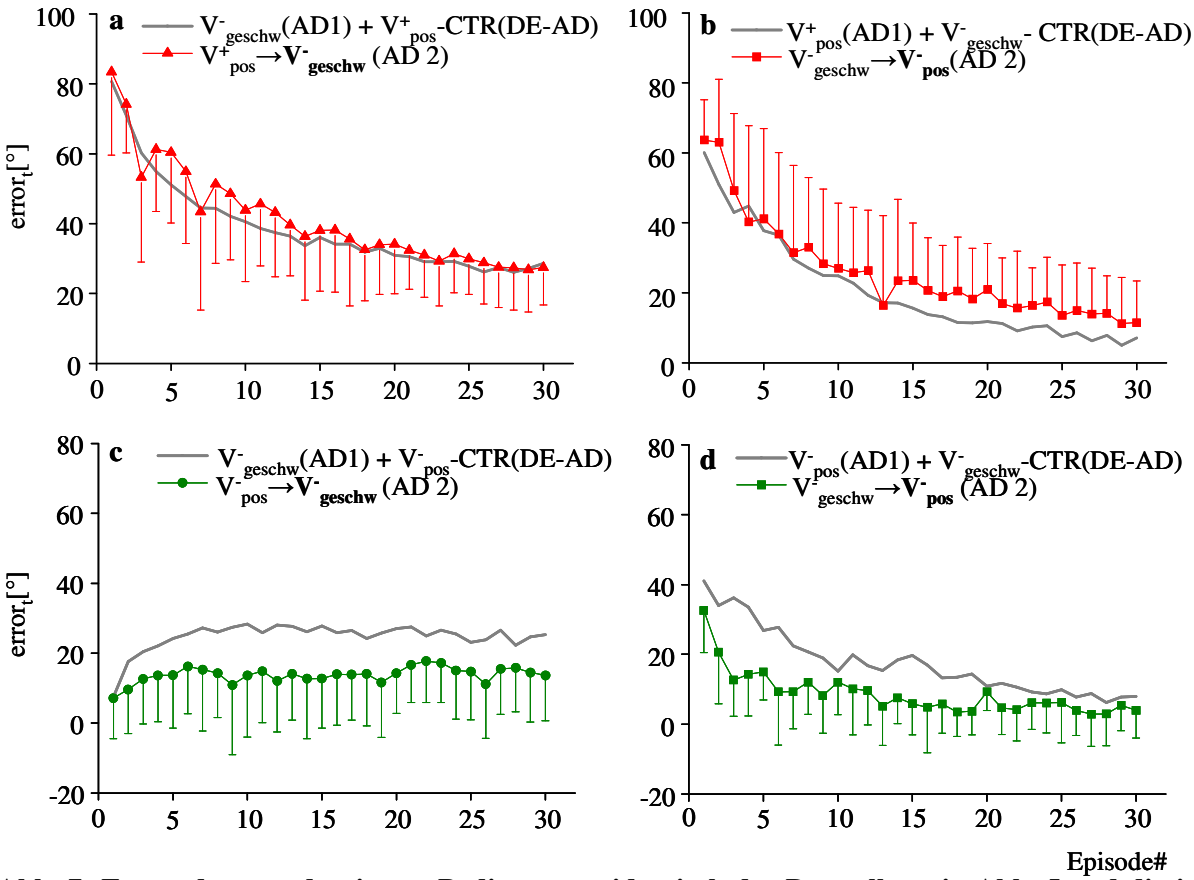

Abb. 7: Error$_t$ der voradaptierten Bedingungen identisch der Darstellung in Abb. 5 und die jeweilige Annahme (graue Linie) (Exp. 1). **a:** AD2 von Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$. **b:** AD2 von Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$. **c:** AD2 von Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$. **d:** AD2 von Gruppe $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$.

2.2.3 Exp. 2: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

In Experiment 2 führten die Probanden die Zeigebewegungen mit dem stiftähnlichen Endsegment des dreidimensionalen Arms eines robotischen Manipulandums (PHANTOM^{TM} Premium Haptic Device 1.5A, Sensable Technologies. Inc.) durch (Abb. 1b). Anhand dieses Gerätes wurde die jeweilige Stiftposition mit einer Auflösung von 0,028 cm und einer Abtastrate von 60 Hz registriert. Der während des Versuchs dargebotene Cursor war ein weißes Fadenkreuz (C) (ø 10 mm). Als Startposition (St) wurde ein roter Punkt (ø 10 mm) und als Ziele (Z) gelbe Punkte (ø 10 mm) präsentiert. Die Bewegungsamplitude zwischen Start- und Zielpunkten betrug 50 mm (Abb. 2). Die Zielpunkte leuchteten für jeweils 500 ms und der Startpunkt erlosch 300 ms nach Deckungsgleichheit mit dem Fadenkreuz.

Versuchsdesign

Bei den in diesem Experiment verwendeten Störungen handelte es sich zum einen um eine **visuelle, positionsabhängige Störung** als visuelle Rotation um α=30° im (V^{-}_{pos}) oder gegen den Uhrzeigersinn (V^{+}_{pos}). Zum anderen wurde durch das Manipulandum ein **positionsabhängiges Kraftfeld** im Uhrzeigersinn (F^{-}_{pos}) generiert *($F^{-}_{pos}[N]$ = -0,06 * radiale Distanz vom Startpunkt [mm])*. Die verwendeten Störungen unterschieden sich im Gegensatz zu Experiment 1 nicht in ihrer Kinematik in Bezug auf die Hand, sondern in ihrer physikalischen Eigenschaft (visuell versus mechanisch).

Das Experiment war in insgesamt 35 Episoden von 30 sek Dauer aufgeteilt. Die Pause zwischen den einzelnen Episoden betrug 5 sek. Nach 3 Episoden in der Grundbedingung ohne Diskordanz folgten insgesamt 32 Adaptationsepisoden.
Die Probanden wurden in insgesamt 7 Gruppen aufgeteilt, wovon 5 Gruppen phasenweise mit jeweils 16 Episoden hintereinander und eine Gruppe episodenweise alternierend an beide Störungen adaptierte. Die phasenweise Adaptation war durch eine Pause von 5 min unterteilt. Zwei der 5 phasenweise adaptierenden Gruppen dienten als Kontrollgruppen. Das bedeutete, dass den Probanden während der Adaptation an das Kraftfeld außer zum Zeitpunkt des Erreichens der Startposition keine visuelle Rückmeldung in Form des Cursors gegeben wurde. Somit war in diesem Fall einzig die propriozeptive Rückmeldung von Relevanz. Der gruppenspezifische Ablauf ist in Tab. 10 dargestellt.

Tab. 10: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 2.

Gruppe	n	GB (3 Episoden)	AD1 (16 Episoden)	AD2 (16 Episoden)
$V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$	10	Keine Diskordanz	V^-_{pos} (-30°)	F^-_{pos}
$V^+_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$	10		V^+_{pos} (+30°)	F^-_{pos}
$F^-_{pos} \rightarrow V^-_{pos}$	10		F^-_{pos}	V^-_{pos} (-30°)
$F^-_{pos} \rightarrow V^+_{pos}$	10		F^-_{pos}	V^+_{pos} (+30°)
$F^-_{pos/novis} \rightarrow V^-_{pos}$	10		F^-_{pos} (ohne vis.RM)	V^-_{pos} (-30°)
$V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos/novis}$	10		V^-_{pos} (-30°)	F^-_{pos} (ohne vis.RM)
V^-_{pos} F^-_{pos} (Alt)	10		episodenweise altern.: V^-_{pos}: -30°/ F^-_{pos}	

Angegeben sind Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), 1. Adaptationsphase (AD1) und 2. Adaptationsphase (AD2). Die Auslenkungsrichtung ist mit + (im Uhrzeigersinn) bzw. – (gegen den Uhrzeigersinn) angegeben.

.

Statistische Auswertung

Für den *Vergleich der phasenweise adaptierten Bedingungen* wurde für die Parameter $error_t$, Vel_{150} und V_{max} eine 5 (Bedingung) * 16 (Episode) ANOVA separat für die Störungen F^-_{pos} und V^-_{pos} / V^+_{pos} gerechnet. Für die Störung F^-_{pos} waren die Bedingungen F^-_{pos} (AD1), $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$ (AD2), $V^+_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$ (AD2), $F^-_{pos/novis}$ (AD1) und $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{novis}$ (AD2). Für die Störung V^-_{pos} / V^+_{pos} waren die Bedingungen V^-_{pos} (AD1), V^+_{pos} (AD1), $F^-_{pos} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2), $F^-_{pos} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2) und $F^-_{pos/novis} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2).

Zusätzlich wurde der $error_t$ der *alternierenden Gruppe* separat für jede Störung mit dem $error_t$ der ersten phasenweisen Adaptationsphase der jeweils identischen Störung verglichen. Dazu wurde jeweils eine 2 (Bedingung) * 16 (Episode) ANOVA für jede Störung gerechnet.

Außerdem wurde die Zeitkonstante t separat für die Adaptationsverläufe der Störungen F^-_{pos} und V^-_{pos} für die alternierende Adaptation und für die identischen Störungen der phasenweisen Adaptation ermittelt. Dazu wurde mit Hilfe des Programms ORIGIN® 7 jeweils eine nichtlineare Regression über den Parameter $error_t$ für jede Bedingung über alle Adaptationsepisoden (E) mit folgender exponentieller Formel angepasst:

$$error_t = y_0 + Ae^{-E/t},$$

wobei y_0 das Plateau und A das Offset der Exponentialfunktion repräsentiert.

2.2.4 Exp. 2: Ergebnisse

$error_t$

Der zeitliche Verlauf des Initialfehlers ist störungsspezifisch in Abb. 8 dargestellt. Der Verlauf der Adaptation an $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ gleichte dem der Adaptation an die gleiche Störungsart aus Experiment 1 (Abb. 8a). Allerdings begannen die Probanden die Adaptation hier mit einem niedrigeren Fehlerwinkel verglichen zu Experiment 1, was auf die unterschiedliche Störgröße der visuellen Rotation zurückzuführen ist (30° versus 60°). Die einzelnen Bedingungen (naiv, voradaptiert gleich, voradaptiert entgegengesetzt) unterschieden sich ebenfalls in ähnlicher Weise wie in Experiment 1. Eine gleichgerichtete Voradaptation ($F^-_{pos} \rightarrow V^-_{pos}$) resultierte in einem reduzierten Anfangsfehler, eine entgegengesetzte Voradaptation ($F^-_{pos} \rightarrow V^+_{pos}$) in einem gestiegenen Anfangsfehler im Gegensatz zu naiven Probanden. Die ANOVA für die Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} ergab einen signifikanten Effekt für Episode, Bedingung und deren Interaktion (Tab. 11). Der Post-hoc Test für den Faktor Bedingung wies einen signifikanten Unterschied zwischen den naiven Bedingungen und den voradaptierten Bedingungen auf (Tab. 12). Die Ergebnisse des Post-hoc Tests der Interaktion wiesen keine erwähnenswerten Besonderheiten auf (s. Anhang).

Im Verlauf der Adaptation an $\mathbf{F^-_{pos}}$ reduzierte sich der Fehler in allen Bedingungen. Auch hier war verglichen zur naiven Bedingung der Fehler der in die entgegengesetzte Richtung voradaptierten Bedingung ($V^+_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$) zu Beginn der Adaptation höher und der Fehler der in die gleiche Richtung voradaptierten Bedingung ($V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$) niedriger (Abb. 8b). Allerdings begann die in die gleiche Richtung voradaptierte Bedingung im Gegensatz zu allen anderen Bedingungen mit einem negativen Fehlerwinkel. Dies bedeutet, dass sich die Probanden aus der zur wirkenden Kraft entgegengesetzten Richtung anpassten. Die Ergebnisse der entsprechenden ANOVA wiesen sowohl für den Innersubjektfaktor Episode als auch für den Faktor Bedingung und deren Interaktion signifikante Unterschiede auf (Tab. 11). Der Post-hoc Test des Faktors Bedingung wies einen signifikanten Unterschied zwischen der naiven und den beiden voradaptierten Bedingungen auf (Tab. 13). Die Ergebnisse des Post-hoc Tests der Interaktion wiesen keine erwähnenswerten Besonderheiten auf (s. Anhang).

Speziell sind die in diesem Experiment erhobenen Gruppen $\mathbf{F^-_{pos/novis}} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ und $\mathbf{V^-_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos/novis}}$ zu erwähnen, welche während der Kraftadaptation keine visuelle Rückmeldung hatten. Gruppe $F^-_{pos/novis} \rightarrow V^-_{pos}$ unterschied sich in beiden Adaptationsphasen nicht von

der äquivalenten Gruppe $F^-_{pos} \rightarrow V^-_{pos}$ mit visueller Rückmeldung. Dementsprechend wiesen die jeweiligen Post-hoc Tests für den Faktor Bedingung der entsprechenden ANOVAs keinen signifikanten Unterschied zwischen diesen Bedingungen auf (Tab. 12 / Tab. 13). Im Gegensatz dazu unterschied sich die zweite Adaptationsphase der Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos/novis}$ deutlich von der äquivalenten Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos}$ mit visueller Rückmeldung. Die Gruppe $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{pos/novis}$ wies bis zum Ende der Adaptationsphase an $F^-_{pos/novis}$ einen deutlichen Fehler in die zur wirkenden Kraft entgegengesetzte Richtung auf, welcher nach der ersten Episode sogar noch anstieg. Dieser Verlauf ähnelte dem der naiven Adaptation, allerdings auf einem versetzten Niveau. Daraus resultierend zeigte sich im Post-hoc Test für den Faktor Bedingung der entsprechenden ANOVA ein signifikanter Effekt zwischen beiden Bedingungen (Tab. 13).

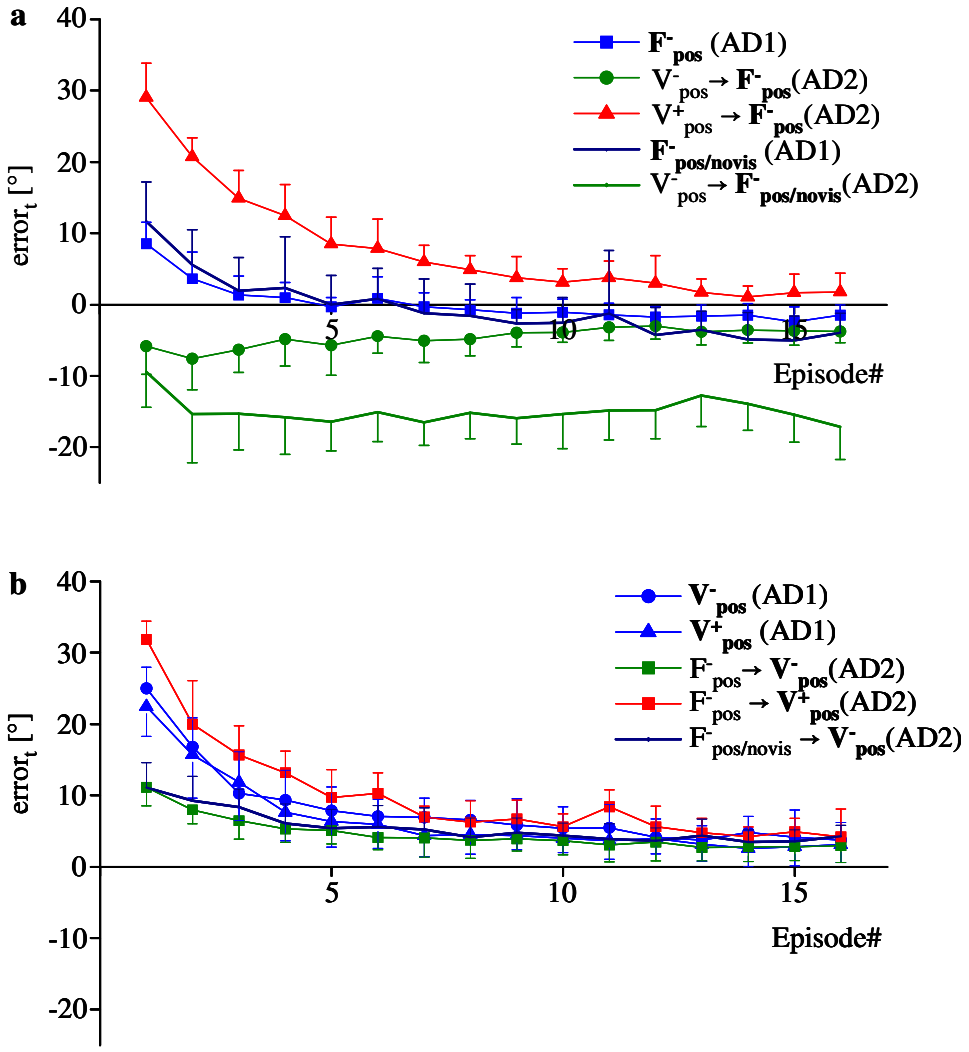

Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ (Exp. 2). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichungen. **a:** Verläufe der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} naiv und voradaptiert und **b:** Verläufe der Adaptation an F^-_{pos} naiv und voradaptiert.

Tab. 11: Ergebnisse der ANOVAs des error$_t$ (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos}.

Effekt	V^-_{pos} / V^+_{pos}	F^-_{pos}
Episode	F(15, 675) = 222,4***	F (15, 825) = 78,44***
Bedingung	F(4, 45) = 10,31***	F(4, 55) = 130,0***
Episode * Bedingung	F(60, 675) = 11,86***	F(60, 825) = 19,01***

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 12: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des error$_t$ (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos}.

Bedingung	V^-_{pos} (AD1)	V^+_{pos} (AD1)	$F^-_{pos}\rightarrow$ V^-_{pos}(AD2)	$F^-_{pos}\rightarrow$ V^+_{pos} (AD2)	$F^-_{pos/novis}\rightarrow$ V^-_{pos} (AD2)
V^-_{pos} (AD1)		p = 0,165$^{n.s.}$	p = 0,001***	p = 0,410*	p = 0,010**
V^+_{pos} (AD1)	p = 0,165$^{n.s.}$		p = 0,030*	p = 0,01***	p = 0,208$^{n.s.}$
$F^-_{pos}\rightarrow$ **V^-_{pos}(AD2)**	p = 0,001***	p = 0,030*		p = 0,000***	p = 0,339$^{n.s.}$
$F^-_{pos}\rightarrow$ **V^+_{pos} (AD2)**	p = 0,041*	p = 0,001***	p = 0,000***		p = 0,000***
$F^-_{pos/novis}\rightarrow$ **V^-_{pos} (AD2)**	p = 0,010**	p = 0,208$^{n.s.}$	p = 0,330$^{n.s.}$	p = 0,000***	

Tab. 13: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des error$_t$ (Exp. 2) für F^-_{pos}.

Bedingung	F^-_{pos} (AD1)	$F^-_{pos/novis}$ (AD1)	$V^-_{pos}\rightarrow$ F^-_{pos} (AD2)	$F^-_{pos}\rightarrow$ V^+_{pos} (AD2)	$V^-_{pos}\rightarrow$ $F^-_{pos/novis}$(AD2)
F^-_{pos} (AD1)		p = 0,487 $^{n.s.}$	p = 0,000***	p = 0,000***	p = 0,000***
$F^-_{pos/novis}$ (AD1)	p = 0,487 $^{n.s.}$		p = 0,000***	p = 0,000***	p = 0,000***
$V^-_{pos}\rightarrow$ **F^-_{pos} (AD2)**	p = 0,000***	p = 0,000***		p = 0,000***	p = 0,000***
$V^+_{pos}\rightarrow$ **F^-_{pos} (AD2)**	p = 0,000***	p = 0,000***	p = 0,000***		p = 0,000***
$V^-_{pos}\rightarrow$ **$F^-_{pos/novis}$ (AD2)**	p = 0,000***	p = 0,000***	p = 0,000***	p = 0,000***	

$Dist_{150}$

Für die zurückgelegte Distanz zum Zeitpunkt des Initialfehlers ($Dist_{150}$) konnten keine bedingungsspezifischen Unterschiede festgestellt werden (s. Anhang). Der störungsspezifische Parameter $error_d$ wurde demzufolge außer Betracht gelassen.

V_{max}

Die Ergebnisse der V_{max} wiesen keine nennenswerten Besonderheiten bezogen auf Unterschiede in den einzelnen Bedingungen auf und sind deshalb nicht graphisch dargestellt. Die ANOVA der Störung $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ wies keine signifikanten Effekte auf. Die ANOVA der Störung $\mathbf{F^-_{geschw}}$ zeigte einen signifikanten Episodeneffekt (Tab. 14).

Tab. 14: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 2) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos}.

Effekt	$\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$	$\mathbf{F^-_{pos}}$
Episode	$F(15, 675) = 1{,}12^{n.s.}$	$F(15, 825) = 10{,}29^{***}$
Bedingung	$F(4, 45) = 0{,}65^{n.s.}$	$F(4, 55) = 0{,}3^{n.s.}$
Episode * Bedingung	$F(60, 675) = 0{,}86^{n.s.}$	$F(60, 825) = 1{,}68^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Vergleichende Analyse der alternierenden Daten

Zunächst ist zu erkennen, dass der Fehlerwinkel während der alternierenden Adaptation episodenweise hin und her sprang und sich für jede Störung ein eigener Adaptationsverlauf abzeichnete. Vor allem für die Störung $\mathbf{F^-_{pos}}$ ist ein deutlicher Unterschied zur phasenweisen Adaptation zu erkennen. Direkt in der ersten Episode der Adaptation an die Kraft der alternierenden Bedingung war der Fehler deutlich niedrigerer als in der ersten Episode der phasenweisen Adaptation. Diese Differenz blieb bis zum Ende der Adaptation bestehen, woraus im Verlauf zunehmend ein Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft resultierte. Die gerechnete ANOVA bestätigte diese Beobachtung durch einen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen (phasenweise und alternierend). Der Episodeneffekt und die Interaktion (Bedingung * Episode) waren ebenfalls signifikant (Tab. 15). Der Post-hoc Test der Interaktion zeigte, dass sich alle Episoden beider Gruppen signifikant voneinander unterschieden.

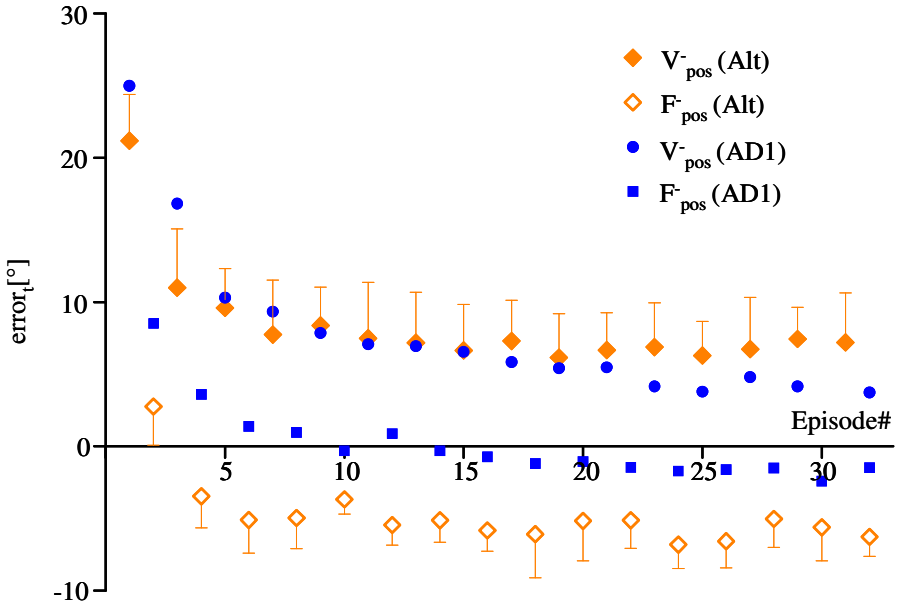

Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ der Gruppe V$^-_{pos}$ F$^-_{pos}$ (Alt) (Exp.2). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichungen separat für jede Bedingung (V$^-_{pos}$ / F$^+_{pos}$) der alternierenden Gruppe. Zusätzlich sind die Adaptationsverläufe der ersten phasenweisen Adaptation an V$^-_{pos}$ sowie F$^-_{pos}$ dargestellt.

Im Gegensatz dazu zeigte sich ein weniger deutlich ausgeprägter Unterschied zwischen der alternierenden und der phasenweisen Bedingung für die Störung **V$^-_{pos}$**. Schon in der ersten Episode wies die alternierende Bedingung einen niedrigeren Fehler auf. Anschließend zeigte sich in den ersten 2 Episoden eine schnellere Fehlerreduktion im Vergleich zur phasenweisen Adaptation. Ab der vierten Episode wurde der Fehler nicht weiter reduziert, so dass der Fehlerwinkel der alternierenden Bedingung auf einem höheren Plateau endete. Entsprechend wies die ANOVA keinen signifikanten Unterschied der Bedingungen auf. Der Episodeneffekt und die Interaktion (Bedingung * Episode) waren signifikant (Tab. 15). Der Post-hoc Test der Interaktion zeigte, dass sich nur die ersten beiden und letzen beiden Episoden beider Bedingungen signifikant voneinander unterschieden.

Tab. 15: Ergebnisse der ANOVAs des error$_t$ (Exp. 2) für V$^-_{pos}$ / V$^+_{pos}$ und F$^-_{pos}$ von AD1 der phasenweisen Adaptation und der Adaptation der alternierenden Gruppe.

Effekt	**V$^-_{pos}$ / V$^+_{pos}$**	**F$^-_{pos}$**
Episode	F(15, 270) = 89,52***·	F(15, 420) = 43,87***
Gruppe	F(1, 18) = 0,13$^{n.s.}$	F(1, 28) = 128,14***
Episode * Gruppe	F(15, 270) = 6,75***	F(15, 420) = 2,57**

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe und den Innersubjektfaktor Episode.

Der Vergleich der **Zeitkonstanten** der phasenweisen Adaptation mit der alternierenden Adaptation zeigte sowohl für F^-_{pos} als auch für V^-_{pos} deutlich kürzere Zeitkonstanten für die alternierende Adaptation. Aus den exponentiellen Regressionen ergab sich für die Adaptation an $\mathbf{V^-_{pos}}$ der alternierenden Gruppe ($V^-_{pos}F^-_{pos}$(Alt)) eine Zeitkonstante von 0,94 ± 0.10 Episoden und für die Adaptation an V^-_{pos} der phasenweisen Adaptation eine Zeitkonstante von 2.16 ± 0.11 Episoden. Für die Adaptation an $\mathbf{F^-_{pos}}$ ergab sich für die alternierende Gruppe ($V^-_{pos}F^-_{pos}$(Alt)) eine Zeitkonstante von 0.77 ± 0.20 Episoden und für die phasenweise Adaptation eine Zeitkonstante von 1.54 ± 0.27 Episoden.

2.2.5 Exp. 3: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist identisch zu dem in Experiment 2 (siehe S. 43).

Versuchdesign

Bei den in diesem Experiment verwendeten Störungen handelte es sich zum einen um eine **visuelle, positionsabhängige Störung** als visuelle Rotation um α = 60° im (V^-_{pos}) oder gegen den Uhrzeigersinn (V^+_{pos}). Zum anderen wurde durch das Manipulandum ein **geschwindigkeitsabhängiges Kraftfeld** im Uhrzeigersinn (F^-_{geschw}) generiert ($F^-_{geschw}[N] = -0{,}004 * Bewegungsgeschwindigkeit[mm/s]$). Die verwendeten Störungen unterschieden sich im Gegensatz zu Experiment 1 und 2 sowohl in ihrer Kinematik in Bezug auf die Hand, als auch in ihrer physikalischen Eigenschaft (visuell versus mechanisch).

Dieses Experiment war in 63 Episoden von 30 sek Dauer unterteilt. Die Probanden waren in insgesamt 4 Gruppen aufgeteilt und wurden wie in Experiment 1 nach 3 Episoden Grundbedingung ohne Diskordanz zwei Adaptationsphasen an unterschiedliche Störungen mit je 30 Episoden Dauer ausgesetzt. Die Pausenlänge zwischen den einzelnen Episoden betrug 5 sek. Zwischen den beiden Adaptationsphasen betrug die Pausendauer 5 min. Die gruppenspezifischen Abläufe sind der Tab. 16 zu entnehmen.

Tab. 16: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 3.

Gruppe	n	GB (3 Episoden)	AD1 (30 Episoden)	AD2 (30 Episoden)
$V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$	10	keine Diskordanz	V^-_{pos} (-60°)	F^-_{geschw}
$V^+_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$	10		V^+_{pos} (+60°)	F^-_{geschw}
$F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$	10		F^-_{geschw}	V^-_{pos} (-60°)
$F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$	10		F^-_{geschw}	V^+_{pos} (+60°)

Angegeben sind die jeweilige Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), 1. Adaptationsphase (AD1) und 2. Adaptationsphase (AD2). Die Auslenkungsrichtung ist mit + (im Uhrzeigersinn) bzw. – (gegen den Uhrzeigersinn) angegeben.

Statistische Auswertung

Für die Parameter $error_t$, Vel_{150}, $Dist_{150}$ und V_{max} wurde jeweils eine ANOVA mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode separat für die Störungen V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{geschw} gerechnet. Für die Störung V^-_{pos} / V^+_{pos} handelte es sich um eine 4 (alle V^-_{pos} / V^+_{pos}-Bedingungen) * 30 (Episode) ANOVA für die Störung F^-_{geschw} um eine 3 (alle F^-_{geschw}-Bedingungen) * 30 (Episode) ANOVA.

2.2.6 Exp. 3: Ergebnisse

$error_t$

Abb. 10a zeigt den Verlauf des mittleren Initialfehlers ($error_t$) separat für alle vier Bedingungen der Adaptation an die visuelle Rotation **V^-_{pos} / V^+_{pos}**. Wiederum zeigte sich typischerweise ein hoher Fehler zu Beginn der Adaptation für alle Bedingungen, der sich im Verlauf der Adaptation reduzierte. Zwischen den einzelnen Bedingungen zeigte sich ein vergleichbarer Unterschied wie schon in Experiment 1 und 2: Die in die entgegengesetzte Richtung an F^-_{geschw} voradaptierte Bedingung ($F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$) wies zu Beginn der Adaptation einen höheren Initialfehler auf als die naiven Bedingungen (V^-_{pos} / V^+_{pos}), während die in die gleiche Richtung an F^-_{geschw} voradaptierte Bedingung ($F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$) einen niedrigeren Intialfehler aufwies. Die Adaptationsverläufe der beiden naiven Bedingungen (V^-_{pos} und V^+_{pos}) wiesen keine großen Unterschiede auf. Entsprechend der Beobachtungen zeigte die gerechnete ANOVA einen signifikanten Effekt für den Innersubjektfaktor Episode, den Faktor Bedingung und deren Interaktion (Tab. 17). Der Post-hoc Test für den Faktor Bedingung zeigte, dass sich die naive Bedingung V^-_{pos} von der in die entgegengesetzte voradaptierte Bedingung ($F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$) unterschied. Die naive Bedingung V^+_{pos} unterschied sich nur von der in die

gleiche Richtung voradaptierten Bedingung ($F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$). Die beiden voradaptierten Bedingungen waren ebenfalls signifikant unterschiedlich (Tab. 18). Der Post-hoc Test der Interaktion (Episode * Bedingung) zeigte, dass sich die beiden naiven Bedingungen (V^-_{pos} / V^+_{pos}) von beiden voradaptierten Bedingungen zu Beginn der Adaptation unterschieden (s. Anhang).

In Abb. 10b sind die Ergebnisse des Verlaufs des mittleren Initialfehlers ($error_t$) separat für alle drei Bedingungen der Adaptation an die geschwindigkeitsabhängige Kraft $\mathbf{F^-_{geschw}}$ dargestellt. Die Verläufe der einzelnen Bedingungen waren vergleichbar mit denen der entsprechenden Bedingungen der Adaptation an die positionsabhängige Kraft F^-_{pos} aus Experiment 2 (s.o.). Allerdings war der Unterschied der voradaptierten Bedingungen zur naiven Bedingung noch deutlicher, so dass für die voradaptierte Bedingung in die gleiche Richtung ($V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$) ein deutlich ausgeprägter Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft als Überkompensation erkennbar war. Entsprechend wies die ANOVA einen signifikanten Effekt für den Innersubjektfaktor Episode, den Faktor Bedingung und deren Interaktion auf (Tab. 17). Der Post-hoc Test des Faktors Bedingung zeigte, dass sich alle Bedingungen signifikant voneinander unterschieden (Tab. 19). Die Ergebnisse des Post-hoc Tests der Interaktion (Episode * Bedingung) zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Bedingungen bis etwa zur Mitte der Adaptationsphase (s. Anhang).

Tab. 17: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 3) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{geschw}.

Effekt	**V^-_{pos}/V^+_{pos}**	**F^-_{geschw}**
Episode	F(29, 1044) = 264,15***	F(29, 1073) = 14,22***
Bedingung	F(3, 36) = 5,64**	F(2, 37) = 67,08***
Episode * Bedingung	F(87, 1044) = 4,05***	F(58, 1073) = 83,55***

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 18: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} (Exp. 3).

Bedingung	**V^-_{pos}** (AD1)	**V^+_{pos}** (AD1)	$F^-_{geschw} \rightarrow$ **V^-_{pos}** (AD2)	$F^-_{geschw} \rightarrow$ **V^+_{pos}** (AD2)
V^-_{pos} (AD1)		$p = 0{,}171^{n.s.}$	$p = 0{,}337^{n.s.}$	p = 0,006**
V^+_{pos} (AD1)	$p = 0{,}171^{n.s.}$		p = 0,023*	$p = 0{,}145^{n.s.}$
$F^-_{geschw} \rightarrow$ **V^-_{pos}** (AD2)	$p = 0{,}337^{n.s.}$	p = 0,023*		p = 0,000***
$F^-_{geschw} \rightarrow$ **V^+_{pos}** (AD2)	p = 0,006**	$p = 0{,}145^{n.s.}$	p = 0,000***	

Tab. 19: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für F^-_{geschw} (Exp. 3).

Bedingung	V^-_{geschw} (AD1)	$V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$ (AD2)	$V+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$ (AD2)
V^-_{geschw} (AD1)		p = 0,000***	p = 0,000***
$V^-_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$(AD2)	p = 0,000***		p = 0,000***
$V+_{pos} \rightarrow V^-_{geschw}$ (AD2)	p = 0,000***	p = 0,000***	

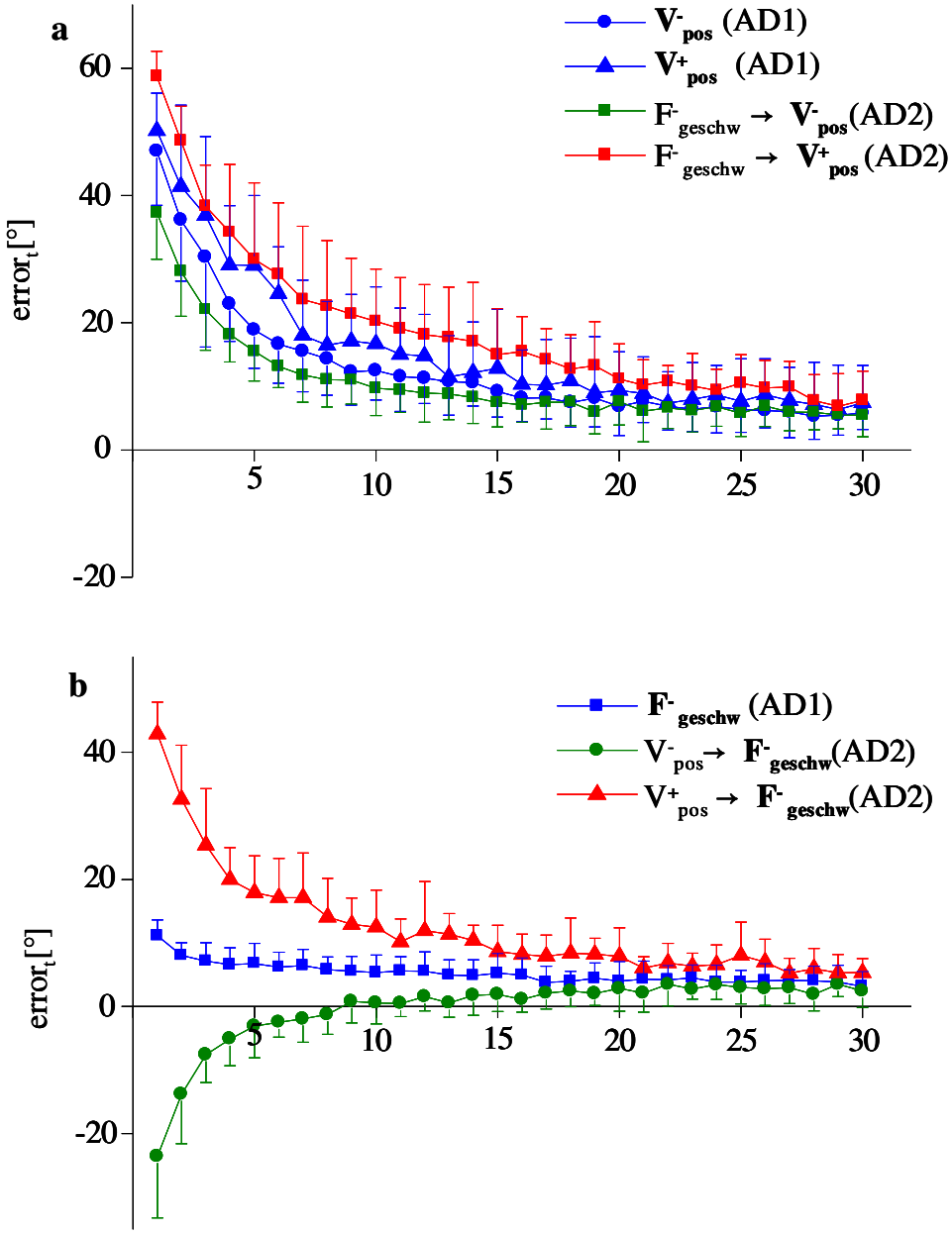

Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 3). Dargestellt sind die Mittelwerte über alle Probanden für jede Episode und deren Standardabweichungen. **a:** Verläufe der Adaptation an V^-_{pos} / V^+_{pos} naiv und voradaptiert und **b:** Verläufe der Adaptation an F^-_{geschw} naiv und voradaptiert.

$Dist_{150}$ / Vel_{150}

Weder für die zurückgelegte Distanz zum Zeitpunkt des Initialfehlers ($Dist_{150}$) für die Adaptation an die visuelle Rotation (V^-_{pos} / V^+_{pos}) noch für die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Initialfehlers (Vel_{150}) für die Adaptation an die geschwindigkeitsabhängige Kraft (F^-_{geschw}) konnten bedingungsspezifische Unterschiede festgestellt werden (s. Anhang). Somit wurden die bedingungsspezifischen Fehlerwinkel ($error_d$ und $error_v$) außer Betracht gelassen.

Vmax

Wie bei Experiment 2 waren auch hier bezüglich dieses Parameters keine relevanten Ergebnisse, die auf Unterschiede zwischen einzelnen Bedingungen hinwiesen, zu verzeichnen und somit wurde auf eine graphische Darstellung verzichtet. Die ANOVA der Störung $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ wies nur einen signifikanten Episodeneffekt auf (Tab. 20). Die ANOVA der Störung $\mathbf{F^-_{geschw}}$ zeigte ebenfalls einen signifikanten Episodeneffekt und zusätzlich eine signifikante Interaktion zwischen Episode * Bedingung. Der Post-hoc Test der Interaktion zeigte keine relevanten Ergebnisse. Zwischen den einzelnen Bedingungen unterschied sich nur jeweils eine Episode (s. Anhang).

Tab. 20: Ergebnisse der ANOVAs der V_{max} (Exp. 3) für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{geschw}.

Effekt	**V^-_{pos} / V^+_{pos}**	**F^-_{pos}**
Episode	$F(29, 1044) = 5{,}53^{***}$	$F(29, 1073) = 3{,}00^{***}$
Bedingung	$F(3, 36) = 0{,}58^{n.s.}$	$F(2, 37) = 1{,}13^{n.s.}$
Episode * Bedingung	$F(87, 1044) = 0{,}91^{n.s.}$	$F(58, 1073) = 2{,}71^{***}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

2.2.7 Exp. 1-3: Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente 1-3 gemeinsam diskutiert. Ziel dieser Experimente war die Feststellung gemeinsamer oder unterschiedlicher, möglicherweise interferierender adaptiver Mechanismen bei der Adaptation an verschiedene Arten von Diskordanzen. Dazu wurde der Transfer der Adaptation an unterschiedliche Störungsarten untersucht:

- In Experiment 1 waren es Störungen mit *gleichen physikalischen Eigenschaften* (beides visuelle Störungen) mit *unterschiedlicher kinematischer Kopplung* an die Handbewegung (positionsabhängig versus geschwindigkeitsabhängig) ,
- in Experiment 2 handelte es sich um Störungen mit *unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften* (visuell versus mechanisch), aber *gleicher kinematischer Kopplung* zu Handbewegung (beides positionsabhängig) und
- in Experiment 3 *unterschied*en sich die beiden Störungen sowohl in ihren *physikalischen Eigenschaften* (visuell versus mechanisch), als auch in ihrer *kinematischen Kopplung* zur Handbewegung (positionsabhängig versus geschwindigkeitsabhängig).

Während der naiven Adaptation der ersten Adaptationsphase zeigte der Initialfehler für alle verwendeten Störungen in allen drei Experimenten den aus der Literatur bekannten Verlauf in Form einer graduellen Fehlerreduktion ausgehend von einem anfänglichen Fehlerniveau entsprechend der jeweils verwendeten Störungsintensität. In **Experiment 1** ergibt sich bei Voradaptation an eine Störung in die gleiche Richtung ein signifikant niedrigerer und bei Voradaptation an die entgegengesetzte Richtung ein signifikant größerer Eingangsfehler als für die naive Adaptation. Dieses Muster zeigt sich sowohl für die Adaptation an die visuelle Rotation, als auch an die geschwindigkeitsabhängige visuelle Störung. Das Resultat der entgegengesetzt voradaptierten Bedingung entspricht den bekannten Ergebnisse aus der Literatur in Form einer Verschlechterung zu Beginn der Adaptation im Gegensatz zur naiven Adaptation (Tong et al. 2002; Bays et al. 2005). Isoliert betrachtet könnte dies wiederum als Hinweis auf interferierende Prozesse gedeutet werden. Jedoch spricht die Begünstigung der Adaptation in Folge der gleichgerichteten Voradaptation eindeutig gegen die Existenz interferierender adaptiver Prozesse. Wenn benötigte Ressourcen im Arbeitsgedächtnis während der zweiten Adaptation durch die vorangegangene Adaptation nicht ausreichend zur Verfügung stünden, würde auch die Voradaptation in die gleiche Richtung einen negativen Effekt auf die folgende Adaptation haben. Im Gegensatz dazu weisen die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass die angepasste sensomotorische Transformation während der ersten Adapta-

tionsphase zu Beginn der Adaptation an die nächste Störung den Ausgangspunkt darstellt und adäquat weiter verändert wird. Eine Adaptation in die entgegengesetzte Richtung führt somit zu einem schlechteren Ausgangspunkt während die Adaptation an die gleichgerichtete Störung zu einem verbesserten Ausgangspunkt verhilft.

Die Ergebnisse der **Experimente 2 und 3** weisen vergleichbare Transfermuster auf. Jedoch ist bei vergleichender Betrachtung der Ergebnisse aller Experimente auffällig, dass die Differenz zwischen den naiven und voradaptierten Gruppen störungsspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Diese scheint in Zusammenhang zu stehen mit der jeweiligen Adaptationsleistung der vorangegangenen Störung. Der deutlichste Unterschied zwischen Experiment 1 und den beiden anderen Experimenten zeigt sich im Verlauf der Adaptation an die Kraft (Exp. 2 & 3), wenn in die gleiche Richtung an die visuelle Rotation voradaptiert wurde. Diese Bedingung resultierte hier in einem Initialfehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft in Form einer Überkompensation. Dies ist erklärbar durch die Tatsache, dass in diesen beiden Experimenten das Ausmaß der visuellen Störungen deutlich höher war, als das der jeweils verwendeten mechanischen Störungen. Somit war auch das Ausmaß der Adaptation an die visuelle Rotation wesentlich größer. Folglich ist es möglich, dass die Überkompensation aus der Nutzung der während der vorangegangenen Adaptation ausgebildeten sensomotorischen Transformation resultiert.

Vergleichbar sind die Ergebnisse sukzessiver Adaptation an gleiche Störungsarten mit unterschiedlicher Intensität, die bei gleichgerichteten Störungen ebenfalls eine Begünstigung zeigten, beziehungsweise einen graduellen Übergang zwischen den Adaptationsphasen aufwiesen. (Abeele & Bock 2001b, Abeele & Bock 2001a, Bock et al. 2003, Lazar & Van Laer 1968). Wie auch in diesen Studien sind die Ergebnisse der Experimente 1-3 kompatibel mit der Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen, die demnach sowohl für Störungen mit unterschiedlicher kinematischer Kopplung (Experiment 1), unterschiedlicher physikalischer Natur (Experiment 2) oder beidem (Experiment 3) die Verarbeitung bestimmen. In diesem Zusammenhang ist jedoch die Studie von Krakauer et al. (1999) nochmals gesondert zu erwähnen. Wie schon in der Einleitung erläutert, konnte hier kein Einfluss der Adaptation an Störungen unterschiedlicher physikalischer Natur und unterschiedlicher kinematischer Kopplung gefunden werden. Der Unterschied der in diesem Fall verwendeten Störungen zu vorliegenden Experimenten wurde schon in der Einleitung erläutert und diskutiert (Kapitel 1.5, S. 13). Aufbauend darauf zeigt sich, dass diese Ergebnisse aufgrund der vorhandenen Differen-

zen in den Störungsnaturen nicht als inkompatibel mit den vorliegenden Ergebnissen anzusehen sind.

Neben der Annahme gemeinsamer adaptiver Prozesse bei der sukzessiven Adaptation muss bezüglich des vorliegenden Transfermusters eine weitere Interpretationsmöglichkeit diskutiert werden. Möglich wäre ebenfalls die parallele Existenz zweier Mechanismen in Form der Adaptation an die neue Störung und der gleichzeitigen Deadaptation der zuvor gelernten Störung. In diesem Fall wäre die Adaptationsleistung der zweiten Phase als die Summe von Deadaptation der ersten Phase und Adaptation an die zweite Phase zu verstehen. Diese Vermutung kann durch die Ergebnisse der **Annahmen in Experiment 1** (siehe Kapitel 2.2.2, S. 44) teilweise bestätigt werden. Für die Adaptation an entgegengesetzt gerichtete Störungen unterscheidet sich die Annahme nicht von den realen Daten, was bedeutet, dass eine Existenz von zwei Prozessen, nämlich Adaptation und Deadaptation nicht auszuschließen ist. Im Gegensatz dazu konnte für die gleichgerichteten Störungen jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen Prognose und Realität gefunden werden. Somit kann die Frage nach gemeinsamen oder voneinander unterschiedlichen Mechanismen nicht eindeutig geklärt werden. Eine sinnvolle Interpretation ist, das sensomotorische System als ein flexibles, intelligentes System zu betrachten, so dass profitable Informationen bewahrt werden, während hindernde Informationen verworfen werden.

In einer weiteren Untersuchungsgruppe adaptierten die Probanden episodenweise alternierend an die positionsabhängige Kraft und die visuelle Rotation gleicher Polarität. Als Ergebnis konnte eine um ca. 50% verkürzte Zeitkonstante für die alternierende Adaptation im Gegensatz zur phasenweisen Adaptation gefunden werden. Auf den ersten Blick ist dieses Ergebnis ein verlässlicher Hinweis auf die Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen, so dass das zuvor Gelernte weiter genutzt wurde. Allerdings schließt auch dieses Ergebnis die Möglichkeit der Adaptation und gleichzeitigen Deadaptation der vorangegangenen Störung innerhalb der einzelnen Episoden nicht aus, liefert jedoch einen weiteren Beweis gegen die Existenz interferierender Prozesse auch während der sequentiellen Adaptation in kürzeren Intervallen.

Einen weiteren Hinweis auf die Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen liefert die Adaptation ohne visuelle Rückmeldung an die positionsabhängige Kraft nach der Adaptation an die visuelle Rotation (**Exp. 2**). Der anfängliche Fehler entgegengesetzt zur wirkenden

Kraft wird während der Adaptationsphase nicht wie in der Gruppe mit visueller Rückmeldung reduziert, sondern bleibt bis zum Ende bestehen. Folglich kann definitiv *nicht* von einer erfolgten Deadaptation der ersten Adaptation ausgegangen werden. In der Studie von Bock et al. (2005a) wird deutlich, dass unter Normalbedingung ohne Störung Zeigebewegungen ohne visuelle Rückmeldung im Anschluss an eine erfolgte Adaptation (Persistenztest) eine kontinuierliche Deadaptation zur Folge haben. Der kalibrierte Zusammenhang von Propriozeption und visueller Rückmeldung durch die Adaptation an die Rotation bleibt jedoch bis zum Ende der folgenden Adaptationsphase an die Kraft bestehen und die Adaptation an die Kraft wird aufaddiert. Durch mangelnde visuelle Rückmeldung wird die Position nicht korrigiert. Resultierend kann man in diesem Fall von der Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen ausgehen. Dieser Nachweis kann jedoch nur erbracht werden, wenn sich die jeweiligen Störungen in ihrer physikalischen Natur unterscheiden, also wenn es sich zum einen um eine visuelle und zum anderen um eine mechanische Störung handelt. Denn entscheidend ist, dass während der ersten Phase der Zusammenhang zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung verändert wird und die visuelle Rückmeldung während der folgenden Adaptation ausgeschaltet werden kann. Es besteht die Möglichkeit, dass sich Verarbeitungsprozesse in Abhängigkeit der Präsenz der visuellen Rückmeldung unterschiedlich verhalten, so dass die Generalisierung dieses Befundes auf andere Umstände nicht zwingend möglich ist.

Während der *naiven* Adaptation an die mechanische positionsabhängige Störung (Exp. 2) unterschied sich der Verlauf ohne visuelle Rückmeldung nicht von dem mit visueller Rückmeldung. Ähnliche Ergebnisse fanden Tong et al. (2002) ebenfalls bei der Adaptation an eine positionsabhängige Kraft und Franklin et al. (2007) bei der Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft. Der Transfer auf die visuelle Rotation war ebenfalls durch die fehlende visuelle Rückmeldung nicht beeinträchtigt. Sowohl die oben diskutierten Ergebnisse, als auch dieses Ergebnis lassen vermuten, dass die visuelle Rückmeldung als gemeinsamer Bezugspunkt bei unterschiedlichen Störungen nicht für Transfereffekte verantwortlich ist.

Die Betrachtung der **maximalen Bewegungsgeschwindigkeit** zeigt, dass einzig in Abhängigkeit von der Adaptation an die visuelle geschwindigkeitsabhängige Störung die Bewegungsgeschwindigkeit signifikant verlangsamt wurde. Während der Adaptation an die Rotation um 60° (**Exp. 1**) stieg die Geschwindigkeit sogar nach den ersten Episoden leicht an. Dieser Anstieg ist kompatibel mit der zunehmenden Adaptation an die Störung und der damit einhergehenden zunehmenden Automatisierung und Bewegungssicherheit. Ein Abfall der

Geschwindigkeit, wie er sich bei der Adaptation an die visuelle geschwindigkeitsabhängige Störung zeigt, erscheint zunächst nicht logisch. Allerdings kann dieser signifikante Abfall über den langen Zeitraum als Kompensationsstrategie zur Reduzierung des Fehlers bei der geschwindigkeitsabhängigen Störung erklärt werden. Die dennoch nur sehr geringe Adaptationsleistung an diese Störung lässt vermuten, dass die Adaptation mit einer höheren Schwierigkeit verbunden ist, als die an alle anderen Störungen.

Eine nachträgliche, nicht in den Ergebnissen dargestellte Betrachtung der Zeitkonstanten der naiven Adaptation an die in den Experimenten 1-3 verwendeten Störungen zeigte störungsspezifische Unterschiede im Zeitgang, die aber keiner Regel folgten. Generell höhere Zeitkonstanten für visuelle Störungen als für mechanische Störungen oder höhere Zeitkonstanten für geschwindigkeitsabhängige Störungen als positionsabhängige Störungen konnten nicht gezeigt werden. Somit kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die Adaptation an visuelle Störungen schwieriger ist als an mechanische, oder die Adaptation an geschwindigkeitsabhängige Störungen schwieriger ist als an positionsabhängige. Bezogen auf die Fragestellung nach der Verarbeitung der Adaptation an Corioliskräfte und robotische Kräfte wird das Argument unterschiedlicher Zeitkonstanten während der Adaptation als ein wesentliches Merkmal für die Existenz unterschiedlicher Verarbeitungsmechanismen verstanden (Lackner & DiZio 2005). Vorliegende Ergebnisse der durchgeführten Experimente sprechen gegen diese Schlussfolgerung.

Zusammenfassend konnte die generelle Existenz interferierener Prozesse bei der Adaptation an Störungen unterschiedlicher Art widerlegt werden. Allerdings liefern die Ergebnisse keine eindeutigen Hinweise auf gemeinsame Verarbeitungsprozesse als grundsätzlichen Algorithmus. Vielmehr denkbar ist ein flexibles System, welches in der Lage ist, verschiedene Störungen charakterisiert durch unterschiedliche physikalische und/oder kinematische Bedingungen adäquat unter Berücksichtigung der Ausgangslage zu verarbeiten. In Studien, die sich mit intermanuellem Transfer beschäftigen, finden sich bestätigende Erkenntnisse (Sainburg & Wang 2002, Wang & Sainburg 2003). Hier wurden Probanden nach der Adaptation mit einem Arm mit dem anderen Arm einer zweiten Störung, die entweder in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung zur ersten agierte, ausgesetzt. Die folgende Adaptation mit dem anderen Arm zeigte einen signifikanten Vorteil, wenn beide Störungen die gleiche Polarität besaßen. Bei entgegengesetzter Polarität konnte kein Transfer auf die ungeübte Hand gefunden werden. Somit kann vermutet werden, dass positive Effekte im Gegensatz zu negativen Effekten

ausgenutzt werden, indem auf zuvor Gelerntes zugegriffen wird. Ebenfalls unterschiedliche Ergebnisse, die ein flexibles System vermuten lassen, finden sich in Studien, die die Möglichkeit des „contextual cueing“ beschreiben (Bock et al. 2005c, Galea & Miall 2006, Gandolfo et al. 1996, Ghahramani & Wolpert 1997, Osu et al. 2004).

2.3 Experimente 4-5 (Coriolis)

2.3.1 Exp. 4: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten handelte es sich bei diesem Experiment nicht um ein Transferexperiment, so dass die Probanden nur jeweils einer Adaptationsphase, an die sich eine Deadaptationsphase anschloss, ausgesetzt wurden. Die Ausführung der Zeigebewegungen fand wie bei den vorherigen Experimenten mit dem Endsegment eines ähnlichen, jedoch größeren robotischen Manipulandums (PHANTOM^{TM} Premium Haptic Device 3.0, Sensable Technologies. Inc.) statt (Auflösung: 0,028 cm; Abtastrate: 60 Hz). Der Cursor war ein weißes Fadenkreuz (ø 8 mm). Die Bewegungsamplitude zwischen dem roten zentral gelegenen Starpunkt (St) (ø 8 mm) und den acht gelben Zielpunkten (ø 8 mm) betrug 6 cm. Die Zielpunkte wurden für jeweils 700 ms präsentiert und der Startpunkt erlosch 500 ms nach Deckungsgleichheit mit dem Cursor.

Versuchsdesign

Das Experiment war in insgesamt 28 Episoden von 30 sek Dauer unterteilt. Nach 3 Episoden Grundbedingung ohne Diskordanz folgten 20 Episoden als Adaptationsphase und 5 Episoden ohne Diskordanz als Deadaptationsphase. Die Pausenlänge zwischen den einzelnen Episoden betrug 5 sek und zwischen Grundbedingung, Adaptations- und Deadaptationsphase jeweils 20 sek. Während der Adaptationsphase waren die Probanden einem geschwindigkeitsabhängigen Kraftfeld gegen den Uhrzeigersinn (F^{+}_{geschw}) ausgesetzt ($F^{+}_{geschw}[N] = c * Bewegungsgeschwindigkeit\ [mm/s]$), wobei die Konstante c je nach Gruppe entweder 0,012 oder 0,006 betrug.

Die Probanden waren in insgesamt 4 Gruppen unterteilt, wobei zum einen die Intensität des Kraftfeldes während der Adaptationsphase und zum anderen die Verbindung des agierenden Arms mit dem Endsegment des Roboters manipuliert wurden. Die Hälfte der Probanden war einem Kraftfeld mit einer Intensität von 12 N/m/s (c = 0,012) und die andere Hälfte einem Kraftfeld mit einer Intensität von 6 N/m/s (c = 0,006) ausgesetzt. Darüber hinaus war die Hälfte der Probanden über eine am Handgelenk befestigte Manschette und die andere Hälfte über das Halten des stiftähnlichen Endes des Roboters mit diesem verbunden. Der gruppenspezifische Ablauf ist in Tab. 21 dargestellt.

Tab. 21: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 4.

Gruppe	n	GB (3 Episoden)	AD (20 Episoden)	DE-AD (5 Episoden)
F^{+}_{geschw}-Stift(12)	8	keine Diskordanz	F^{+}_{geschw} (12N/m/s)	keine Diskordanz
F^{+}_{geschw}-Stift(6)	8		F^{+}_{geschw} (6N/m/s)	
F^{+}_{geschw}-Mansch(12)	8		F^{+}_{geschw} (12N/m/s)	
F^{+}_{geschw}-Mansch(6)	8		F^{+}_{geschw} (6N/m/s)	

Angegeben sind die jeweilige Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl, Episodenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), Adaptationsphase (AD1) und Deadaptationsphase (DE-AD).

Statistische Auswertung

Für die Parameter $error_t$ und Vel_{150} wurde über alle vier Gruppen gemeinsam jeweils eine ANOVA mit den Faktoren Kraft (6 N/m/s und 12 N/m/s) und Werkzeug (Stift und Manschette) und dem Innersubjektfaktor Episode für die Adaptationsphase (2 (Kraft) * 2 (Werkzeug) * 20 (Episode)) und die Deadaptationsphase (2 (Kraft) * 2 (Werkzeug) * 5 (Episode) gerechnet.

Zusätzlich wurden die Zeitkonstante t der Adaptationsphase für jede Gruppe ermittelt. Dazu wurde mit Hilfe des Programms ORIGIN® 7 jeweils eine nichtlineare Regression mit folgender exponentieller Formel über die Gruppenmittelwerte des Parameters $error_t$ angepasst:

$$y = y_0 + Ae^{-x/t},$$

wobei y_0 das Plateau und A das Offset der Exponentialfunktion repräsentiert.

2.3.2 Exp. 4: Ergebnisse

Initialfehler ($error_t$)

Zu Beginn der **Adaptationsphase** war erwartungsgemäß für alle Gruppen ein deutlicher Fehler in Richtung der wirkenden Kraft erkennbar, der sich im Laufe der Adaptationsphase wieder reduzierte (Abb. 11). Diese Beobachtung wurde durch die Ergebnisse der ANOVA bestätigt, die einen signifikanten Effekt von Episode ergab. Sowohl die Größe des Initialfehlers zu Beginn der Adaptation als auch die Zeitkonstanten der Adaptation unterschieden sich zwischen den einzelnen Gruppen. Die Gruppen mit größerer Kraft (F^+_{geschw}-Stift(12) und F^+_{geschw}-Mansch(12)) begannen mit einem größeren Initialfehler. Zusätzlich wiesen diese Gruppen längere Zeitkonstanten während der Adaptationsphase auf als die Gruppen mit der kleineren Kraft (F^+_{geschw}-Stift(6) und F^+_{geschw}-Mansch(6)) (Abb. 12). Die ANOVA bestätigte diese Beobachtungen mit einem signifikanten Effekt des Faktors Kraft (Tab. 22). Ein weniger deutlich ausgeprägter Unterschied war ebenfalls zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Werkzeugen zu erkennen, wobei die Nutzung des Stifts (F^+_{geschw}-Stift(6) und F^+_{geschw}-Stift(12)) in einem höheren Initialfehler zu Beginn der Adaptation resultierte. Dieser Unterschied wurde ebenfalls durch die ANOVA mit einem signifikanten Effekt des Faktors Werkzeug bestätigt (Tab. 22). Die jeweiligen Interaktionen beider Faktoren mit dem Innersubjektfaktor Episode waren ebenfalls signifikant. Der jeweilige Post-hoc Test zeigte einen signifikanten Unterschied für die Interaktion Episode * Kraft bis einschließlich zur 14. Episode und für die Interaktion Episode * Werkzeug bis einschließlich zur 4. Episode und zusätzlich in vereinzelten Episoden (7, 9, 10 und 16).

Zu Beginn der **Deadaptation** zeigte sich für alle Gruppen ein deutlicher Fehler in die entgegengesetzte Richtung zur zuvor wirkenden Kraft, der sich im Zeitverlauf reduzierte. Dies wurde durch den signifikanten Episodeneffekt der ANOVA bestätigt (Tab. 22). Wie während der Adaptation wiesen die Gruppen mit der großen Kraft zu Beginn der Deadaptation einen größeren Fehler auf. Dies wurde durch einen signifikanten Effekt des Faktors Kraft bestätigt (Tab. 22). Die Interaktion zwischen Episode * Kraft war ebenfalls signifikant und der gerechnete Post-hoc Test zeigte einen signifikanten Unterschied bis einschließlich zur 3. Episode. Weder der Faktor Werkzeug noch die Interaktion Episode * Werkzeug waren signifikant. Die Interaktion zwischen Kraft * Werkzeug war signifikant. Der Post-hoc Test wies einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen der großen Kraft und der kleinen Kraft auf (s. Anhang).

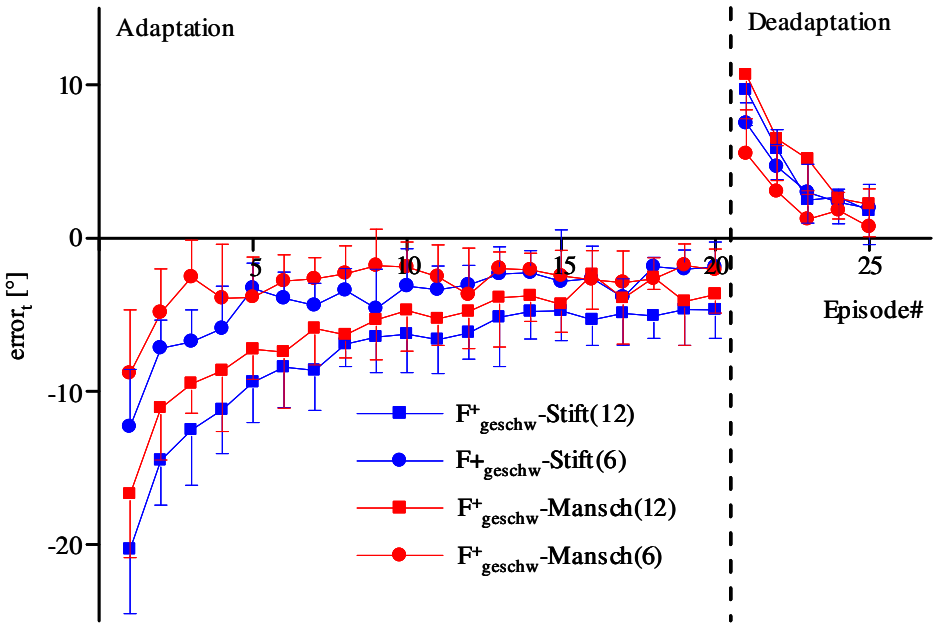

Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ (Exp. 4). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung separat für alle vier Gruppen für die Adaptations- und Deadaptationsphase.

Tab. 22: Ergebnisse der ANOVAs des error$_t$ (Exp. 4) für die Adaptations- und Deadaptationsphase.

Effekt	Adaptation	Deadaptation
Episode	F(19, 532) = 70,2***	F(4, 112) = 85,44***
Kraft (6, 12)	F(1, 28) = 29,99***	F(1, 28) = 30,25***
Werkzeug (Stift, Mansch)	F(1, 28) = 9,39**	F(1, 28) = 0,04$^{n.s.}$
Episode * Kraft	F(19, 532) = 8,27***	F(4, 112) = 4,8**
Episode * Werkzeug	F(19, 532) = 2,33*	F(4, 112) = 0,46$^{n.s.}$
Kraft * Werkzeug	F(1, 28) = 0,08$^{n.s.}$	F(1, 28) = 6,53*
Episode * Kraft * Werkzeug	F(19, 532) = 0,93$^{n.s.}$	F(4, 112) = 1,62$^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für die Faktoren Kraft und Werkzeug, den Innersubjektfaktor Episode und die Interaktionen.

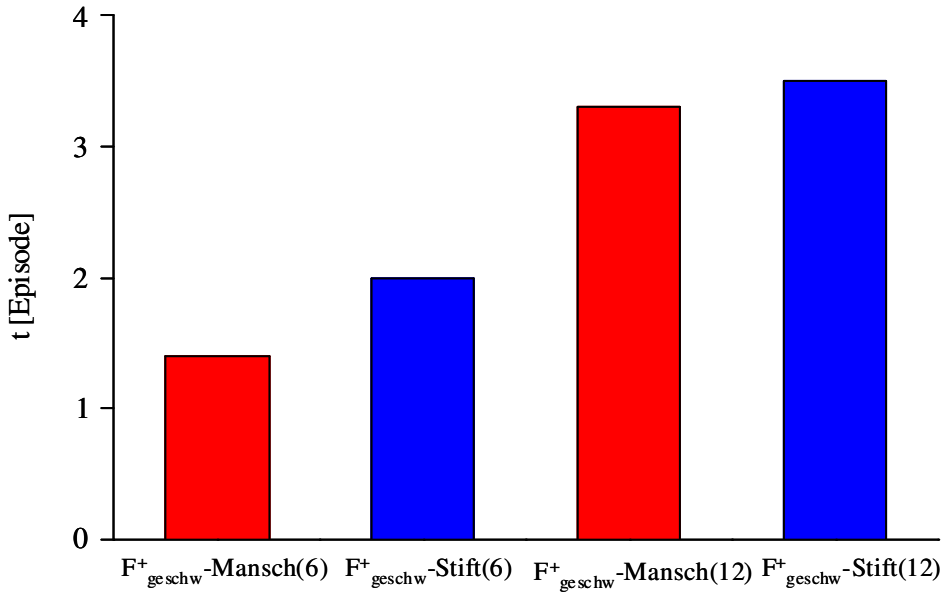

Abb. 12: Zeitkonstanten (t) der Adaptationsphasen über die Gruppenmittelwerte des Parameters $error_t$ (Exp.4).

Vel_{150}

Für den Parameter Vel_{150} konnten keine signifikanten Gruppenunterschiede festgestellt werden (s. Anhang), so dass der $error_t$ als valider Parameter angenommen werden kann und der bedingungsspezifische Fehlerwinkel $error_v$ außer Betracht gelassen wurde.

2.3.3 Exp. 5: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

Dieses Experiment stellte bezüglich des allgemeinen Aufbaus eine Ausnahme dar. Wie bei allen anderen Experimenten hatten die Probanden die Aufgabe, so schnell und so genau wie möglich Zeigebewegung zu verschiedenen Zielpositionen auf einer horizontalen Arbeitsfläche durchzuführen. Dabei wurden bogenförmige Bewegungen ausgeführt, so dass die Arbeitsfläche nur an Start- und Zielposition berührt wurde. Währenddessen saßen die Probanden in einem Stuhl, der im Zentrum einer rotierenden Plattform befestigt war. Der Oberkörper und der Kopf der Probanden waren mit Gurten fixiert, um Bewegungen unabhängig vom Stuhl zu vermeiden. In unmittelbarer Körpernähe auf mittlerer Höhe des Oberkörpers war die horizontale Arbeitsfläche angebracht, auf der ein Druckschalter (1 cm * 2 cm) nahe der Körpermitte als Startposition (St) jeder Bewegung angebracht war (Abb. 13). Durch den Schalter wurde an dieser Position eine taktile Rückmeldung gewährleistet. In einem jeweiligen Abstand von 35

cm zur Startposition waren 3 rote LEDs als Zielpositionen installiert, die keine taktile Rückmeldung zuließen. Die Zielpositionen lagen 20° auseinander gemessen vom Startpunkt. Jedes Ziel leuchtete für 150 ms auf. 400 ms später ertönte ein akustisches Signal welches den Probanden die maximal zugelassene Dauer einer Zielbewegung verdeutlichte. Nach jeweiligem Erreichen der Startposition wurde durch den Versuchsleiter die Präsentation des nächsten Zielpunktes ausgelöst. Um die direkte visuelle Bewegungsrückmeldung zu vermeiden wurde das Experiment in kompletter Dunkelheit durchgeführt. Vor der Arbeitsfläche wurde je nach Versuchsbedingung ein robotisches Manipulandum (PHANTOM™ Premium Haptic Device 3.0, Sensable Technologies. Inc.) positioniert.

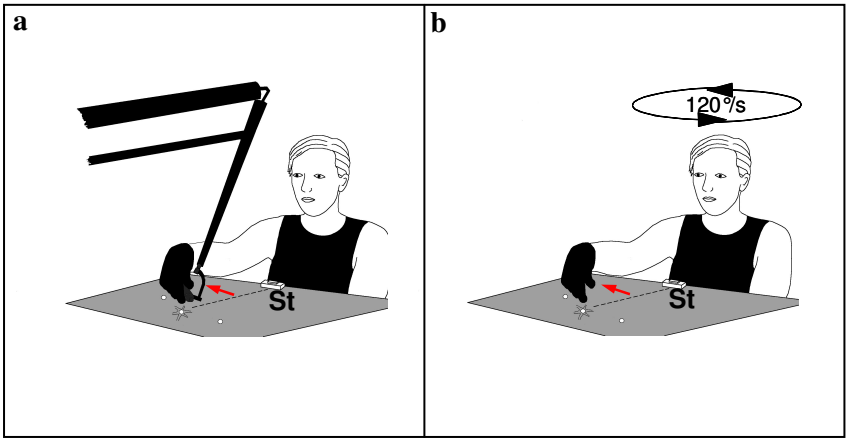

Abb. 13: Darstellung des Versuchsaufbaus von Exp. 5. Die Probanden führten Zeigebewegungen von einer Startposition (St) zu drei verschiedenen Zielpositionen (Z) durch. Dabei hielten sie entweder **a:** das stiftähnliche Ende des Roboterarms in der Hand oder **b:** bewegten die Hand frei und wurden dabei zeitweise mit einer Winkelgeschwindigkeit von 120°/s rotiert.

Versuchsdesign

Die Zeigebewegungen wurden entweder unter aktivem Greifen des Roboterarms oder mit dem Zeigefinger durchgeführt (Abb. 13). Während der Benutzung des Roboters blieb die Plattform stationär. Der Roboter war so programmiert, dass entweder keine Kraft wirkte (Grundbedingung Roboter) oder eine geschwindigkeitsabhängige Kraft im Uhrzeigersinn appliziert wurde (Adaptation Roboter) *(F[N] = 0,00375 * Bewegungsgeschwindigkeit[mm/s]).*

Die Kraftintensität wurde anhand von Pilotuntersuchungen festgelegt, so dass die Auslenkung bei der initialen Bewegungsausführung mit dem Manipulandum mit der Auslenkung unter

Einfluss der Corioliskraft (s.u.) vergleichbar war. Die jeweilige Handposition wurde durch den Roboter registriert (s.o.).

Während der Bedingungen ohne Roboter wurden die Zeigebewegungen mit dem rechten Zeigefinger im freien Raum durchgeführt. Zum einen blieb die Plattform dabei ebenfalls stationär (Grundbedingung Coriolis) und zum anderen rotierte die Plattform mit einer Geschwindigkeit von 120°/s, wodurch eine Corioliskraft erzeugt wurde (Adaptation Coriolis). Die Startposition jeder Bewegung befand sich nahezu im Zentrum der Rotation, so dass sich bei jeder Zielbewegung der Arm vom Zentrum entfernte. Diese Armbewegung unter Rotation hatte zur Folge, dass der Arm durch den wirkenden Corioliseffekt senkrecht zur Bewegungsrichtung ausgelenkt wurde. Die ersten 30 sek der Rotation nachdem die Plattform die gewünschte Geschwindigkeit erreicht hatte sowie die ersten 30 sek nach Stoppen der Rotation dienten als Gewöhnungsphasen, in denen sich das vestibuläre System an die jeweilige Situation anpassen sollte und keine Zeigebewegungen durchgeführt wurden. Die jeweilige Handposition wurde in den Coriolisbedingungen durch eine optoelektronische Aufzeichnungselektronik registriert (Coda^{TM} Motion Analysis System, Charnwoods Dynamics, UK) mit einer Auflösung von 0,01 cm und einer Abtastrate von 400 Hz. Dazu war eine Infrarotkamera 2 Meter über der Arbeitsfläche angebracht, die die Position eines am Zeigefinger befestigten Sensors registrierte.

Nach 20 Übungsbewegungen ohne Aufzeichnungen folgten 7 Blöcke mit jeweils 21 Bewegungen, also insgesamt 147 Bewegungen. Dazu erschienen die 3 Ziele jeweils 7 Mal pro Block in einer pseudo-randomisierten Reihenfolge. Die Probanden wurden in zwei Gruppen aufgeteilt, bei denen die Reihenfolge der einzelnen Blöcke manipuliert wurde. Nach zwei Blöcken Grundbedingung ohne Störung folgten 3 Blöcke Adaptationsphase. Dabei wurde die störende Kraft entweder durch das Manipulandum (Adaptation Roboter) oder durch die rotierende Plattform erzeugt (Adaptation Corioliskraft). Die letzten beiden Blöcke dienten als Deadaptationsphasen und beinhalteten wie die Grundbedingung keine Störung. Der genaue gruppenspezifische Ablauf ist in Tab. 23 aufgezeigt.

Tab. 23: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 5.

Gruppe	n	Grundbedingung		Adaptation			Deadaptation	
		Block1	Block2	Block3	Block4	Block5	Block6	Block7
Cor → Rob	7	1-R-GB	2-C-GB	1-C-AD	2-R-AD	3-C- AD	1-C-DE	2-R-DE
Rob → Cor	7	1-C-GB	2-R-GB	1-R- AD	2-C-AD	3-R- AD	1-R-DE	2-C-DE

Angegeben sind die jeweilige Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung, Adaptationsphase und Deadaptationsphase. Die einzelnen Phasen waren in Blöcke mit jeweils 21 Bewegungen unterteilt.

Statistische Auswertung

Wie bei allen Experimenten wurden die Grundbedingungen sowohl für die Darstellung der Ergebnisse, als auch für die statistische Auswertung außer Acht gelassen. Somit beschreiben die Ergebnisse die Blöcke 3-7. Allerdings wurde der verwendete Parameter $error_t$ separat für beide Bedingungen (Roboter und Coriolis) auf die jeweiligen letzten 4 Bewegungen der Grundbedingung normiert. Diese Normierung wurde getrennt für jede der drei Richtungen vorgenommen, das heißt, dass der Fehler der Adaptations- und Deadaptationsphase jeweils sowohl richtungsspezifisch, als auch bedingungsspezifisch normiert wurde. Zusätzlich wurde über die 21 Bewegungen jedes Blocks (Blöcke 3-7) der gleitende Mittelwert über jeweils 2 Bewegungen berechnet, so dass 20 Datenpunkte pro Block dargestellt und statistisch verwertet wurden. Für den Parameter $error_t$ wurde eine 2 (Gruppe) * 5 (Block) * 20 (Bewegung) ANOVA gerechnet. Zusätzlich wurde für den Parameter Vel_{150} eine 2 (Gruppe) * 3 (Block) * 20 (Bewegung) ANOVA über die Adaptationsblöcke gerechnet.

2.3.4 Exp. 5: Ergebnisse

Initialfehler ($error_t$)

Die gerechnete ANOVA wies einen signifikanten Effekt für die Interaktion Block * Bewegung, Block * Gruppe und Block * Bewegung * Gruppe auf (Tab. 24). Alle anderen Effekte waren nicht signifikant. Essentiell war vor allem das Ergebnis der Interaktion Block * Gruppe. Die relevante extrahierte Ergebnisse des diesbezüglichen Post-hoc Tests sind in Tab. 25 dargestellt und werden im Folgenden zusammen mit der Ergebnisbeschreibung getrennt für Adaptations- und Deadaptationsphase näher erläutert.

Tab. 24: Ergebnisse der ANOVA des $error_t$ (Exp.5).

Effekt	**$error_t$**
Gruppe	$F(1,11) = 4,03^{n.s.}$
Block	$F(4,44) = 2,31^{n.s.}$
Block * Gruppe	$F(4,44) = 2,61^{*}$
Bewegung	$F(19,209) = 0,72^{n.s.}$
Bewegung * Gruppe	$F(19,209) = 0,76^{n.s.}$
Block * Bewegung	$F(76,836) = 6,16^{***}$
Block * Bewegung * Gruppe	$F(76,836) = 1,81^{***}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe, die Innersubjektfaktoren Bewegung und Block und die Interaktionen.

Tab. 25: Relevante extrahierte Ergebnisse des Post-hoc Tests der signifikanten Interaktion Block * Gruppe des $error_t$ (Exp.5).

Block * Gruppe	
1-R-AD / 1-C-AD	$p = 0,022^{*}$
1-R-AD / 2-R-AD	$p = 0,013^{*}$
1-C-AD / 2-C-AD	$p = 0,950^{n.s.}$
1-C-AD / 3-C-AD	$p = 0,021^{*}$
1-R-AD / 3-R-AD	$p = 0,104^{n.s.}$
1-R-DE / 1-C-DE	$p = 0,821^{n.s.}$
2-R-DE / 2-C-DE	$p = 0,141^{n.s.}$

1. Adaptationsphase

Vergleich der ersten und zweiten Adaptationsblöcke (Blöcke 3 und 4)

Die Ergebnisse des Initialfehlers $error_t$ sind in Abb. 14 graphisch dargestellt. Während des ersten Blocks der Adaptation stieg in beiden Gruppen der Fehler erwartungsgemäß an und reduzierte sich im Verlauf der Adaptation wieder. Es wird deutlich, dass zu Beginn der Adaptation in Block 1-R-AD und 1-C-AD der Fehler nahezu gleich groß war. Jedoch unterscheidet sich der zeitliche Verlauf beider Bedingung insofern, dass sich der Fehler in der Bedingung 1-R-AD langsamer reduzierte als in 1-C-AD. Zusätzlich endete der Fehler in der Bedingung 1-C-AD leicht überkompensiert. Dieser Unterschied konnte durch den Post-hoc Test der Interaktion Block * Gruppe mit einem signifikanten Unterschied der Blöcke 1-R-AD und 1-C-AD bestätigt werden (Tab. 25).

Vergleicht man den ersten und zweiten Adaptationsblock innerhalb der Bedingungen (Rob und Cor) so ist für die Bedingung Rob zu erkennen, dass der Fehler zu Beginn von 2-R-AD (Gruppe 2) nicht wie bei 1-R-AD (Gruppe 1) anstieg, sondern während des gesamten Blocks ungefähr zwischen 0° und 8° pendelte. Dieser Unterschied konnte durch den Post-hoc Test der Interaktion Gruppe * Block mit einem signifikanten Unterschied der Blöcke 1-R-AD und 2-R-AD bestätigt werden (Tab. 16). Im Gegensatz dazu waren der Verlauf und die Größe des Initialfehlers der Blöcke 1-C-AD (Gruppe 2) und 2-C-AD (Gruppe 1) nahezu identisch, so dass sich für diese Blöcke kein signifikanter Effekt zeigte (Tab. 25).

Vergleich der ersten und dritten Adaptationsblöcke (Blöcke 3 und 5)

Der Verlauf von Block 3-R-AD (Gruppe 1) unterschied sich von Block 1-R-AD in vergleichbarer Weise wie schon Block 2-R-AD (Gruppe 2). Allerdings konnte kein signifikanter Unterscheid zwischen den Blöcken 1-R-AD und 3-R-AD bestätigt werden (Tab. 25). Jedoch zeigten die Ergebnisse des Post-hoc Test der Interaktion Block * Bewegung * Gruppe einen signifikanten Unterschied für die Bewegungen 1-5. Der Verlauf des Initialfehlers des Blocks 3-C-AD ähnelte dem Block 1-C-AD. Allerdings war der Fehler zu Beginn des Blocks 3-C-AD deutlich höher und stieg im Verlauf dieses Blocks immer weiter in Gegenrichtung zur wirkenden Kraft an. Es bestätigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Blöcken (Tab. 25).

2. Deadaptationsphase

Zu Beginn des ersten Blocks der Deadaptation war als Nacheffekt sowohl für 1-R-DE, als auch für 1-C-DE ein Anstieg des Intitialfehlers in Gegenrichtung zur vorher wirkenden Kraft zu erkennen. In beiden Fällen reduzierte sich der Fehler im Verlauf des Blocks wieder ungefähr auf 0°. Der Post-hoc Test der Interaktion Bewegung * Block * Gruppe bestätigte diese Fehlerreduktion für beide Blöcke mit dem Ergebnis, dass sich die jeweils ersten 3 Bewegungen innerhalb eines Blocks von allen anderen folgenden Bewegungen signifikant unterschieden. Der Unterschied zwischen den Blöcken 1-R-DE und 1-C-DE war nicht signifikant (Tab. 25). In Block 7 war für beide Bedingungen (Rob und Cor) keine weitere bedeutsame Veränderung des Fehlerniveaus erkennbar. Beide Gruppen scheinen somit nach dem ersten Block jeweils deadaptiert gewesen zu sein, obwohl die beiden Blöcke der Deadaptation innerhalb einer Gruppe jeweils die unterschiedlichen Bedingungen beinhalteten. Der Post-hoc Test der Interaktion Block * Bewegung * Gruppe wies für den zweiten Block in beiden Gruppen kei-

nerlei Unterschiede zwischen den Episoden auf. Die Blöcke 2-R-DE und 2-C-DE waren ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich (Tab. 25).

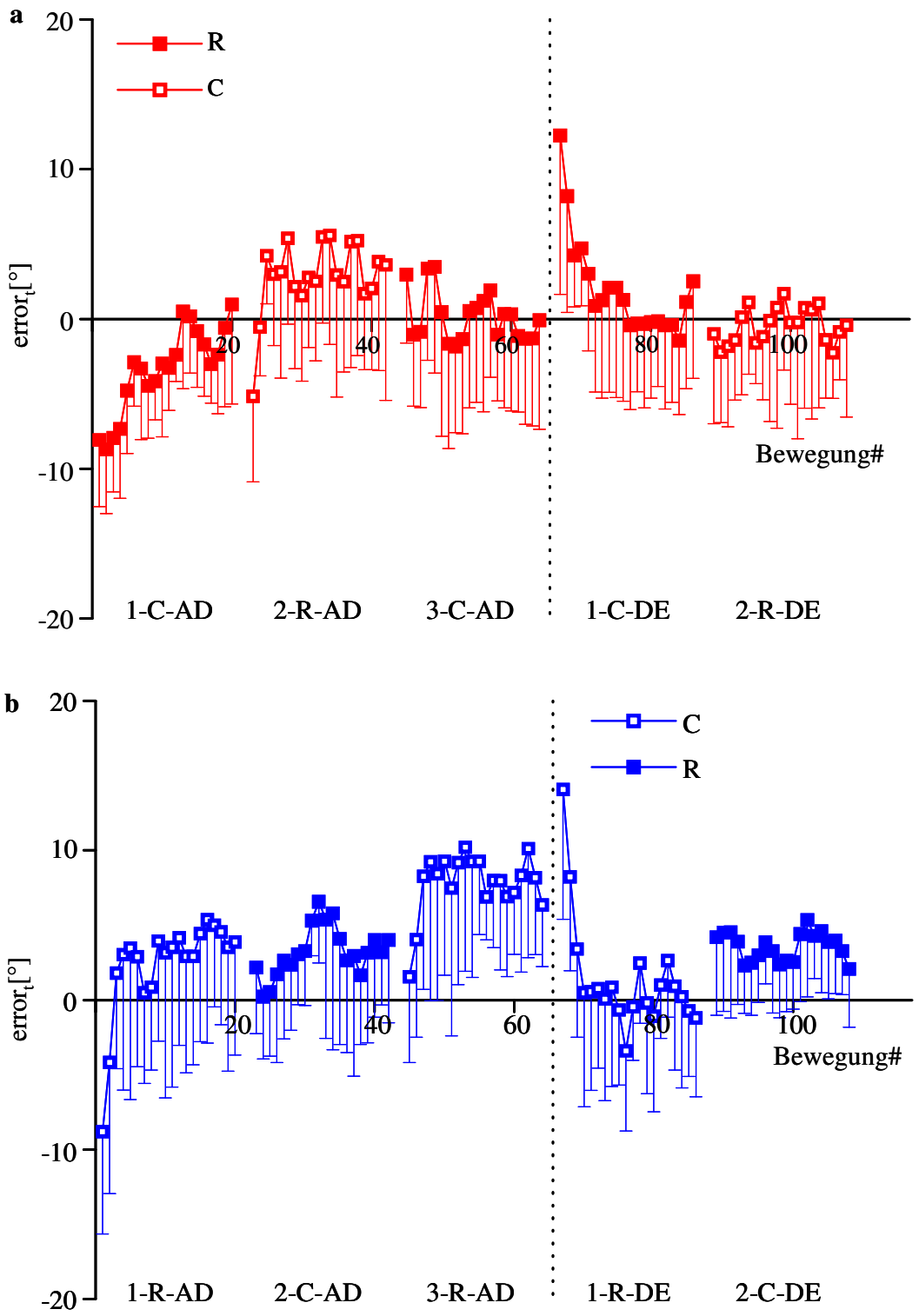

Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ (Exp. 5). Dargestellt sind die einzelnen Blöcke der Adaptation und Deadaptation mit den geglätteten Mittelwerten über die einzelnen Bewegungen als Mittelwert über alle Probanden und deren Standardabweichungen für **a:** Gruppe 1 und **b:** Gruppe 2.

Vel_{150}

Die gerechnete ANOVA für den Parameter Vel_{150} ergab einen signifikanten Effekt für die Innersubjektfaktoren Block und Bewegung sowie die Interaktionen Bewegung * Gruppe und Block * Gruppe (s. Anhang). Ausschlaggebend für eine zusätzliche Auswertung des störungsspezifischen Fehlerwinkels $error_v$ wäre einzig ein signifikanter Unterschied zwischen einzelnen Blöcken, die in den Ergebnissen des $error_t$ miteinander verglichen wurden. Der Post-hoc Test der Interaktion Block * Gruppe zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweils zu vergleichenden Blöcken der Adaptation (s. Anhang). Somit konnte der bedingungsspezifische Fehlerwinkel ($error_v$) außer Betracht gelassen werden.

2.3.5 Exp. 4-5: Diskussion

Experiment 4 untersuchte das Adaptationsverhalten an geschwindigkeitsabhängige robotische Kräfte in Abhängigkeit der Kraftintensität und des Angriffspunktes der Kraft. Ausgangspunkt dafür war die Interpretation von Lackner & DiZio (2005), die aufgrund unterschiedlicher Zeitgänge und Angriffspunkte der Kraft bei der Adaptation an robotische Kräfte und Corioliskräfte auf unterschiedliche Adaptationsmechanismen schlossen. Anhand der Ergebnisse aus Experiment 4 konnte gezeigt werden, dass die Intensität der Kraft einen deutlichen Einfluss auf den Zeitgang der Adaptation hat. Eine geringere Kraft führte sowohl zu einem geringeren Initialfehler zu Beginn der Adaptation, als auch zu einem schnelleren Erreichen des Adaptationsplateaus. Entsprechende Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Kraftstärke und initialem Fehlerwinkel fanden sich schon in anderen Studien und konnten somit bestätigt werden (Lai et al. 2003, Takahashi et al. 2001) (siehe Kapitel 1.6, S. 17). Die geringeren Zeitkonstanten während der Adaptation an die geringere Kraftintensität zeigten zudem, dass das schnellere Erreichen des Adaptationsplateaus nicht nur auf den geringeren Ausgangspunkt zurückzuführen ist, sondern die Adaptation an eine geringere Kraft anscheinend leichter fällt. Auch in der Deadaptationsphase blieben die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kräften bestehen, was zeigt, dass die Rekalibrierung für die geringere Kraft weniger stark ausgeprägt war.

Aus der Ergebnissen von Experiment 4 ließ sich außerdem ableiten, dass auch der Angriffspunkt der Kraft einen Einfluss auf das Adaptationsverhalten hatte. Aktives Greifen resultierte in einem höheren Fehler zu Beginn der Adaptation, so dass das aktive Greifen die Kompen-

sationsmöglichkeiten der Störung zu verringern scheint. Die Tatsache, dass für die Deadaptationsphase kein Unterschied zwischen den unterschiedlichen Angriffspunkten festgestellt werden konnte, lässt vermuten, dass nur die strategische Kontrolle, nicht aber die Rekalibrierung durch das aktive Greifen des Roboterarms beeinträchtigt ist. Möglicherweise spielen ungünstigere biomechanische Begebenheiten während des aktiven Greifens eine Rolle. Als entscheidendes Ergebnis zeigt sich, dass unterschiedliche Adaptationsverläufe in deutlicher Abhängigkeit zur Kraftintensität stehen. Schlussfolgerungen auf die Verarbietungsmechanismen bezogen auf unterschiedlich wirkende Kräfte können jedoch nicht gezogen werden. Dieser wichtigen Fragestellung wurde in Experiment 5 nachgegangen.

Experiment 5 bestätigte das Ergebnis bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Kraftintensität und dem Zeitgang der Adaptation aus Experiment 4. Bei Betrachtung der ersten Adaptationsphase ist festzustellen, dass durch die Reduktion der Intensität der robotischen Kraft eine deutliche Annäherung an den Zeitgang der Adaptation an die Corioliskraft stattfand. Zwar bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Adaptationsblöcken, aber die Adaptationsgeschwindigkeit an die robotische Kraft reduzierte sich wesentlich im Gegensatz zu Angaben in der Literatur von einer Dauer von 200-300 Bewegungen (Ghahramani & Wolpert 1997, Shadmehr & Mussa-Ivaldi 1994, Tong et al. 2002).

Der signifikante Unterschied zwischen dem ersten (Gruppe 1) und zweiten Adaptationsblock (Gruppe 2) an die robotische Kraft (1-R-AD und 2-R-AD) kann einzig durch den Einfluss der vorangegangenen Adaptation an die Corioliskraft erklärt werden. Da sich im Gegensatz dazu der erste und zweite Adaptationsblock an die Corioliskraft (1-C-AD und 2-C-AD) nicht unterschieden, ist dieser Effekt umgekehrt nicht nachzuweisen. Somit zeigte sich ein nur einseitiger Transfer von der Adaptation an die Corioliskraft auf die robotische Kraft. Durch diesen gefundenen Transfereffekt sind unabhängige adaptive Mechanismen für die Adaptation an die robotische Kraft und die Corioliskraft auszuschließen. Eine gemeinsame Verarbeitung der Adaptation an beide Störungsarten steht jedoch im Konflikt zum Ausbleiben des Transfers von der Adaptation an die robotische Kraft auf die Adaptation an die Corioliskraft.

Eine mögliche Erklärung für das Ausbleiben des Transfers besteht darin, dass die Adaptation an die robotische Kraft nicht vollständig abgeschlossen war. Modellbasierte Ergebnisse von Smith et al. (2006) lassen vermuten, dass im Verlauf der Adaptation die Intensität der Rekalibrierung zunimmt, während die strategische Kontrolle abnimmt. Dies würde bedeuten, dass

der Großteil der Rekalibrierung gegen Ende der Adaptation stattfindet. Naheliegend ist also eine geringe Rekalibrierung aufgrund unvollständiger Adaptation, was das Ausbleiben eines Transfereffektes von der Adaptation an die robotische Kraft auf die Adaptation an die Corioliskraft erklären kann. Ebenfalls naheliegend ist, dass die Rekalibrierung, die während der Adaptation an die Corioliskraft stattfand, stärker generalisiert war. Im Gegensatz zur robotischen Bedingung war der Angriffspunkt der Kraft während der Adaptation an die Corioliskraft nicht begrenzt lokalisiert. Die Tatsache, dass die Probanden im zweiten Fall Teil eines rotierenden Systems waren hatte zur Folge, dass sich der gesamte Organismus an die neue Bedingung anpassen musste. Armbewegungen resultierten in einer Auslenkung, die möglicherweise durch größere Muskelsynergien ausgeglichen wurden, als während des aktiven Greifens des Stifts bei der Adaptation an die robotische Kraft. Folglich ist denkbar, dass sich während der Adaptation an die Corioliskraft eine umfangreiche sensomotorische Transformationsregel ausbildet hat, die für die Adaptation an die robotische Kraft genutzt werden konnte. Die ausgebildete sensomotorische Transformation nach Adaptation an die robotische Kraft ist jedoch durch die Beteiligung begrenzt definierter Muskulatur des agierenden Arms nicht ausreichend für die Adaptation an die Corioliskraft. Diese Interpretation scheint auf den ersten Blick mit der von Lackner & DiZio (2005) übereinzustimmen. Auch sie vermuten eine stärker generalisierte Anpassung während der Adaptation an die Corioliskraft. Jedoch ist der entscheidende Unterschied, dass die Adaptation an beide Kräfte, nicht wie von Lackner & DiZio (2005) behauptet, auf unterschiedlichen Adaptationsmechanismen basiert. Sie gehen von der Nutzung eines Werkzeuges auf der einen Seite und Anpassung an externe Bedingungen auf der anderen Seite aus (siehe Kapitel 1.6, S. 14).

Ähnliche Ergebnisse in Form einseitigen Transfers wie in Experiment 5 fanden (Morton & Bastian 2004) in ihrer Studie. Auch sie konnten in ihrem Transferexperiment einen nur einseitigen Transfer nachweisen. Probanden, die sich, eine Prismenbrille tragend, längere Zeit fortbewegten, konnten das Gelernte auf Zeigebewegungen übertragen. Umgekehrt gab es keinen Transfereffekt. Dieser einseitige Transfer ist nicht mit der Nutzung eines Werkzeuges zu erklären und spricht somit gegen die Annahme von Lackner & DiZio (2005). Vielmehr scheint sich auch hier während der Fortbewegung eine generalisiertere Transformation auszubilden, als während der Zeigebewegungen.

Wie schon in Bezug auf Experiment 1-3 diskutiert ist auch hier nicht eindeutig auszuschließen, dass der Transfereffekt auf der Summe der Deadaptation der vorangegangenen Adapta-

tion und der Adaptation an die präsente Störung basiert. Die Interpretation der Ergebnisse des dritten Adaptationsblocks and die Corioliskraft (3-C-AD) sprechen jedoch gegen diese Vermutung. Der signifikante Unterschied zwischen dem ersten (1-C-AD) und dritten (3-C-AD) Adaptationsblock kann als Hinweis dafür gedeutet werden, dass das während des ersten Adaptationsblocks Gelernte während der Adaptation an die robotische Kraft bewahrt wurde. Hätte die Adaptation an die robotische Kraft einen Einfluss, so wäre dieser schon im zweiten Adaptationsblock 2-C-AD sichtbar geworden. Somit können diese Ergebnisse im Zusammenhang als Indiz dafür verstanden werden, dass während der Adaptation an die robotische Kraft keine Deadaptation der Adaptation an die Corioliskraft stattfand. Folglich ist der Transfereffekt von Coriolisadaptation auf robotische Adaptation auf gemeinsame Verarbeitungsprozesse zurückzuführen, nicht aber auf die Summe von Deadaptation und Adaptation. Jedoch ist anzumerken, dass die Ergebnisse der dritten Adaptationsblöcke schwer zu interpretieren sind, da zwei Adaptationsphasen zuvor effektiv sein können. Im Zusammenhang mit den oben diskutierten Ergebnissen ist zu vermuten, dass der Unterschied zwischen 1-R-AD und 3-R-AD ebenfalls auf den Einfluss der Adaptation an die Corioliskraft (2-C-AD) zurückzuführen ist.

Der erste Block der Deadaptation zeigte in beiden Gruppen deutlich, dass rekalibriert wurde. Der zweite Block der Deadaptation zeigte keinerlei Nacheffekte der Adaptation, so dass eine generelle Deadaptation beider Bedingungen (Roboter und Coriolis) sowohl unter Greifen des robotischen Manipulandums, als auch im Freien stattfand. Dieses Ergebnis bestätigt das von Cothros et al (2006), die nach robotischer Adaptation Nacheffekte auf freie Bewegungen ohne aktives Greifen des Roboterarms fanden. Mit den vorliegenden Ergebnissen der Deadaptation konnte darüber hinaus die Übertragung in beide Richtungen, d.h., sowohl von der Bewegung mit Roboterarm auf das freie Bewegen, als auch umgekehrt gezeigt werden. Folglich findet sich wiederum ein deutliches Indiz dafür, dass durch das aktive Greifen des Roboterarms der Umgang mit einem speziellen Werkzeug erlernt wird, was sich elementar von der Anpassung an neue äußere Bedingungen unterscheidet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Indizien dafür überwiegen, dass die Adaptation an beide Arten von Störungen auf gemeinsamen Verarbeitungsprozessen basiert. Durch die deutliche Reduktion der Adaptationsdauer bei robotischen Kräften in Zusammenhang mit einer geringeren Kraftintensität konnte die gängige Annahme der Diskrepanz zwischen Coriolis- und robotischer Adaptation widerlegt werden. Somit kann dies als Indiz für unterschied

liche adaptive Mechanismen ausgeschlossen werden. Der einseitige Transfer von Coriolis- auf die robotische Adaptation spricht gegen unabhängige adaptive Mechanismen und ist vielmehr kompatibel mit gemeinsamen adaptiven Mechanismen.

2.4 Experiment 6a/b (Vibration)

2.4.1 Exp. 6a: Spezielle Methodik

Agonist-Antagonist Vibration

Sowohl dieses Experiment, als auch Experiment 6b dienten der Untersuchung des Einflusses der Propriozeption während der sensomotorischen Adaptation an unterschiedliche Arten von Diskordanzen. Dazu wurde während der Durchführung der Zeigebewegungen durch die Methode der Agonist-Antagonist Vibration (s.o.) die propriozeptive Rückmeldung des agierenden Arms während einiger Versuchsbedingungen bei einem Teil der Probanden herabgesetzt. Aufgrund der Vergleichbarkeit wurden allen Probanden (auch denen, die keiner Vibration ausgesetzt wurden) sechs pneumatisch betriebene Vibratoren (NTS 120 HF und NTS 180 HF) angelegt (Abb. 1): zwei Vibratoren am Unterarm nahe des proximalen und distalen Handgelenks (an die ventral gelegene Flexoren- und dorsal gelegene Extensorengruppe); zwei Vibratoren am Oberarm nahe des Ellenbogengelenks (am M.biceps brachii und M. triceps brachii) und zwei Vibratoren nahe des Schultergelenks (am M.pectoralis major in Höhe der Achselhöhlenbegrenzung und am M.deltoideus pars spinalis). Die Vibrationsfrequenz betrug 100 ± 2 Hz bei einer Schwingungsamplitude von ca. 1-2 mm. Innerhalb eines Vorexperiments wurde die Funktionalität der derartigen Vibration anhand von Kraftwahrnehmung und Winkelreproduktion überprüft und die Positionierung der einzelnen Vibratoren so justiert, dass eine deutliche Herabsetzung beider Funktionen zu erkennen war. Außerdem wurde bei den Probanden, die während der Versuche der Vibration ausgesetzt wurden, die Funktionalität der Vibratoren einzeln überprüft. Dazu gaben sie mündliche Rückmeldung über das Eintreten der Bewegungsillusion für die einzelnen Vibratoren bzw. das Ausbleiben einer Illusion für die Vibratorenpaare. Bei Ausbleiben dieser Effekte wurde die Positionierung der Vibratoren entsprechend modifiziert (vgl. Gilhodes et al. 1986, Pipereit et al. 2006). So war gewährleistet, dass die Vibration bei allen Probanden den gewünschten Effekt erzielte. Die Vibratoren wurden generell 5 sek vor einer Sequenz von Zeigebewegungen unter Vibrationseinfluss eingeschaltet und 10 sek vor einer Sequenz ohne Vibrationseinfluss wieder abgeschaltet (vgl. Roll

et al. 1982). Generell wurden die Probanden der Vibration maximal 70 sek ohne Pause ausgesetzt.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau war bis auf die Vibratoren identisch mit dem aus Experiment 4 (Abb. 1c). Der Abstand zwischen Start- und Zielpunkten betrug 4 cm. Diese verhältnismäßig kurze Amplitude ist damit zu begründen, dass, bezogen auf die in diesem Experiment verwendete Kraftart, die gewünschte Kraftintensität anhand des verwendeten Manipulandums nur über diese kurze Amplitude ermöglicht werden konnte.

Versuchsdesign

Die Probanden wurden in insgesamt 4 Gruppen aufgeteilt. Bei der Hälfte der Probanden wurden die Vibratoren während des gesamten Versuchs eingeschaltet. Nach 3 Episoden in der Grundbedingung ohne Diskordanz wurden die Probanden während 22 Episoden Adaptationsphase je nach Gruppe einem geschwindigkeitsabhängigen Kraftfeld im Uhrzeigersinn *($F^{+}_{geschw}[N] = 0{,}013 * Bewegungsgeschwindigkeit\ [mm/s]$)* oder positionsabhängigen Kraftfeld gegen den Uhrzeigersinn *($F^{+}_{pos}[N] = 0{,}17 * Bewegungsamplitude\ [mm]$)* ausgesetzt. Dabei wurde die Intensität der Kraft so gewählt, dass der Fehler zu Beginn der Adaptation an beide Kräfte vergleichbar war. Anschließend folgten 5 Episoden Deadaptation ohne Diskordanz. Die Pausendauer betrug zwischen den einzelnen Episoden abwechselnd 20 sek und 90 sek. Diese Pausendauern dienten zur Entlastung der Probanden von der Vibration sowie einem Überhitzungsschutz des robotischen Manipulandums. Der gesamte Versuchablauf ist in Tab. 26 dargestellt.

2.4.2 Exp. 6b: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau war identisch mit dem aus Experiment 1. Allerdings wurden als visuelle Ziele Punkte anstatt Balken präsentiert. Startpunkt, Zielpunkte und Cursor hatten einen Durchmesser von 8 cm. Die Bewegungsamplitude zwischen Start- und Zielpunkten betrug 5 cm.

Versuchsdesign

Die Probanden wurden in zwei Gruppen unterteilt. Die Probanden der einen Gruppe wurden während des gesamten Experiments der Vibration (mV) (s.o.) ausgesetzt. Der Ablauf sowie die Dauer der Episoden und Pausen waren identisch wie in Experiment 6a. Während der Adaptationsphase wurden alle Probanden einer geschwindigkeitsabhängigen visuellen Diskordanz gegen den Uhrzeigersinn (*orthogonale Auslenkung [mm] = 0,05 * Bewegungsgeschwindigkeit [mm/s])* ausgesetzt. Die Intensität der Auslenkung wurde so gewählt, dass das Fehlerausmaß zu Beginn der Adaptation mit dem aus Experiment 6a vergleichbar war. Der gesamte Ablauf ist der Tab. 26 zu entnehmen.

Tab. 26: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 6a/b.

Exp	Gruppe	n	GB (3 Episoden)	AD (22 Episoden)	DE-AD (5 Episoden)	Vibration
6a	F^{+}_{geschw}-mV	8		F^{+}_{geschw}		An
	F^{+}_{geschw}-oV	8		F^{+}_{geschw}		Aus
	F^{+}_{pos}-mV	6	keine Diskordanz	F^{+}_{pos}	keine Diskordanz	An
	F^{+}_{pos}-oV	6		F^{+}_{pos}		Aus
6b	V^{+}_{geschw}-mV	12		V^{+}_{geschw}		An
	V^{+}_{geschw}-oV	12		V^{+}_{geschw}		Aus

Angegeben sind die jeweilige Gruppenbezeichnung, Probandenanzahl und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), Adaptationsphase (AD) und Deadaptationsphase (DE-AD). Die Vibration war während des gesamten Versuchs je nach Gruppe entweder aus- oder angeschaltet.

Statistische Auswertung Exp. 6a/6b

Neben dem Parameter $error_t$ wurde zusätzlich dessen Standardabweichung über alle Bewegungen innerhalb einer Episode (Stabw_$error_t$) analysiert. Für jede Bedingung (F^+_{geschw}, F^+_{pos} und V^+_{geschw}) wurde für beide Parameter ($error_t$ und Stabw_$error_t$) jeweils eine 2 (Gruppe) * 22 (Episode) ANOVA für die Adaptation und eine 2 (Gruppe) * 5 (Episode) ANOVA für die Deadaptation gerechnet.

Exp. 6a/b: Ergebnisse

Initialfehler ($error_t$)

Alle Gruppen reduzierten den Fehler während der **Adaptation** signifikant. Während der Adaptation an $\mathbf{F^+_{geschw}}$ (Exp. 6a) reduzierte die Gruppe F^+_{geschw}-mV den Fehler signifikant langsamer als die Gruppe F^+_{geschw}-oV, so dass diese Probanden bis zum Ende der Adaptationsphase einen höheren Fehler aufwiesen als die Probanden der Gruppe F^+_{geschw}-oV. Die Interaktion Episode * Gruppe war ebenfalls signifikant. Der entsprechende Post-hoc Test zeigte, dass sich die Episoden 2-4, 6-12 und 17 signifikant zwischen den Gruppen unterschieden. Der Gruppenunterschied und die Interaktion Episode * Gruppe war sowohl zwischen F^+_{pos}-mV und F^+_{pos}-oV (Exp. 6a), sowie V^+_{geschw}-mV und V^+_{geschw}-oV (Exp. 6b) nicht signifikant. Die Ergebnisse der entsprechenden ANOVAs sind in Tab. 27 dargestellt.

Tab. 27: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 6a/b) der Adaptationsphase an F^+_{geschw}, F^+_{pos} und V^+_{geschw}.

Effekt	F^+_{geschw}-mV / F^+_{geschw}-oV	F^+_{pos}-mV / F^+_{pos}-oV	V^+_{geschw}-mV / V^+_{geschw}-oV
Episode	$F(21, 252) = 28{,}8^{***}$	$F(21, 252) = 18{,}32^{***}$	$F(21, 441) = 12{,}22^{***}$
Gruppe	$F(1, 12) = 6{,}56^{*}$	$F(1, 12) = 0{,}08^{n.s.}$	$F(1, 21) = 0{,}34^{n.s.}$
Episode * Gruppe	$F(21, 252) = 2{,}32^{**}$	$F(21, 252) = 0{,}93^{n.s.}$	$F(21, 441) = 0{,}68^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Zu Beginn der **Deadaptationsphase** stieg der Fehler in allen 6 Gruppen in die entgegengesetzte Richtung zur vorher applizierten Kraft an und reduzierte sich während der 5 Episoden wieder nahezu auf das Niveau der Grundbedingung. Für alle Störungen (F^{+}_{geschw}, F^{+}_{pos}, V^{+}_{geschw}) gab es keinen signifikanten Gruppenunterschied sowie keine signifikante Interaktion zwischen Episode * Gruppe. Die Ergebnisse der entsprechenden ANOVAs sind in Tab. 28 dargestellt.

Tab. 28: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp.6a/b) der Deadaptationsphase von F^{-}_{geschw}, F^{-}_{pos} und V^{+}_{geschw}.

Effekt	**F^{+}_{geschw}-mV/ F^{+}_{geschw}-oV**	**F^{+}_{pos}mV/ F^{+}_{pos}-oV**	**V^{+}_{geschw}-mV/ V^{+}_{geschw}-oV**
Episode	$F(4, 48) = 91{,}17^{***}$	$F(4, 48) = 91{,}34^{***}$	$F(4, 84) = 32, 68^{***}$
Gruppe	$F(1, 12) = 0{,}44^{n.s.}$	$F(1, 12) = 0{,}98^{n.s.}$	$F(1, 21) = 1{,}05^{n.s.}$
Episode * Gruppe	$F(4, 48) = 1{,}06^{n.s.}$	$F(4, 48) = 2{,}05^{n.s.}$	$F(4, 84) = 0{,}47^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

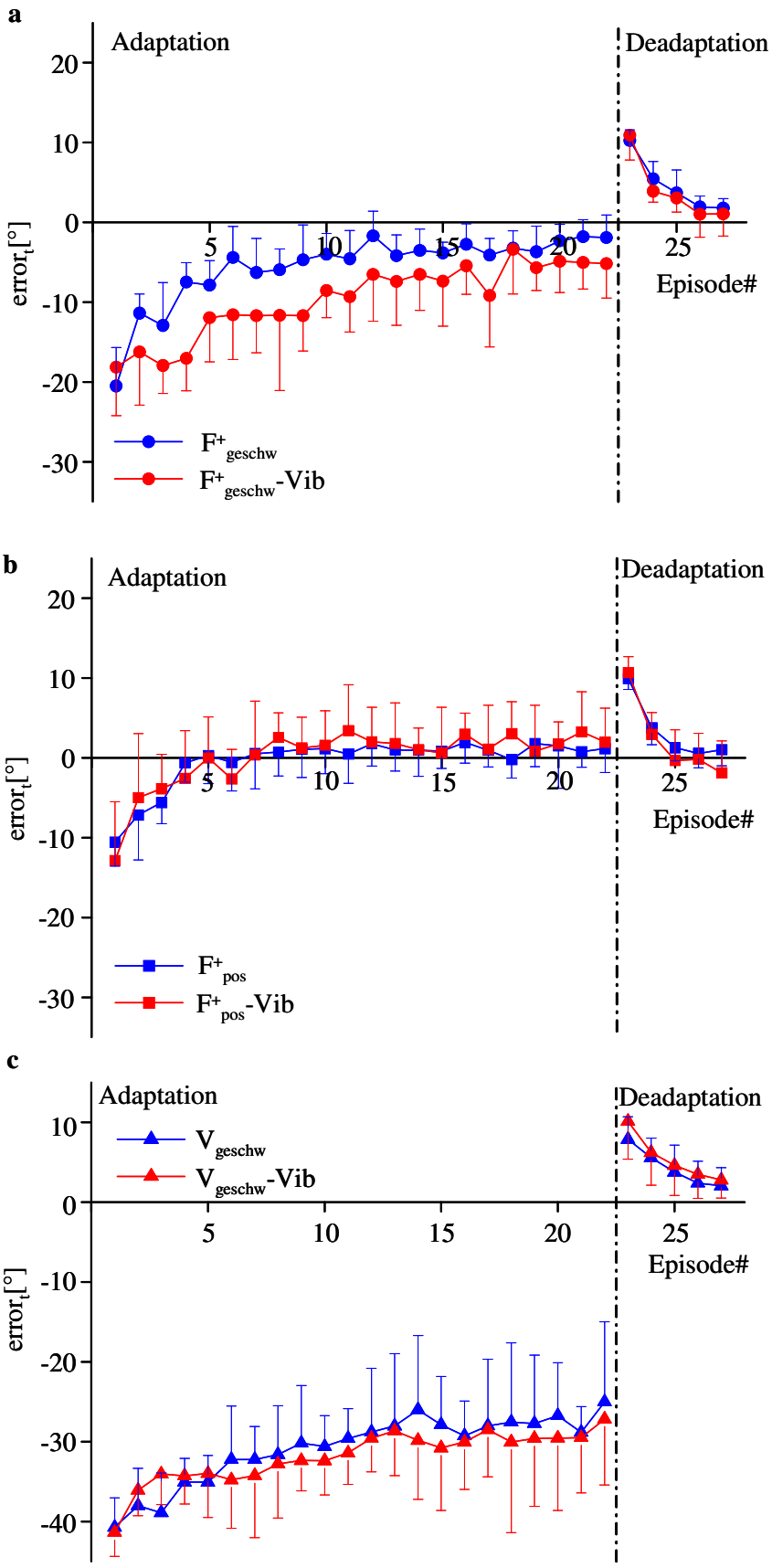

Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des error$_t$ (Exp. 6a/b). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung der Adaptations- und Deadaptationsphase für die Störungen **a.** F$^+_{geschw,}$ **b.** F$^+_{pos}$ und **c.** V$^+_{geschw}$.

Vel_{150} / $Dist_{150}$

Weder für den Parameter Vel_{150} zur Überprüfung des $error_t$ der geschwindigkeitsabhängigen Störungen, noch für den Parameter $Dist_{150}$ zur Überprüfung der positionsabhängigen Störung konnten signifikante Gruppenunterschiede festgestellt werden (s. Anhang). Somit wurden die störungsspezifischen Fehlerwinkel ($error_d$ und $error_v$) außer Betracht gelassen.

(Stabw_$error_t$

Es zeigte sich, dass die Stabw_$error_t$ in Gruppe F^+_{geschw}-mV im Allgemeinen höher war als in Gruppe F^+_{geschw}-oV, so dass die ANOVA sowohl für die Adaptation, als auch Deadaptation für die Bedingung $\mathbf{F^+_{geschw}}$ einen signifikanten Gruppenunterschied aufwies. Außerdem war in beiden Phasen der Innersubjektfaktor Episode signifikant. Für die Deadaptationsphase ergab sich zusätzlich eine signifikante Interaktion. Der entsprechende Post-hoc Test zeigte, dass sich die Episoden 2 und 5 zwischen den Gruppen signifikant unterschieden. Für die Bedingung $\mathbf{F^+_{pos}}$ ergab sich für die Adaptations- und Deadaptationsphase ebenfalls ein signifikanter Episodeneffekt, während der Gruppenunterschied und die Interaktion nicht signifikant waren. Für die Bedingung $\mathbf{V^+_{geschw}}$ ergaben sich keine Signifikanzen. Die entsprechenden Ergebnisse der ANOVAs sind in Tab. 29 und Tab. 30 dargestellt.

Tab. 29: Ergebnisse der ANOVAs der Stabw_$error_t$ (Exp. 6a/b) der Adaptationsphase an F^+_{geschw}, F^+_{pos} und V^+.

Effekt	F^+_{geschw}-mV / F^+_{geschw}-oV	F^+_{pos}-mV / F^+_{pos}-oV	V^+_{geschw}-mV / V^+_{geschw}-oV
Episode	$F(21, 252) = 3{,}66^{***}$	$F(21, 252) = 2{,}13^{**}$	$F(21, 441) = 1{,}0^{n.s.}$
Gruppe	$F(1, 12) = 6{,}57^{*}$	$F(1, 12) = 2{,}3^{n.s.}$	$F(1, 21) = 2{,}53^{n.s.}$
Episode * Gruppe	$F(21, 252) = 0{,}92^{n.s.}$	$F(21, 252) = 0{,}9^{n.s.}$	$F(4, 84) = 0{,}47^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 30: Ergebnisse der ANOVAs der Stabw_$error_t$ (Exp. 6a/b) der Deadaptationsphase von F^-_{geschw}, F^-_{pos} und V^+_{geschw}.

Effekt	F^+_{geschw}-mV / F^+_{geschw}-oV	F^+_{pos}-mV / F^+_{pos}-oV	V^+_{geschw}-mV / V^+_{geschw}-oV
Episode	$F(4, 48) = 3{,}95^{**}$	$F(4, 48) = 3{,}29^{*}$	$F(4, 84) = 1{,}58^{n.s.}$
Gruppe	$F(1, 12) = 5{,}17^{*}$	$F(1, 12) = 0{,}07^{n.s.}$	$F(1, 21) = 0{,}05^{n.s.}$
Episode * Gruppe	$F(4, 48) = 3{,}1^{*}$	$F(4, 48) = 2{,}19^{n.s.}$	$F(4, 84) = 2{,}09^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Gruppe, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

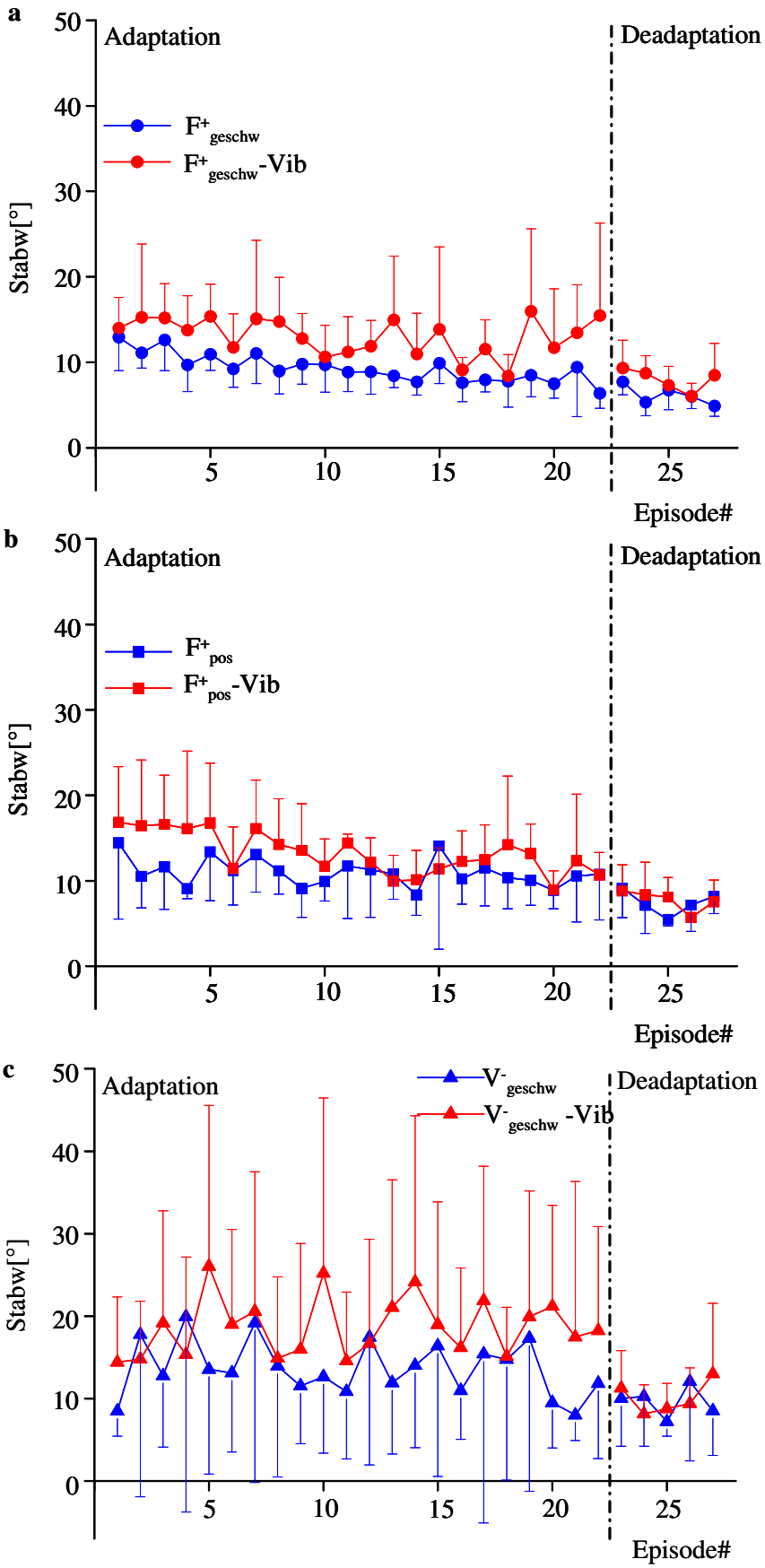

Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Stabw_error$_t$ (Exp. 6a/b). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung der Adaptations- und Deadaptationsphase für die Störungen **a**. F^+_{geschw}, **b**. F^+_{pos} und **c.** V^+_{geschw}.

2.4.3 Exp. 6a/b: Diskussion

Wie in den Experimenten zuvor ist auch hier in allen Gruppen ein typischer Verlauf des Initialfehlers während der Adaptation und Deadaptation zu erkennen. Jedoch einzig in der Bedingung F^{+}_{geschw} (Exp. 6a) scheint die Vibration die Adaptationsleistung negativ zu beeinflussen, was der signifikante Gruppenunterschied zeigt. Dieser Befund des Einflusses der Vibration auf die Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft deckt sich mit den Ergebnissen der Studie von Pipereit et al. (2006). Somit konnte die Relevanz der propriozeptiven Rückmeldung für die Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft auch für Bewegungen des gesamten Arms bestätigt werden. Jedoch fällt auf, dass der Unterschied zwischen den vibrierten und nicht-vibrierten Probanden in der vorliegenden Studie weniger stark ausgeprägt ist. Während der Unterschied am Ende der Adaptationsphase in der vorliegenden Studie nicht mehr signifikant war, erreichten die Probanden mit Vibration in der Studie von Pipereit et al. (2006) bis zum Ende der Adaptation nicht das Niveau der nicht-vibrierten Probanden. Allerdings gibt es zwischen diesen Studien wesentliche Unterschiede, die Erklärungsansätze bieten. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie ließen Pipereit et al. (2006) nur Bewegungen aus dem Handgelenk bei gleichzeitiger Fixierung des Unterarms durchführen, so dass die Beteiligung weiterer Muskelgruppen oberhalb des Handgelenks definitiv ausgeschlossen werden konnte. Somit war es nur nötig, die Propriozeption lokal stark eingegrenzt an den Extensoren und Flexoren des Handgelenks zu beeinflussen, was erfahrungsgemäß bei diesen Muskelgruppen mit relativ geringem Querschnitt gut funktioniert. Die Beeinträchtigung der Propriozeption durch Vibration bei mehrgelenkigen Bewegungen mit Involvierung des gesamten Arms gestaltet sich jedoch als schwieriger. Zum einen verfügen die beteiligten Muskeln über wesentlich größere Querschnitte und können durch Vibration nicht so gut erreicht und beeinflusst werden, zum anderen stehen wesentlich mehr propriozeptive Informationsquellen zur Verfügung, deren Beeinträchtigung durch die Vibration möglicherweise nicht gewährleistet war. Ein weiterer Aspekt ist das größere Ausmaß an Bewegungsmöglichkeiten bei mehrgelenkigen Bewegungen innerhalb einer zielgerichteten Bewegung. Es konnte herausgefunden werden, dass die Steigerung der Bewegungsvariabilität eine positive Auswirkung auf die Adaptationsleistung nimmt, trotz der Notwendigkeit der intersegmentalen Kontrolle in diesem Zusammenhang (Yang et al. 2007). Somit können bei mehrgelenkigen Bewegungen möglicherweise durch variableres Bewegen mehr propriozeptive Informationen verarbeitet werden. Ebenfalls beeinflussend kann die Kokontraktion, also die gleichzeitige Kontraktion antagonistischer Muskeln wirken, welche strategisch während der Adaptation an mechanische Diskordanzen genutzt wird, um den Arm zu stabilisie-

ren und die Auslenkung zu reduzieren (Gribble et al. 2003, Milner & Franklin 2005). Es ist durchaus naheliegend, dass die Kokontraktion großer Teile der Armmuskulatur einen größeren Widerstand hervorrufen kann, als nur die Kokontraktion der Extensoren und Flexoren des Handgelenks.

Das Ergebnis der Standardabweichung des Intitialfehlers verdeutlicht nochmals, dass die Propriozeption für die Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft eine entscheidende Rolle spielt. Die höhere Standardabweichung bei der vibrierten Gruppe zeigt, dass die Variabilität der Bewegungsrichtungen deutlich erhöht war, was auf ein unkontrollierteres Bewegungsverhalten unter Vibrationseinfluss hindeutet. Auch in der Deadaptationsphase blieb dieser Gruppenunterschied bestehen, während sich für den Initialfehler hier kein Unterschied mehr zeigte. Dieses Ergebnis lässt bezüglich des Einflusses der Propriozeption auf die Rekalibrierung keine eindeutigen Schlüsse zu. Pipereit et al. (2006) konnten anhand beider Parameter zeigen, dass die Rekalibrierung durch das Herabsetzen der Propriozeption negativ beeinträchtig war und schlossen aus ihren Ergebnissen insgesamt, dass propriozeptive Signale hauptsächlich in die Rekalibrierung involviert sind und weniger die strategische Kontrolle beeinflussen. Dies kann durch die vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig gestützt werden. Dadurch, dass nur die Adaptationsleistung, nicht aber die Deadaptation durch die Vibration beeinflusst wurde, geht aus diesen Ergebnissen vielmehr hervor, dass hauptsächlich die strategische Kontrolle propriozeptive Signale involviert. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass das Ausbleiben eines deutlichen Effektes auf die Deadaptation durch Vibration in einer zu geringen Beeinträchtigung der Propriozeption begründet liegt.

Im Gegensatz zu F^{+}_{geschw} konnte der Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an F^{+}_{pos} und V^{+}_{geschw} nicht bestätigt werden. In beiden Fällen wiesen die Initialfehler keinen Unterschied zwischen den vibrierten und nicht-vibrierten Probanden auf. Bezüglich der Adaptation an eine positionsabhängige Kraft kann vermutet werden, dass der Zusammenhang zwischen aufzubringender Muskelspannung und Position des Effektors visuell enkodiert werden können muss. Studien, die diese Tatsache bestärken konnten zeigen, dass Probanden in der Lage sind die Position eines Targets allein über die visuelle Rückmeldung genau feststellbar ist (Soechting & Flanders 1989, Tillery et al. 1991). Folglich scheint der Positionsbezug über die visuelle Sinnesmodalität enkodierbar zu sein. Bei dynamischen Veränderungen in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit besteht zur Anpassung des Kraftpotentials hingegen die Notwendigkeit, propriozeptive Informationen zu erhalten. Diese Erklärung wird gestützt

durch die Erkenntnis, dass die Geschwindigkeit der Muskellängenveränderung über die Propriozeption (Cordo et al. 1994, Matthews 1988) oder genauer über die Muskelspindelafferenzen (Lackner & DiZio 2000) enkodiert wird. Wenn jedoch die Propriozeption einen entscheidenden Einfluss auf die Enkodierung von Geschwindigkeitsbezügen hat stehen die Ergebnisse der Adaptation an die visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung auf den ersten Blick dazu in Konflikt. Jedoch wird durch eine weitere Studie dieser Erklärungsansatz noch bestärkt. Bagesteiro et al. (2006) fanden heraus, dass die Anpassung dynamischer Strategien abhängig ist von propriozeptiver Rückmeldung. Bei einem produzierten Missmatch zwischen aktueller und tatsächlicher Handposition wurde die Dynamik der Bewegung (Geschwindigkeit und Beschleunigung) auf die tatsächliche Handposition abgestimmt und nicht auf die virtuelle. Dies ist im Umkehrschluss ein deutlicher Hinweis dafür, dass zur Enkodierung die Propriozeption eine entscheidende Rolle spielt.

Ein möglicher Erklärungsansatz für die Kontroverse zu den Ergebnissen der Adaptation an die visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung ergibt sich, wenn man die besagte Störung und die Adaptationsleistung genauer betrachtet. Bezüglich visueller Störungen geht man davon aus, dass das entstandene Missmatch zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung dazu führt, dass die Propriozeption unterdrückt wird und die visuelle Rückmeldung dominant ist (Bernier et al. 2009, Hay et al. 2005, Jones et al. 2001) (siehe hierzu Kapitel 1.7, S. 20). Auffallend ist, dass die Adaptation an die visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung auch ohne Vibration schon sehr gering ist. Möglicherweise liegt die geringe Adaptationsleistung darin begründet, dass die Propriozeption zur Enkodierung der Geschwindigkeitskomponente einen entscheidenden Beitrag leistet, jedoch in Folge der Störungsnatur unterdrückt wurde. Somit ist die Adaptation an diese Störung stark behindert durch die Notwendigkeit eines intakten propriozeptiven Signals auf der einen Seite und den Konflikt zwischen visuellen und propriozeptiven Signalen auf der anderen Seite. Dass die Vibration die Adaptation nicht weiter beeinflusst wäre somit einleuchtend.

Zusammenfassend konnten die Ergebnisse von Pipereit et al. (2006) bestätigt werden, wobei nicht eindeutig gezeigt werden konnte, dass neben der strategischen Kontrolle auch die Rekalibrierung bei der Adaptation an mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störungen durch die Propriozeption beeinflusst wird. Die Relevanz der Propriozeption in Abhängigkeit vom kinematischen Bezug oder zur physikalischen Natur der Störung konnte nicht bestätigt wer-

den, da einzig die Adaptation an die mechanische geschwindigkeitsabhängige Störung durch die Vibration beeinträchtigt wurde.

2.5 Experiment 7 (Vibration)

2.5.1 Exp. 7: Spezielle Methodik

Versuchsaufbau

Bei Experiment 7 handelte es sich um ein weiteres Transferexperiment. Der Versuchsaufbau war identisch mit Experiment 4. Allerdings wurden den Probanden insgesamt 16 anstatt 8 Zielpunkte dargeboten. Diese waren gleichverteilt auf zwei Kreislinien um den zentral platzierten Startpunkt angeordnet. Die Amplituden zwischen Startpunkt und Zielpunkten betrugen 3 cm für den inneren Kreis und 6 cm für den äußeren Kreis. Die zwei verschiedenen Amplituden wurden gewählt, um variable Geschwindigkeitsprofile während der Zielbewegungen zu erreichen, so dass die verwendete mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung (s.u.) durch die Probanden deutlicher als dynamische Störung wahrgenommen werden konnte.

Versuchsdesign

Alle Probanden wurden in unterschiedlicher Reihenfolge zwei verschiedenen Diskordanzen ausgesetzt: zum einen einem durch das Manipulandum (PHANTOM^{TM} Premium Haptic Device 3.0, Sensable Technologies. Inc.) generierten geschwindigkeitsabhängigen Kraftfeld gegen den Uhrzeigersinn ($F^{+}_{geschw}[N] = 0{,}012 * Bewegungsgeschwindigkeit\ [mm/s]$) und zum anderen einer visuellen, positionsabhängigen Störung als visuelle Rotation um $\alpha = 30°$ gegen den Uhrzeigersinn (V^{+}_{pos}).

Während der Adaptation an das Kraftfeld wurde den Probanden keine visuelle Rückmeldung über ihre Handposition dargeboten. Eine Ausnahme stellten Handpositionen innerhalb eines Radius von 10 mm um den Startpunkt dar. Die visuelle Rückmeldung in diesem Bereich gewährleistete, dass die Position des Startpunktes nach jeder Bewegung wiedergefunden werden konnte.

Die Probanden wurden in insgesamt 4 Gruppen aufgeteilt. Für alle Gruppen umfasste das Experiment insgesamt 6 Phasen, deren Ablauf in Tab. 31 dargestellt ist. Die Grundbedingung ohne Störung umfasste 8 Episoden und wurde in 4 Bedingungen unterteilt, die zeitlich randomisiert präsentiert wurden. Die darauffolgende erste Adaptationsphase umfasste 20 Episoden gefolgt von 2 Episoden Deadaptation und 4 Episoden identisch zur ersten Adaptationsphase als Auffrischung. Im Anschluss folgte eine zweite Adaptationsphase mit ebenfalls 20 Episoden. Die Pausendauer war identisch zu der in Experiment 6a und b. Manipuliert zwischen den Gruppen wurde zum einen die Reihenfolge der Diskordanzen während der ersten und zweiten Adaptationsphase sowie die Präsenz der Vibration.

Tab. 31: Gruppenspezifischer Ablauf von Exp. 7.

Gruppe	**$F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$**	**$V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$**	**F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$**	**F^+_{geschw}- $\rightarrow V^+_{pos}$-Vib**
n	8	8	8	8
GB (8 Episoden)	Keine Diskordanz		2Episoden: Vis RM an + Vib an 2Episoden: Vis RM an + Vib aus 2Episoden: Vis RM aus + Vib an 2Episoden: Vis RM aus + Vib aus	
AD1 (20 Episoden)	**F^+_{geschw}**	**V^+_{pos}**	**F^+_{geschw}**	**F^+_{geschw}**
DE-AD (2 Episoden)	keine Diskordanz	keine Diskordanz	keine Diskordanz	keine Diskordanz
AU (4 Episoden)	**F^+_{geschw}**	**V^+_{pos}**	**F^+_{geschw}**	**F^+_{geschw}**
Vis RM	aus	an	aus	aus
Vibration	aus	aus	an	aus
AD2 (20 Episoden)	**V^+_{pos}**	**F^+_{geschw}**	**V^+_{pos}**	**V^+_{pos}**
Vis RM	an	aus	an	an
Vibration	aus	aus	aus	an

Angegeben sind die jeweilige Gruppenbezeichnung, die Probandenverteilung und die einzelnen experimentellen Phasen: Grundbedingung (GB), Adaptationsphase 1(AD1), Deadaptationsphase (DE-AD), Auffrischungsphase (AU) und Adaptationsphase 2 (AD2). Die visuelle Rückmeldung (Vis RM) war während der Adaptation an F^+_{geschw} immer ausgeschaltet und während der Adaptation an V^+_{pos} immer angeschaltet. Die Vibration war je nach Gruppe und Bedingung an oder ausgeschaltet. Bezogen auf Vis RM und die Vibration waren AD1, DE-AD und AU innerhalb einer Gruppe immer identisch.

Statistische Auswertung

In diesem Experiment wurden die Parameter $error_t$, Vel_{150}, $Dist_{150}$ und $Stabw_error_t$ (siehe Kapitel 2.1.4, S. 33) analysiert. Dazu wurde für jeden Parameter jeweils eine ANOVA gemeinsam für beide Adaptationsphasen mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode separat für die Störungen F^+_{geschw} und V^+_{pos} gerechnet. Für die Störung F^+_{geschw} handelte es sich um eine 3 (Bedingungen) * 20 (Episode) ANOVA. Die Bedingungen waren die naive Adaptation ohne Vibration, die sich aus den Gruppen $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ und $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib zusammensetzt, die naive Adaptation mit Vibration der Gruppe F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$ und die voradaptierte Adaptation der Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$. Für die Störung V^+_{pos} wurde eine 4 (Bedingungen) * 20 (Episode) ANOVA gerechnet. Hier ergaben sich die Bedingungen entsprechend der 4 Gruppen. Zusätzlich wurde für die Deadaptationsphasen der Gruppen $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$, $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib und F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$ eine 2 (Bedingung) * 2 (Episode) ANOVA gerechnet, wobei wiederum die ersten beiden Gruppen zusammengefasst wurden.

2.5.2 Exp. 7: Ergebnisse

Initialfehler

Der zeitliche Verlauf des $error_t$ der **Adaptation** ist störungsspezifisch zusammen mit der jeweils dazugehörigen Deadaptation der ersten Adaptationsphasen in Abb. 17 dargestellt. Für die Störung $\mathbf{F^+_{geschw}}$ wird deutlich, dass sich die beiden Bedingungen der ersten Adaptationsphase der Gruppen $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ / V^+_{pos}-Vib und F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$ nicht unterschieden (Abb. 17a). Sowohl in der Bedingung ohne als auch mit Vibration stieg der Fehler zu Beginn der Adaptation an und reduzierte sich gleichermaßen. Lediglich in der ersten Episode war der Fehler in der Bedingung mit Vibration höher als ohne Vibration. Jedoch unterschied sich der Adaptationsverlauf der voradaptierten Bedingung ($V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$) deutlich von den beiden anderen. Diese Adaptationsphase begann mit einem Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft, der sich in der zweiten Episode leicht erhöhte und bis zum Ende nicht reduzierte. Dies bedeutet, dass die Bewegungen bis zum Ende der Adaptation überkompensiert blieben. Entsprechend dieser Beobachtungen ergab die gerechnete ANOVA einen signifikanten Effekt für Episode, Bedingung und deren Interaktion (Tab. 32). Der Post-hoc Test für den Faktor Bedingung ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der voradaptierten und den beiden naiven Bedingungen (Tab. 33). Der Post-hoc Test der Interaktion (Episode * Bedingung) ergab,

dass sich zwischen den naiven und der voradaptierten Gruppe jeweils alle Episoden unterschieden, zwischen den beiden naiven Bedingungen keine.

Wie während der Adaptation gab es auch während der **Deadaptation** keinen Unterschied zwischen der nicht vibrierten ($F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ und $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib) und der vibrierten (F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$) Bedingung. In beiden Fällen ist in gleichem Maße ein Nacheffekt als Fehler entgegengesetzt zur zuvor wirkenden Kraft zu erkennen, welcher in derselben Weise reduziert wurde. Dementsprechend wies die ANOVA für die Deadaptation einen Episodeneffekt auf. Der Faktor Bedingung und die Interaktion (Episode * Bedingung) waren nicht signifikant (Tab. 34).

In Abb. 17b sind die entsprechenden Verläufe der **Adaptation** an die Störung $\mathbf{V^+_{pos}}$ der vier verschiedenen Bedingungen sowie die Deadaptationsphase der Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$ dargestellt. In allen Bedingungen zeigte sich zu Beginn der Adaptation ein Fehler in Richtung der wirkenden Störung, wobei für die naive Bedingung der Gruppe $V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$ während den ersten beiden Adaptationsepisoden ein höherer Fehler als für alle voradaptierten Bedingung zu verzeichnen war. Die voradaptierten Bedingungen unterschieden sich nicht voneinander. Entsprechend der Beobachtungen wies die gerechnete ANOVA einen signifikanten Episodeneffekt und eine signifikante Interaktion zwischen Eposide * Bedingung auf (Tab. 32). Der Post-hoc Test der Interaktion bestätigte den Unterschied der ersten beiden Adaptationsepisoden zwischen der naiven Bedingung und der voradaptierten Bedingung $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ als signifikant. Zwischen der naiven Bedingung und den voradaptierten Bedingungen F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$ und $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib war jeweils nur die erste Episode signifikant unterschiedlich. Der Faktor Bedingung war nicht signifikant. Die **Deadaptationsphase** zeigte einen deutlichen Nacheffekt als Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft, der sich im Verlauf zur zweiten Episode reduzierte.

Tab. 32: Ergebnisse der ANOVAs des $error_t$ (Exp. 7) der Adaptationsphase an F^-_{geschw} und V^+_{pos}.

Effekt	$\mathbf{F^+_{geschw}}$	$\mathbf{V^+_{pos}}$
Episode	F(19, 551) = 31, 94***	F(19, 532) = 45,09***
Bedingung	F(2, 29) = 54, 47***	F(3, 28) = $0,01^{n.s.}$
Episode * Bedingung	F(38, 551) = 5,05***	F(57, 532) = 4,0***

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 33: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung des $error_t$ für F^+_{geschw} (Exp. 7).

Bedingung	$\mathbf{F^+_{geschw}}$ (AD1)	$\mathbf{F^+_{geschw}}$**–Vib** (AD1)	$V^+_{pos} \rightarrow \mathbf{F^+_{geschw}}$ (AD2)
$\mathbf{F^+_{geschw}}$ (AD1)		$p = 0{,}813^{n.s.}$	$p = 0{,}000^{***}$
$\mathbf{F^+_{geschw}}$**–Vib** (AD1)	$p = 0{,}813^{n.s.}$		$p = 0{,}000^{***}$
$V^+_{pos} \rightarrow \mathbf{F^+_{geschw}}$ (AD2)	$p = 0{,}000^{***}$	$p = 0{,}000^{***}$	

Tab. 34: Ergebnisse der ANOVA des $error_t$ (Exp. 7) der Deadaptationsphase von F^+_{geschw}.

Effekt	**Deadaptation**
Episode	$F(1, 22) = 65{,}43^{*}$
Bedingung	$F(1, 22) = 1{,}15^{n.s.}$
Episode * Bedingung	$F(1, 22) = 0{,}64^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

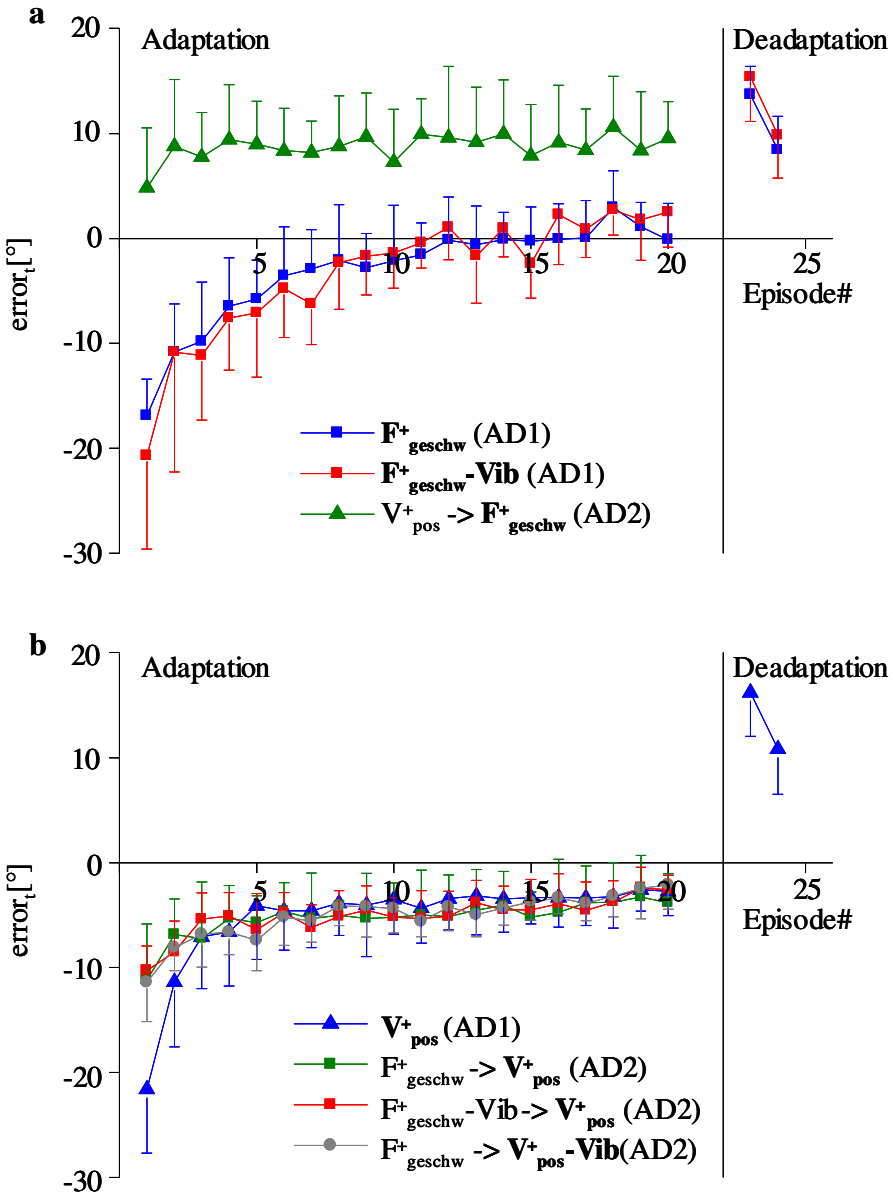

Abb. 17:Zeitlicher Verlauf des $error_t$ (Exp. 7). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung für die Adaptations- und Deadaptationsphase für die Adaptation an die Störungen **a.** F^+_{geschw} und **b.** V^+_{pos}.

Vel_{150} / $Dist_{150}$

Weder für den Parameter Vel_{150} zur Überprüfung des $error_t$ der Adaptation an F^+_{geschw}, noch für den Parameter $Dist_{150}$ zur Überprüfung der Adaptation an V^+_{pos} konnten signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen festgestellt werden (s. Anhang). Somit wurden die störungsspezifischen Parameter $error_v$ und $error_d$ außer Betracht gelassen.

Stabw_error$_t$

Zur Überprüfung eines möglichen Einflusses der Vibration auf die Adaptation an die F^+_{geschw} wurde dieser Parameter für diese Störung zusätzlich untersucht (Abb. 18). Es wird deutlich, dass sich die Variabilität für alle drei Bedingungen im Verlauf der Adaptation reduzierte. Entscheidend ist, dass die Stabw_error$_t$ für die vibrierte Bedingung der Gruppe F^+_{geschw}-Vib → V^+_{pos} insgesamt signifikant höher war als für die beiden nicht vibrierten Bedingungen. Dementsprechend wies die gerechnete ANOVA sowohl einen signifikanten Episodeneffekt, als auch einen signifikanten Effekt für den Faktor Bedingung auf (Tab. 35). Die Interaktion (Episode * Bedingung) war nicht signifikant. Der Post-hoc Test für den Faktor Bedingung bestätigte den Unterschied zwischen der vibrierten und den beiden nicht-vibrierten Bedingungen als signifikant (Tab. 36).

Tab. 35: Ergebnisse der ANOVA der Stabw_error$_t$ (Exp. 7) der Adaptationsphasen an F^+_{geschw}.

Effekt	**F^+_{geschw}**
Episode	$F(19, 513) = 2{,}81^*$
Bedingung	$F(2, 27) = 6{,}6^{**}$
Episode * Bedingung	$F(38, 513) = 0{,}9^{n.s.}$

Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus für den Faktor Bedingung, den Innersubjektfaktor Episode und deren Interaktion.

Tab. 36: Ergebnisse des Post-hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung der Stabw_error$_t$ für F^+_{geschw} (Exp. 7).

Bedingung	**F^+_{geschw}** (AD1)	**F^+_{geschw}–Vib** (AD1)	V^+_{pos} → **F^+_{geschw}** (AD2)
F^+_{geschw} (AD1)		$p = 0{,}002^{**}$	$p = 0{,}846^{n.s.}$
F^+_{geschw}–Vib (AD1)	$p = 0{,}002^{**}$		$p = 0{,}013^{*}$
V^+_{pos} → **F^+_{geschw}** (AD2)	$p = 0{,}846^{n.s.}$	$p = 0{,}013^{*}$	

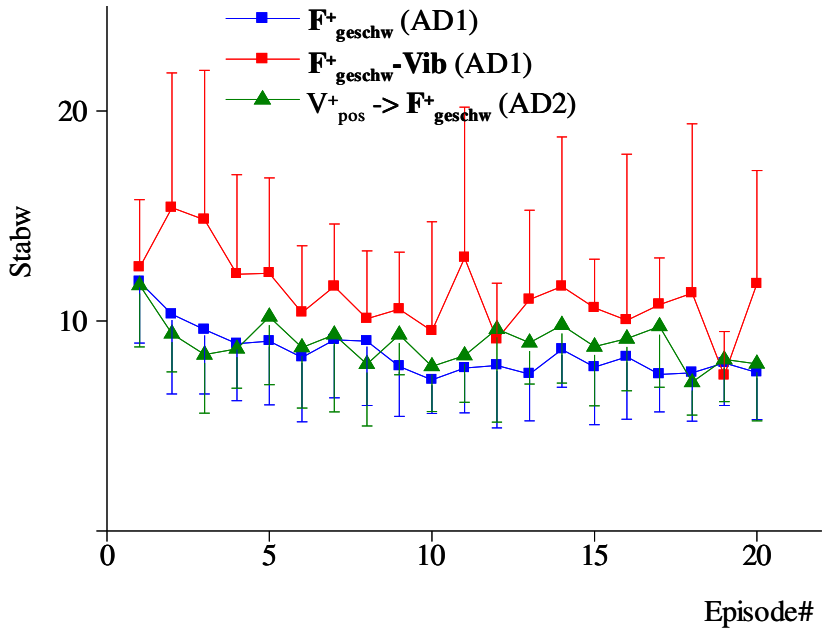

Abb. 18 Zeitlicher Verlauf der Stabw_error$_t$ (Exp. 7). Dargestellt sind die Gruppenmittelwerte für jede Episode und deren Standardabweichung der Adaptationsphase für die Adaptation an die Störung F^+_{geschw}.

2.5.3 Exp. 7: Diskussion

Ziel dieses Experimentes war es die Notwendigkeit der Präsens der gleichen Sinnesmodalität für den Transfer zwischen visuellen und mechanischen Diskordanzen zu erforschen.

Zunächst ist jedoch anzumerken, dass der zuvor bestätigte Einfluss der Vibration auf die Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft erstaunlicherweise nicht gezeigt werden konnte. Somit stehen diese Ergebnisse im Konflikt zu denen aus Experiment 6a und der Studie von Pipereit et al. (2006). Unterschiede zur letztgenannten Studie, die aus einem ähnlichen Versuchsaufbau wie in Experiment 6a resultieren, sind als mögliche Ursachen schon in der Diskussion jenes Experiments behandelt worden (Kapitel 2.4.3, S. 85f). Diese liefern jedoch keine Erklärung dafür, dass der Unterschied zwischen der vibrierten und nicht-vibrierten Bedingung in diesem Experiment nicht bestätigt werden konnte.

Im Gegensatz zu Experiment 6a und der Studie von Pipereit et al. (2006) wurde keine visuelle Rückmeldung während der Adaptation an die geschwindigkeitsabhängige Kraft dargeboten. Daraus resultiert die Annahme, dass die Probanden ohne visuelle Rückmeldung besser in der Lage sind an die Kraft zu adaptieren als mit visueller Rückmeldung, wenn ihre Propriozeption

herabgesetzt wurde. Diese Tatsache klingt zunächst paradox. Im Zusammenhang mit der Literatur findet sich jedoch ein sinnvoller Erklärungsansatz. Scheidt et al. (2005) setzten die Probanden einem geschwindigkeitsabhängigen Kraftfeld aus, während die visuelle Rückmeldung trotz mechanischer Ablenkung geradlinig vom Start zur Zielposition verlief. Durch die Inkongruenz zwischen visueller und propriozeptiver Information waren die Probanden nicht in der Lage an die Kraft zu adaptieren. Dazu passend ist die Theorie der visuellen Aufmerksamkeitssteuerung (Holmes et al. 2004, Redding & Wallace 2004, van Beers et al. 2002) zu nennen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der visuelle Informationskanal anderen Quellen vorgezogen wird und somit dominiert. In vergleichbarer Weise kann das Phänomen des vorliegenden Experiments erklärt werden. Vermutlich wird auch bei gestörter oder herabgesetzter propriozeptiver Rückmeldung durch Vibration diese Informationsquelle vernachlässigt und die Aufmerksamkeit auf die visuelle Rückmeldung verstärkt. Die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung zur Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft führt somit zur Verschlechterung der Adaptationsleistung. Ist die visuelle Rückmeldung ausgeschaltet, verlagert sich jedoch die Aufmerksamkeit auf die überbleibenden propriozeptiven Informationen, die bei intensiverer Aufmerksamkeit ausreichen, um erfolgreich zu adaptieren. Somit können die Unterschiede sowohl zu Experiment 6a, als auch zur Studie von Pipereit et al. (2006) erklärt werden.

Auch während der Deadaptation konnte kein Unterschied zwischen der vibrierten und nichtvibrierten Bedingung nachgewiesen werden, so dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Probanden durch die herabgesetzte Propriozeption schlechter rekalibrieren.

Der Transfer der Adaptation an die visuelle Rotation auf die Adaptation an die Kraft zeigte ein vergleichbares Muster zum Transfer auf eine positionsabhängige Kraft ohne visuelle Rückmeldung aus Experiment 2. Der Verlauf der Adaptation an die Kraft der voradaptierten Gruppe $V^{+}_{pos} \rightarrow F^{+}_{geschw}$ zeigt, dass die Probanden ohne visuelle Rückmeldung den Ausgangspunkt der Voradaptation an die visuelle Rotation nutzten und von dort aus weiter an die Kraft adaptierten. Daraus resultierte der Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Kraft, der im Verlauf der Adaptation weiter anstieg. Ergänzend zu den Ergebnissen aus Experiment 2 zeigt dieses Ergebnis, dass auch für die sukzessive Adaptation an eine visuelle Rotation und ein geschwindigkeitsabhängiges Kraftfeld der kalibrierte Zusammenhang zwischen Propriozeption und visueller Rückmeldung durch die Adaptation an die visuelle Rotation bis zum Ende der zweiten Adaptationsphase bestehen bleibt. (siehe hierzu auch: Kapitel 2.2.7, S. 59f).

Für den umgekehrten Transfer der Adaptation an die Kraft auf die Adaptation an die visuelle Rotation zeigte sich das bekannte Transfermuster für die gleiche Störungskonstellation aus Experiment 3 bei intakten Sinnesmodalitäten. Der Unterschied zwischen der naiven Gruppe ($V^+_{pos} \rightarrow F^+_{geschw}$) und den drei voradaptierten Gruppen ($F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$, $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$) zeigt wiederum, dass die Adaptation an beide Störungsarten nicht unabhängig ist. Da zwischen den voradaptierten Gruppen kein Unterschied gezeigt wurde, konnte kein Nachweis dafür gefunden werden, dass der gefundene Transfer auf der Nutzung gleicher Sinnesmodalitäten basiert. Im Gegensatz zu Gruppe $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ hatten die beiden anderen voradaptierten Gruppen F^+_{geschw}-Vib $\rightarrow V^+_{pos}$ und $F^+_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$-Vib nur jeweils unterschiedliche Sinnesmodalitäten uneingeschränkt zur Verfügung. Auffallend ist jedoch, dass der Unterschied zwischen der naiven Adaptation und der voradaptierten Adaptation nur in der ersten Adaptationsepisode zu verzeichnen ist und somit im Gegensatz zu vorangegangenen Ergebnissen sehr gering ausfällt. Bei genauer Betrachtung der Adaptationsverläufe zeigt sich, dass die Probanden während der naiven Adaptation an die visuelle Rotation sehr schnell das Lernplateau erreichten und somit die Differenz zur voradaptierten Gruppen schnell ausgeglichen war. Bisherige Experimente zeigten einen längeren Zeitgang der Adaptation an eine visuelle Rotation um $\alpha = 30°$ (Exp. 2, (Tong et al. 2002, Wigmore et al. 2002). Als mögliche Erklärung wurde die im vorliegenden Experiment zusätzliche kleine Bewegungsamplitude (3 cm) in Betracht gezogen. Bei kleinen Bewegungen ist das Ausmaß der Störung in der Wahrnehmung kleiner und möglicherweise demzufolge schneller kompensierbar. Zur Überprüfung wurde eine gesonderte Ergebnisdarstellung erstellt, die nur die Daten der großen Bewegungsamplitude beinhaltete[4]. Diese hatte jedoch keine Veränderung des Adaptationszeitganges zur Folge, so dass diese Vermutung als Begründung ausgeschlossen werden konnte. Denkbar ist dennoch, dass sich die Adaptation an die kleinen Amplituden positiv auf den Zeitgang der Adaptation auswirkten. Durch die Verwendung von zwei verschiedenen Amplituden war die Variabilität der Bewegungsausführung erhöht, was sich positiv auf die Adaptation ausgewirkt haben kann. Es ist bekannt, dass variables Üben motorischer Fertigkeiten effizienter ist als Üben unter konstanten Bedingungen (McCracken & G 1977, Shea & Kohl 1991). Auch im Bereich der sensomotorischen Adaptation konnte festgestellt werden, dass die Adaptation an eine höhere Anzahl von Zielrichtungen den Transfer auf untrainierte Richtungen verbessert (Krakauer et al. 2000). Resultierend daraus kann man durchaus annehmen, dass die gesteigerte Variabilität durch verschiedene Bewegungsamplituden in der vorliegenden Arbeit die Adaptationsleistung verbessert hat.

[4] Auf die explizite Darstellung dieser Ergebnisse wurde in dieser Arbeit verzichtet.

Zusammenfassend finden wir im Gegensatz zu vorherigen Ergebnissen in der vorliegenden Studie keine Hinweise darauf, dass die Propriozeption für die Adaptation an eine geschwindigkeitsabhängige Kraft entscheidend ist. Die mögliche Ursache könnte das Ausschalten der visuellen Rückmeldung sein, durch das die Aufmerksamkeit auf die propriozeptiven Signale verstärkt wird. Die beeinträchtige Nutzung der gleichen Sinnesmodalität konnte sowohl für die visuelle Rückmeldung als auch für die propriozeptive Rückmeldung bezogen auf die Transferleistung nicht als limitierender Faktor definiert werden. Vielmehr scheint der Transfer unabhängig von der jeweils intakt präsenten Sinnesmodalität zu bestehen.

3 Allgemeine Diskussion

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist zu erforschen, inwiefern die Adaptation an unterschiedliche Arten von Störungen durch gemeinsame oder unterschiedliche Mechanismen verarbeitet wird. Zusätzlich wurden der Einfluss der visuellen und vor allem der bisher in diesem Zusammenhang kaum untersuchten propriozeptiven Sinnesmodalität auf die Adaptation und deren Verarbeitungsmechanismen als zusätzlicher Schwerpunkt einbezogen. In verschiedenen Experimenten wurden dazu Transfereffekte zwischen unterschiedlichen Störungsarten evaluiert. Darüber hinaus wurden die Notwendigkeit intakter Propriozeption für die Adaptation an mechanische und visuelle Störungen sowie der Einfluss der propriozeptiven und visuellen Sinnesmodalität auf das Transferverhalten zwischen mechanischen und visuellen Störungen untersucht. Die verwendeten mechanischen und visuellen Störungen waren jeweils entweder abhängig von der Position oder von der Geschwindigkeit der Hand. Die verwendeten Kräfte zur Induzierung der mechanischen Störungen wurden über den Hebelarm eines robotischen Manipulandums auf den Arm übertragen. Eine Ausnahme stellte Experiment 5 dar. Hier wurde zusätzlich ein Kraftfeld durch die sogenannte Corioliskraft erzeugt, welches ohne direkten, definierten Kontakt zum agierenden Arm funktionierte. In allen Experimenten konnte an die unterschiedlichen Arten von Störungen der aus der Literatur bekannte Verlauf der Adaptation ausgehend von einer störungsinduzierten Verschlechterung der Bewegungsgenauigkeit gezeigt werden.

Im Folgenden werden nach der Methodenkritik die Ergebnisse der einzelnen Experimente zusammenhängend diskutiert, mit dem Ziel ein Gesamtbild der Einzelergebnisse und deren Interpretation zu erreichen. Eine Ausnahme ist Experiment 4, welches als Nebenexperiment zu Experiment 5 in der allgemeinen Diskussion nicht explizit einbezogen wird.

3.1 Methodenkritik

Probanden

Als Probanden wurden nahezu ausschließlich Sportstudenten rekrutiert, so dass die Stichproben nicht als repräsentativ für die Gesamtbevölkerung gesehen werden können. Vor allem bei Experimenten, die sich mit motorischen Lernprozessen auseinandersetzen, ist naheliegend, dass durch intensive motorische Vorerfahrungen Vorteile gegenüber Nichtsportlern entstehen können. Allerdings handelte es sich bei den durchgeführten Zeigebewegungen um einfach durchzuführende Bewegungen und keine komplexen, anspruchsvollen Bewegungsmuster, so dass diese auch von Nicht-Sportlern problemlos durchgeführt werden könnten.

Versuchsaufbau

Hier ist die verwendete Methodik der Agonist-Antagonist Vibration zu erwähnen. Im Gegensatz zu bisherigen Methoden ist die hier verwendete insofern fortschrittlicher, als dass Muskelspindeln mehrerer Muskelgruppen gleichzeitig beeinträchtig werden konnten und so Bewegungen aus dem gesamten Arm im Gegensatz zu eingelenkigen Bewegungen aus dem Handgelenk möglich waren. Jedoch ist die erbrachte Intensität eindeutig begrenzt. Limitierende Faktoren waren zum einen ein vergleichsweise großer Muskelquerschnitt bei dem zu vibrierenden Muskel oder auch Fettgewebe, so dass die Intensität der Wirkung bei den Probanden stark variieren konnte. Hervorzuheben ist jedoch, dass alle Probanden, die durch einseitige Vibration keine Bewegungsillusion bekamen, von den gesamten Versuchen ausgeschlossen wurden. Außerdem war die Wirkung der Vibration an den größeren Muskelgruppen im Schulterbereich generell geringer als im Bereich des Handgelenks. Zusätzlich konnten durch die verwendete Methodik nicht alle an den Bewegungen beteiligten Muskelgruppen beeinträchtigt werden. Das bedeutet, dass unkontrollierbare Anteile propriozeptiver Rückmeldung während der Armbewegungen vorhanden waren. Da jedoch die Adaptation an die mechanische, geschwindigkeitsabhängige Diskordanz durch die Vibration beeinträchtigt werden konnte, zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die verwendete Methodik effektiv war.

Darüber hinaus kritisierenswert ist das verwendete robotische Manipulandum, welches als kraftproduzierendes Gerät zur Generierung der mechanischen Diskordanzen diente. Leider war die Belastungsgrenze des Manipulandums sehr gering, so dass die Intensität der produzierten Kräfte stark limitiert war. Somit mussten die Kraftintensitäten vor allem bei positionsabhängigen Kräften sehr niedrig gehalten werden. Resultierend konnten nur geringe Fehler zu

Beginn einer Adaptationsphase erreicht werden und die Adaptation war schnell abgeschlossen. Größere Kräfte und längere Adaptationsphase hätten möglicherweise aussagekräftigere Ergebnisse liefern können.

Versuchsdesign
Zwischen den einzelnen durchgeführten Experimenten waren die Bewegungsamplituden, die Störgrößen der verwendeten Diskordanzen und die Dauer der Adaptationsphasen variabel. Zum einen war dies von Vorteil, da eine Abhängigkeit der Gesamtergebnisse von diesen Parametern somit ausgeschlossen werden konnte. Zum anderen war die Vergleichbarkeit der Daten zwischen den einzelnen Experimenten dadurch limitiert.

Ein deutlicher Nachteil zeigt sich in den Transferexperimenten 2 und 3. Die hier verwendeten visuellen Störungen waren wesentlich intensiver als die mechanischen Störungen, deren Intensität durch das robotische Manipulandum limitiert war (s.o.). Resultierend waren das Adaptationsausmaß durch größere Fehler zu Beginn der Adaptation an die visuellen Rotationen größer. Der Nachteil machte sich vor allem bei der Adaptation an Störungen mit gleicher Polarität (gleicher Richtung) bemerkbar, da die Voradaptation keinen direkten positiven Effekt auf die folgende Adaptation hatte. Das Resultat war ein Fehler entgegengesetzt zur wirkenden Störungen. Eine differenzierte Betrachtung eines möglichen Unterschieds zwischen positiven und negativen Transfereffekten, hervorgerufen durch die Polarität der Störungen war somit nur in Exp. 1 für den beidseitigen Transfer zwischen visuellen Störungen mit unterschiedlicher kinematischer Kopplung zur Handbewegung nachweisbar.

3.2 Adaptive Mechanismen

Bei der Adaptation an unterschiedliche Arten von Störungen werden aufgrund der Ergebnisse bisheriger Studien interferierende adaptive Mechanismen vermutet. Diese Interpretation impliziert, dass der durch die Adaptation induzierte erhöhte Rechenaufwand des Arbeitsgedächtnisses dadurch verlangsamt wird, dass dazu benötigte Ressourcen durch eine vorangegangene Adaptation nicht ausreichend zur Verfügung stehen (Krakauer et al. 1999, Wigmore et al. 2002). In bisherigen Studien wurde der negative Transfer sowohl bei der Adaptation an eine visuelle Rotation und ein positionsabhängiges Kraftfeld (Tong et al. 2002), als auch an ein geschwindigkeitsabhängiges Kraftfeld und ein positionsabhängiges Kraftfeld (Bays et al.

2005) mit Interferenz erklärt. Voneinander unabhängige Mechanismen konnten aufgrund des gefundenen Transfers für die Adaptation an die verwendeten Störungen definitiv ausgeschlossen werden.

In den vorliegenden Experimenten 1-3 adaptierten die Probanden sukzessive an Störungen mit *unterschiedlicher kinematischer Kopplung* (geschwindigkeitsabhängig versus positionsabhängig) zur Bewegung, aber gleicher physikalischer Natur (Exp. 1), an Störungen mit gleicher kinematischer Kopplung zur Bewegung, aber *unterschiedlicher physikalischer Natur* (visuell versus mechanisch) (Exp. 2) oder an Störungen sowohl mit *unterschiedlicher kinematischer Kopplung* zur Handbewegung, als auch *unterschiedlicher physikalischer Natur* (Exp. 3). Dabei agierten die Störungen entweder entgegengesetzt zueinander (unterschiedliche Polarität) oder in die gleiche Richtung (gleiche Polarität). Es zeigten sich deutliche Transfereffekte zwischen den Adaptationen an die unterschiedlichen Störungen. Die Adaptation an Störungen mit unterschiedlicher Polarität resultierte in einer verschlechterten Ausgangssituation für die zweite Adaptation, während die Adaptation an Störungen mit gleicher Polarität eine verbesserte beziehungsweise überkompensierte Ausgangsposition zur Folge hatte.

Die dargestellte Meinung aus der Literatur, dass die Adaptation an unterschiedliche Störungen interferiert, konnte somit aufgrund des positiven Einflusses der sukzessiven Adaptation an Störungen mit gleicher Polarität widerlegt werden. Vielmehr sprechen die Indizien aus den vorliegenden Experimenten dafür, dass die Adaptationen an die in den jeweiligen Experimenten verwendeten Störungen auf gemeinsamen adaptiven Mechanismen beruhen. Bei gleichen Störungsarten mit unterschiedlicher Störungsintensität oder Polarität fand man das gleiche Phänomen, wodurch man auch hier von gemeinsamen adaptiven Mechanismen ausgeht (Abeele & Bock 2001b, Abeele & Bock 2001a, Bock et al. 2003, Lazar & Van Laer 1968).

Neben der Existenz eines gemeinsamen adaptiven Mechanismus muss, wie schon erwähnt, ein weiterer möglicher Erklärungsansatz in Betracht gezogen werden. Ebenfalls möglich ist, dass zwei Mechanismen gemeinsam, nämlich die Deadaptation der vorangegangenen Störung und die Adaptation an die zweite Störung für die gefundenen Transfereffekte verantwortlich sind. Die Ergebnisse aus Experiment 1 zeigen, dass diese Erklärung für die Adaptation an Störungen mit entgegengesetzter Polarität nicht widerlegt werden kann, da sich die tatsächliche Adaptation nicht von den berechneten Annahmen der Adaptationsverläufe als Summe aus Deadaptation und Adaptation unterschied. Für Störungen mit gleichgerichteter Polarität konn-

te diese Möglichkeit allerdings ausgeschlossen werden, da ein signifikanter Unterschied zwischen der tatsächlichen Adaptation und der errechneten Annahme gezeigt werden konnte (siehe Kapitel 2.2.2, S. 44). Folglich gibt es einen Hinweis darauf, dass möglicherweise die Polarität in Bezug auf die Art und Weise der Verarbeitungsprozesse von Relevanz ist. Jedoch konnte dieser Unterschied nur für visuelle Störungen mit unterschiedlicher kinematischer Kopplung zu Handbewegung (Exp. 1) gezeigt werden.

In bisherigen Studien wurde der Unterschied zwischen positiven und negativen Transfereffekten nicht in Betracht gezogen (Bays et al. 2005, Tong et al. 2002). Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich jedoch spekulieren, dass die Wirkungsweise einer vorangegangenen Adaptation einen Einfluss auf die Art und Weise der Verarbeitungsmuster nimmt. Eine profitable Situation in Form einer durch Voradaptation entstandenen sensomotorischen Transformation, das heißt eines repräsentierten Zusammenhangs zwischen sensorischer Information und motorischer Antwort, welcher sich positiv auf die neue Bedingung auswirkt, wird sinnvollerweise genutzt. Eine Deadaptation findet somit in diesem Fall nicht statt. Anstatt dessen wird die vorhandene Transformation störungsadäquat weiter verändert. Ein negativer Transfereffekt, der hier durch die Adaptation mit entgegengesetzter Polarität hervorgerufen wurde, bedeutet zunächst einen verschlechterten Ausgangspunkt für die folgende Adaptation. In diesem Fall wird möglicherweise eine beschleunigte Fehlerkorrektur durch eine zusätzliche Deadaptation der vorangegangenen Adaptation erreicht. Diese Erklärung beschreibt ein flexibles System, welches je nach Bedingung in der Lage ist, sich entsprechend anzupassen, mit dem Bestreben positive Effekte zu bewahren und negative Effekte zu verwerfen. Anzumerken ist allerdings, dass sich diese Vermutung bisher nur auf die Ergebnisse von Experiment 1 stützt, in welchen Transfereffekte zwischen visuellen Störungen mit unterschiedlicher kinematischer Kopplung zur Handbewegung untersucht wurden.

Essentiell konnte herausgefunden werden, dass die adaptiven Mechanismen der Adaptation an die verwendeten Störungsarten nicht unabhängig voneinander repräsentiert sind und nicht interferieren. Möglicherweise jedoch ist die Intenstität der gegenseitigen Beeinflussung je nach Bedingung variabel, so dass abstrakt davon ausgegangen werden kann, dass die adaptiven Mechanismen bedingungsspezifisch unterschiedlich stark überlappen.

Einen Hinweis darauf, dass die Polarität der Störungen bei sukzessiver Adaptationen bezogen auf die Verarbeitungsprozesse eine Rolle spielt, findet sich in Studien zur Untersuchung des

intermanuellen Transfers bei sensomotorischer Adaptation (Sainburg & Wang 2002, Wang & Sainburg 2003). In diesen Studien konnte ein positiver Transfer auf die ungeübte Hand festgestellt werden, wenn die zweite Hand an eine Störung mit gleicher Polarität adaptierte. Bei der Verwendung von Störungen mit unterschiedlicher Polarität gab es keine Transfereffekte (siehe auch Kapitel 2.2.7, S. 61f). Passend zur oben beschriebenen Spekulation kann vermutet werden, dass bei positiver Wirkung auf die gebildete Transformation zugegriffen wird, jedoch bei negativer Wirkung der Zugriff nicht gewährleistet wird. Als elementarer Unterschied zu den Ergebnissen der Experimente 1-3 blieben die Transfereffekte in den Studien von Sainburg & Wang (2002) und Wang & Sainburg (2003) komplett aus. Folglich sind in diesem Fall die adaptiven Mechanismen unabhängig voneinander repräsentiert, so dass diese nicht zu überlappen scheinen.

Einen möglichen Erklärungsansatz für diesen Unterschied bieten Studien, welche die Fähigkeit des sensomotorischen Systems der kontextabhängigen Kodierung feststellen konnten (Bock et al. 2005c, Gandolfo et al. 1996, Ghahramani & Wolpert 1997, Hwang et al. 2003, Mistry & Contreras-Vidal 2004, Osu et al. 2004, Wada et al. 2003, Woolley et al. 2007). Wie schon in der Einleitung erwähnt, konnten diese Studien zeigen, dass durchaus Bedingungen geschaffen werden können, die zu einer unabhängigen Adaptation an verschiedene Störungen führen. In diesem Fall bestehen die jeweils störungsspezifischen Transformationen unabhängig voneinander und die Adaptation an eine Störung hat keinen Einfluss auf die Adaptation an eine weitere Störung. Die wohl effektivste Bedingung, die zu einer unabhängigen Adaptation an mehrere Störungen führen kann, ist die Nutzung verschiedener Muskelgruppen beispielsweise durch die Adaptation mit unterschiedlichen Händen (Bock et al. 2005c, Gandolfo et al. 1996, Woolley et al. 2007). Auch unterschiedliche Arbeitsbereiche erweisen sich als effektive Situation, um verschiedene Kontexte zu trennen (Ghahramani & Wolpert 1997, Hwang et al. 2003, Woolley et al. 2007). Durch eine farbliche Kodierung konnte nicht immer eine unabhängige Adaptation erreicht werden oder die Verbesserung während der Adaptation dauerte verhältnismäßig lange (Wada et al. 2003). Die Fähigkeit zum kontextabhängigen Kodieren bietet einen möglichen Erklärungsansatz für das Ausbleiben des Transfers in den Studien von Sainburg & Wang (2002) und Wang & Sainburg (2003) bei Störungen mit entgegengesetzter Polarität. Konträr ist jedoch der gefundene Transfer für Störungen mit gleicher Polarität. Bei genauer Betrachtung der oben aufgeführten Studien bezogen auf kontextabhängige Kodierung fällt auf, dass grundsätzlich Störungen mit unterschiedlicher Polarität verwendet wurden, an die ohne Transfereffekte unabhängig voneinander adaptiert werden konnte. Es ist somit mög-

lich, dass kontextspezifisches Kodieren bei der Adaptation an Störungen mit gleicher Polarität nicht auftritt. Dies würde bedeuten, dass die durch gleiche Polarität erreichten positiven Effekte durchaus transferiert werden. Die Ergebnisse aus den Studien von Sainburg & Wang (2002) und Wang & Sainburg (2003) bestärken diese Vermutung. Betrachtet man die einzeln beschriebenen Kontexte als Gesamtbild, so finden sich verschiedene Einflussfaktoren für den Grad der Überlagerung adaptiver Mechanismen. Zum einen können Bedingungen geschaffen werden, die eine unabhängige Repräsentation zur Folge haben („contextual cueing“) und zum anderen hat die Tatsache, ob es sich um eine positive oder negative Auswirkung handelt, einen Einfluss auf den Grad der Überlappung.

Auch Experiment 5 diente wie schon die Experimente 1-3 der Fragestellung nach der Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen, allerdings bei auf unterschiedliche Art und Weise hervorgerufenen aber ähnlich wirkenden Kraftfeldern. Dabei handelte es sich um eine robotische, geschwindigkeitsabhängige Kraft und die Corioliskraft. Die Experimente 1-3 und 5 wurden gesondert behandelt, da der jeweilige Ausgangspunkt basierend auf bisherigen Erkenntnissen ein anderer war. Den ersten drei Experimenten lag die Meinung zugrunde, dass die Adaptation an die verschiedenen Arten von Störungen auf interferierenden Arbeitsprozessen basiert (Krakauer et al. 1999, Shadmehr & Brashers-Krug 1997). Den entscheidenden Unterschied zwischen den verwendeten Störungen stellten dabei zum einen die physikalische Natur (visuell versus mechanisch) und zum anderen die kinematische Kopplung zur Handbewegung (geschwindigkeitsabhängig versus positionsabhängig) dar. In Experiment 5 ließ die unterschiedliche Beschaffenheit der Kraftauslösung, einmal über direkten Kontakt mit dem kraftauslösenden Objekt durch aktives Greifen (robotische Kraft) und einmal ohne direkten Kontakt zum Arm (Corioliskraft), vermuten, dass unterschiedliche, unabhängige Mechanismen für die Verarbeitung beider Störungen zuständig sind (Lackner & DiZio 2005).

Die Ergebnisse von Experiment 5 heben sich insofern ab, als dass nur ein einseitiger Transfer von der Corioliskraft auf die robotische Kraft gefunden werden konnte, wenngleich beide Störungen grundsätzlich die gleiche Polarität besaßen. Zunächst konnte durch den Befund des einseitigen Transfer eindeutig gezeigt werden, dass die Existenz unterschiedlicher, unabhängiger adaptiver Mechanismen ausgeschlossen werden kann. Passend zu den oben dargestellten Spekulationen würde man jedoch beidseitige Transfereffekte erwarten, da die jeweils vorangegangene Adaptation einen positiven Effekt auf die folgende Adaptation hat. Ursachen für den nur einseitigen Transfer von der Adaptation an die robotische Kraft auf die Corioliskraft

wurden schon in der experimentbezogenen Diskussion erörtert (Kapitel 2.3.5, S. 74ff). Geht man davon aus, dass die Adaptation an die robotische Kraft zum Erreichen einer ausreichenden Rekalibrierung zu kurz war, so konnte resultierend noch keine sensomotorische Transformation ausgebildet werden, die für die Adaptation an die Corioliskraft zur Verfügung stehen konnte. Naheliegend ist jedoch ebenso eine stärker generalisierte sensomotorische Transformationsregel für die Adaptation an die Corioliskraft als an die robotische Kraft. Die Transformationsregel der Adaptation an die Corioliskraft umfasst möglicherweise einen größeren muskulären Anteil als die Transformationsregel der Adaptation an die robotische Kraft (siehe Kapitel 2.3.5, S. 75). Daraus resultierend lässt sich passend zur obigen Annahme vermuten, dass der adaptive Mechanismus der Coriolisadaptation eine Erweiterung des adaptiven Mechanismus der robotischen Adaptation darstellt. Das bedeutet, dass der adaptive Mechanismus der robotischen Adaptation möglicherweise komplett mit dem der Coriolisadaptation überlappt. Jedoch macht dieser nur einen Teil des für die Adaptation an die Corioliskraft nötigen Umfanges aus.

Aus einer gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse von Experiment 1-3 und 5 lässt sich zudem ableiten, dass die Ähnlichkeit der Störungen keine Garantie für Transfereffekte und somit für eine Überlappung der adaptiven Mechanismen ist. Robotische Kraft und Corioliskraft sind in ihrer Beschaffenheit sehr ähnlich (beides Kräfte, beide geschwindigkeitsabhängig, beide forcierten eine Auslenkung orthogonal zur Bewegungsrichtung). Im Gegensatz dazu sind die in Experiment 2 und 3 verwendeten Störungen deutlich unterschiedlich, basierend auf der Tatsache, dass es sich um eine visuelle Störung einerseits und eine mechanische Störung andererseits handelte.

3.3 Der Einfluss der Sinnesmodalitäten

Als ein weiterer Einflussfaktor auf die adaptiven Mechanismen wurde in der vorliegenden Arbeit die Nutzung der propriozeptiven und visuellen Sinnesmodalität während der Adaptation an mechanische und visuelle Diskordanzen in Betracht gezogen. Wie in der Einleitung dargestellt, unterscheidet sich die Adaptation an eine visuelle Diskordanz und eine mechanische Diskordanz in der Hinsicht, dass es durch eine visuelle Verzerrung zu einer Diskrepanz zwischen visueller und propriozeptiver Rückmeldung kommt. Dies ist bei einer mechanischen Diskordanz nicht der Fall, sondern es entsteht eine Diskrepanz zwischen intendierter und tat-

sächlicher Bewegung, während Propriozeption und visuelle Rückmeldung übereinstimmen. Des weiteren geht man davon aus, dass während der Adaptation an eine visuelle Störung die Propriozeption unterdrückt wird, um den entstandenen Konflikt zu beheben (Jones et al. 2001). In Kongruenz dazu konnte durch Herabsetzen der Propriozeption mit Hilfe der Agonist-Antagonist Vibrationsmethode keine Verschlechterung der Adaptation an eine visuelle Rotation festgestellt werden (Pipereit et al. 2006). Folglich kann man davon ausgehen, dass eine intakte Propriozeption für die Adaptation an eine visuelle Rotation nicht notwendig ist. Im Gegensatz dazu konnte in derselben Studie jedoch gezeigt werden, dass die Propriozeption bei der Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Diskordanz zu verminderter Adaptationsleistung führt (Pipereit et al. 2006).

Vorliegende Ergebnisse bestätigen den Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung, wenn auch weniger ausgeprägt (siehe auch Kapitel. 2.4.3, S. 85f). Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Verschlechterung der Adaptation ohne intakte propriozeptive Rückmeldung dadurch ausgeglichen werden konnte, dass zusätzlich die visuelle Rückmeldung ausgeschaltet wurde. Dieses Phänomen kann mit Hilfe der visuellen Aufmerksamkeitssteuerung erklärt werden (siehe Kapitel 2.5.3, S. 95). Ein Einfluss der Propriozeption an eine mechanische, positionsabhängige Diskordanz sowie eine visuelle, geschwindigkeitsabhängige Diskordanz konnte nicht gezeigt werden. Somit gibt es keinen Hinweis darauf, dass entweder die physikalische Natur einer Störung oder die kinematische Kopplung zur Handbewegung ausschlaggebend ist für die Relevanz der Propriozeption für die jeweilige Adaptation.

Die Adaptation an die mechanische, positionsabhängige Kraft wird weder verschlechtert, wenn die propriozeptive Rückmeldung herabgesetzt wird (Exp. 6a), noch wenn die visuelle Rückmeldung ausgeschaltet wird (Exp. 2). Somit bleibt unklar, welche Sinnesmodalität für die Adaptation an eine mechanische positionsabhängige Kraft dominiert, wenn beide Sinnesmodalitäten uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Das Ausbleiben eines Effektes der Vibration auf die Adaptation an die visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung ist damit zu erklären, dass die Propriozeption vermutlich während der Adaptation an eine visuelle Störung unterdrückt wird. Die Tatsache, dass die Adaptationsleistung an diese Störung auch mit intakter Propriozeption vergleichsweise schlecht ist, lässt vermuten, dass es sich bei der visuellen geschwindigkeitsabhängigen Störung möglicherweise um einen Sonderfall handelt wie in der experimentbezogenen Diskussion erörtert wurde (Kapitel 2.4.3, S. 87). Denn vermutlich wäre

die Propriozeption, wie bei der Adaptation an eine mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung, auch für die Adaptation an diese Störung zur Enkodierung der Geschwindigkeit relevant, welche allerdings aufgrund des sensorischen Konflikts unterdrückt wird. Auf dieser Grundlage liefern die Ergebnisse Hinweise darauf, dass die Wahrnehmung der Geschwindigkeit im Zusammenhang mit der resultierenden Bewegung besser über die propriozeptive Sinnesmodalität als die visuelle Sinnesmodalität enkodiert werden kann. Für eine Bewegung in Abhängigkeit von der Position ist eine solche Dominanz einer Sinnesmodalität nicht gegeben.

In Experiment 2 und vor allem in Experiment 7 wurde darüber hinaus überprüft, inwiefern die Nutzung des gleichen Sinneskanals für die Präsenz von Transfereffekten bei der Adaptation an Diskordanzen mit unterschiedlicher physikalischer Natur verantwortlich ist. Es konnte gezeigt werden, dass der Transfer nicht von der gemeinsamen Nutzung eines Sinneskanals abhängig ist. Ausgehend davon, dass die visuelle Rückmeldung während der Adaptation an eine visuelle Störung dominant ist und die Propriozeption unterdrückt wird, war durch das Ausschalten der visuellen Rückmeldung während der anschließenden Adaptation an die mechanische Störung der Zugriff auf die gleiche Sinnesmodalität nicht möglich (Exp. 2). Noch klarer getrennt war der Zugriff auf die jeweilige Sinnesmodalität in Experiment 7. Hier war während der Adaptation an die visuelle Störung zusätzlich die Propriozeption durch Vibration herabgesetzt. Dennoch konnte in beiden Experimenten ein Transfereffekt gezeigt werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Zugriff auf die ausgebildete sensomotorische Transformation während der Adaptation an eine Störung nicht sensorenspezifisch ist.

Zusätzlich bewirkte das Ausschalten der visuellen Sinnesmodalität während der Adaptation an die mechanischen Diskordanzen nach Voradaptation an die visuelle Diskordanz, dass sich die Adaptation an die mechanische Störung aufaddierte (siehe Kapitel 2.2.7, S. 59f). Dies hatte zur Folge, dass der Fehler zu Beginn der Adaptation an die mechanischen Diskordanzen bis zum Ende nicht reduziert wurde, sondern sogar entgegengesetzt zur wirkenden Kraft weiter anstieg. Dieses Phänomen zeigt den Zugriff auf einen gemeinsamen adaptiven Mechanismus beziehungsweise die komplette Überlappung der Mechanismen.

3.4 Fazit

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ergeben sich folgende Antworten auf die in der Zielsetzung formulierten übergeordneten Fragestellungen:

- Die Adaptation an Störungen, die sich in ihrer physikalischen Natur, ihrer kinematischen Kopplung zur Handbewegung oder in beidem unterscheiden, basieren nicht auf interferierenden Adaptationsmechanismen oder unterschiedlichen unabhängigen Adaptationsmechanismen. Nicht abschließend geklärt werden konnte die Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen oder unterschiedlicher voneinander abhängiger adaptiver Mechanismen.
- Die Adaptation an robotische Kräfte und Corioliskräfte ist ebenfalls nicht unabhängig voneinander oder basiert auf interferierenden Adaptationsmechanismen. Wie oben sprechen auch hier die Daten für gemeinsame adaptive Mechanismen oder unterschiedliche voneinander abhängige Mechanismen.
- Es gibt keine eindeutigen Hinweise dafür, dass die Notwendigkeit der propriozeptiven Rückmeldung bei der Adaptation an unterschiedliche Arten von Störungen von deren physikalischer Natur oder deren kinematischer Kopplung zur Handbewegung abhängt. Im Zusammenhang mit Ergebnissen aus vorhandener Literatur kann jedoch vermutet werden, dass die kinematische Kopplung einen Einfluss hat, indem die Enkodierung der Geschwindigkeit vornehmlich über die Propriozeption und nicht die visuelle Sinnesmodalität funktioniert. Diese Tatsache erklärt zusätzlich die generell schlechte Adaptationsleistung an eine visuelle, geschwindigkeitsabhängige Diskordanz.
- Die Existenz gemeinsamer adaptiver Mechanismen oder überlappender adaptiver Mechanismen basiert nicht auf der Nutzung der gleichen Sinnesmodalität, sondern ist unabhängig von den beteiligten sensorischen Informationsquellen.

Es gibt Hinweise, die spekulieren lassen, dass eine Überlappung der adaptiven Mechanismen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann, so dass bei vollständiger Überlappung die gleichen Mechanismen, also gemeinsame Mechanismen existieren. Einfluss auf den Grad der Überlappung hat die Art und Weise des Transfereffektes der jeweiligen Adaptationen, so dass eine vollständige Überlappung dann existiert, wenn die zuvor angepasste sensomotorische Transformation für die weitere Adaptation vollständig von Nutzen ist. Zusammen mit Ergebnissen aus vorhandener Literatur wird deutlich, dass das sensomotorische System flexibel die verschiedenen Adaptationsprozesse verarbeitet. Zahlreiche Einflussfaktoren, wie zum Beispiel beteiligte Muskelgruppen, verschiedene Arbeitsbereiche, die Dauer der Adaptation und

die Art und Weise gegenseitiger Auswirkung können für die Intensität der Überlappung verschiedener adaptiver Mechanismen verantwortlich sein. Begrenzte Möglichkeiten der Flexibilität und die Interaktionen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren werden durch den einseitigen Transfer zwischen der Adaptation an die Corioliskraft und die robotische Kraft deutlich. Der positive Effekt der Adaptation an die robotische Kraft konnte für die Adaptation an die Corioliskraft nicht genutzt werden, was möglicherweise auf die zu kurze Adaptationsdauer oder auch die Unterschiede im Ausmaß der beteiligten muskulären Strukturen zurückzuführen ist.

3.5 Praktische Relevanz

Die Arbeit einleitende wurde schon darauf hingewiesen, dass Erkenntnisse über Informationsverarbietung und –umsetzung unseres Nervensystems eine wichtige Grundlage für das Verständnis motorischer Lernprozesse darstellen. Innerhalb dieser Arbeit wurde durch die Erforschung von Transferleistungen von bereits Gelerntem auf unbekannte Bedingungen das Wissen über die Art und Weise der Verarbeitung von Anpassung an unterschiedliche Bedingungen erweitert. Diese Forschungsgebiet ist zunächst innerhalb der Grundlagenforschung anzusiedeln und bietet eine Basis für die Umsetzung in der praktischen Anwendung.

Die Erkenntnis, dass die Verarbeitung verschiedener Anpassungsprozesse nicht unabhängig sein muss, sondern sich sowohl positiv als negativ beeinflussen kann, ist beispielsweise im Zusammenhang mit Techniktraining im Sport bedeutsam. Werden Kenntnisse bezüglich der Verarbeitung von motorischen Lernprozessen in die Planung mit einbezogen, so kann eine Optimierung des Trainings erreicht werden. Beispielsweise werden sich behindernde Bewegungsabläufe nicht zeitnah trainiert, oder sich positiv beeinflussende Bewegungsabläufe gezielt zeitnah im Trainingsplan verankert. Für den Bereich der Sportrehabilitation gilt das Gleiche. Die Erkenntnis über die Adaptation unter Nutzung des robotischen Manipulandums stellt einen zusätzlichen Nutzen in diesem Bereich dar: Dabei ist entscheidend, dass Bewegungslernen mit Hilfe von externen Geräten durchaus auf andere Bereiche übertragbar ist. Somit gibt es Hinweise darauf, dass der Einsatz von Gerätetraining zur Wiederherstellung von ungestörtem und sicherem Bewegungsverhalten beispielsweise nach einer Verletzung sinnvoll sein kann. Natürlich ist es wichtig grundlagenbasierte Erkenntnisse auf Übertragbarkeit auf die

entsprechende Situation in der Praxis zu prüfen. Denn unter welchen Bedingungen eine Übertragbarkeit des Gelernten auf andere Situationen optimal gewährleistet ist, ist nicht eindeutig.

3.6 Ausblick

Ergänzende, sinnvolle Untersuchungen auf kurzfristige Sicht gehen schon aus der Methodenkritik hervor und beinhalten Experimente mit zusätzlicher Erhebung eines sogenannten Elektromyogramms (EMG) der an den Zeigebewegungen beteiligten Armmuskulatur. Dies wäre vor allem während Untersuchungen mit der Vibrationsmethode wünschenswert. Vor allem zur Evaluation der vermutlich auftretenden Kokontraktion beteiligter Muskelgruppen, welche einen erheblichen Einfluss auf das Adaptationsverhalten haben kann, kann diese Datenerhebung zu weiteren Erkenntnissen führen.

Langfristige Vorhaben zur weiteren Untersuchung der Verarbeitungsprozesse sollten sinnvollerweise auf Erforschung tatsächlicher Aktivierungsmuster während sukzessiver Adaptation anhand von bildgebenden Verfahren abzielen. Interessant wäre in diesem Zusammenhang die Aktivierungsmuster und Lokalisationen während einfacher Adaptation an einzelne Störungen mit denen während Transferbedingungen zu vergleichen.

Interessant wäre zudem zu untersuchen, ob die gefundenen Ergebnisse auf andere Altersgruppen übertragbar sind. Die Ergebnisse bisheriger Studien führen zu der Erkenntnis, dass bei Senioren die strategische Kontrolle, nicht aber die Rekalibrierung bei der Adaptation an visuelle Störungen beeinträchtigt ist. Zeigen Untersuchungen mit Senioren vergleichbare Transfereffekte wie in der vorliegenden Arbeit, so würde dieses Ergebnis die momentane Vermutung bekräftigen. Anhand solcher Transferexperimente könnten Untersuchungen zu möglichen Beeinträchtigungen der Adaptation im Seniorenalter sinnvoll erweitert werden. Zudem wäre es interessant zu erforschen, ob sich die Notwendigkeit bestimmter Sinnesmodalitäten für die erfolgreiche Adaptation im Seniorenalter verändert.

4 Zusammenfassung

In der Literatur geht man bisher davon aus, dass Verarbeitungsprozesse während der sensomotorischen Adaptation an verschiedene Arten von Störungen interferieren oder unabhängig voneinander repräsentiert sind. Jedoch stützen sich diese Behauptungen bisher nur auf wenige Studien und eine unvollständige Datenlage.

In dieser Arbeit wurden die Mechanismen der sensomotorischen Adaptation an unterschiedliche Arten von Störungen anhand von Zielzeigebewegungen erforscht. Zusätzlich wurde der Einfluss der Propriozeption sowie der visuellen Rückmeldung auf die Adaptation und Transfereffekte zwischen den Adaptationen an unterschiedliche Störungen untersucht. Dazu wurden insgesamt 7 Experimente durchgeführt, in denen insgesamt 5 verschiedene Störungsarten verwendet wurden. Diese Störungen unterschieden sich entweder in ihrer physikalischen Natur (visuell versus mechanisch) oder ihrer kinematischen Kopplung zur Handbewegung (geschwindigkeitsabhängig versus positionsabhängig) oder beidem.

Innerhalb von 3 Transferexperimenten wurden die Probanden sukzessive jeweils zwei verschiedenen Arten von Störungen ausgesetzt, die entweder eine Auslenkung in die gleiche Richtung (gleiche Polarität) oder in entgegengesetzte Richtungen (entgegengesetzte Polarität) hervorriefen. Sowohl für Störungen mit unterschiedlicher kinematischer Kopplung zur Handbewegung, als auch unterschiedlicher physikalischer Natur sowie beidem konnten bei gleicher Polarität positive Transfereffekte und bei entgegengesetzter Polarität negative Transfereffekte festgestellt werden.

Anhand eines weiteren Transferexperiments wurden die Adaptationsmechanismen bei auf unterschiedliche Art und Weise generierten mechanischen, geschwindigkeitsabhängigen Störungen untersucht (robotische Kraft versus Corioliskraft). Dabei hatten die verwendeten Störungen grundsätzlich die gleiche Polarität. Die Ergebnisse wiesen nur einen einseitigen positiven Transfer von der Adaptation an die Corioliskraft auf die Adaptation auf die robotische Kraft auf.

In weiteren Experimenten wurde der Einfluss der propriozeptiven Sinnesmodalität durch den Einsatz der Agonist-Antagonist Vibrationsmethode auf die Adaptation an die unterschiedlichen Störungsarten (außer Corioliskraft) untersucht. Einzig für die Adaptation an die mechanische, geschwindigkeitsabhängige Störung konnte ein Einfluss der Propriozeption nachgewiesen werden. Während der Adaptation an alle anderen Störungen wurde die Adaptation durch die Vibration nicht verschlechtert.

Ein weiteres Experiment sowie einzelne Bedingungen eines anderen Experiments konnten einen Transfer zwischen Störungen unterschiedlicher physikalischer Natur (visuell versus mechanisch) unabhängig von den vorhandenen Sinnesmodalitäten (visuell und propriozeptiv) zeigen.

Folgende Hauptaussagen können somit anhand der Ergebnisse getroffen werden:

1. Für die Adaptation an die in dieser Arbeit verwendeten unterschiedlichen Arten von Störungen kann die Existenz interferierender sowie unabhängiger Adaptationsmechanismen ausgeschlossen werden. Vielmehr ergeben sich deutliche Hinweise darauf, dass in Abhängigkeit verschiedener Bedingungen, wie der Polarität der Störungen, der Grad der Überlappung adaptiver Mechanismen variabel ist.
2. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die visuelle, geschwindigkeitsabhängige Störung möglicherweise als Sonderfall betrachtet werden muss, ergeben sich Hinweise darauf, dass für die Enkodierung einer geschwindigkeitsabhängigen Störung die Propriozeption notwendig ist.
3. Der Zugriff auf adaptive Mechanismen ist unabhängig von der während der Störungen dominanten oder präsenten Sinnesmodalität.

5 Literatur

Abeele, S. & Bock, O. (2001a). Sensorimotor adaptation to rotated visual input: different mechanisms for small versus large rotations. *Exp Brain Res, 140*, 407-10.

Abeele, S. & Bock, O. (2001b). Mechanisms for sensorimotor adaptation to rotated visual input. *Exp Brain Res, 139*, 248-53.

Anguera, J. A., Russell, C. A., Noll, D. C. & Seidler, R. D. (2007). Neural correlates associated with intermanual transfer of sensorimotor adaptation. *Brain Res, 1185*, 136-51.

Bagesteiro, L. B., Sarlegna, F. R. & Sainburg, R. L. (2006). Differential influence of vision and proprioception on control of movement distance. *Exp Brain Res, 171*, 358-70.

Balslev, D., Christensen, L. O., Lee, J. H., Law, I., Paulson, O. B. & Miall, R. C. (2004). Enhanced accuracy in novel mirror drawing after repetitive transcranial magnetic stimulation-induced proprioceptive deafferentation. *J Neurosci, 24*, 9698-702.

Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Paillard, J. & Nougier, V. (1995). Contribution of proprioception for calibrating and updating the motor space. *Can J Physiol Pharmacol, 73*, 246-54.

Bays, P. M., Flanagan, J. R. & Wolpert, D. M. (2005). Interference between velocity-dependent and position-dependent force-fields indicates that tasks depending on different kinematic parameters compete for motor working memory. *Exp Brain Res, 163*, 400-5.

Bernier, P. M., Chua, R. & Franks, I. M. (2005). Is proprioception calibrated during visually guided movements? *Exp Brain Res, 167*, 292-6.

Bernier, P. M., Chua, R., Inglis, J. T. & Franks, I. M. (2007). Sensorimotor adaptation in response to proprioceptive bias. *Exp Brain Res, 177*, 147-56.

Bernier, P. M., Burle, B., Vidal, F., Hasbroucq, T. & Blouin, J. (2009). Direct evidence for cortical suppression of somatosensory afferents during visuomotor adaptation. *Cereb Cortex, 19*, 2106-13.

Bock, O. (1992). Adaptation of aimed arm movements to sensorimotor discordance: evidence for direction-independent gain control. *Behav Brain Res, 51*, 41-50.

Bock, O. & Burghoff, M. (1997). Visuo-motor adaptation: evidence for a distributed amplitude control system. *Behav Brain Res, 89*, 267-73.

Bock, O. (2001). Mechanismen der sensomotorischen Adaptation beim Menschen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 52*, 338-342.

Bock, O. & Schneider, S. (2001). Acquisition of a sensorimotor skill in younger and older adults. *Acta Physiol Pharmacol Bulg, 26*, 89-92.

Bock, O., Schneider, S. & Bloomberg, J. (2001). Conditions for interference versus facilitation during sequential sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res, 138*, 359-65.

Bock, O. (2003). Sensorimotor adaptation to visual distortions with different kinematic coupling. *Exp Brain Res, 151*, 557-60.

Bock, O., Abeele, S. & Eversheim, U. (2003). Human adaptation to rotated vision: interplay of a continuous and a discrete process. *Exp Brain Res, 152*, 528-32.

Bock, O. (2005). Components of sensorimotor adaptation in young and elderly subjects. *Exp Brain Res, 160*, 259-63.

Bock, O., Thomas, M. & Grigorova, V. (2005a). The effect of rest breaks on human sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res, 163*, 258-60.

Bock, O., Vercher, J. L. & Gauthier, G. (2005b). Wrist vibration affects the production of finely graded forces. *Aviat Space Environ Med, 76*, 435-40.

Bock, O., Worringham, C. & Thomas, M. (2005c). Concurrent adaptations of left and right arms to opposite visual distortions. *Exp Brain Res, 162*, 513-9.

Bock, O., Pipereit, K. & Mierau, A. (2007). A method to reversibly degrade proprioceptive feedback in research on human motor control. *J Neurosci Methods, 160*, 246-50.

Bourdin, C., Gauthier, G., Blouin, J. & Vercher, J. L. (2001). Visual feedback of the moving arm allows complete adaptation of pointing movements to centrifugal and Coriolis forces in human subjects. *Neurosci Lett, 301*, 25-8.

Bourdin, C. & Bock, O. (2006). Sensorimotor adaptation to inertial forces in a multi-force environment does not depend on the number of targets: indirect validation of the altered-proprioception hypothesis. *Neuroscience Letters, 408*, 173-7.

Brashers-Krug, T., Shadmehr, R. & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature, 382*, 252-5.

Caithness, G., Osu, R., Bays, P., Chase, H., Klassen, J., Kawato, M., Wolpert, D. M. & Flanagan, J. R. (2004). Failure to consolidate the consolidation theory of learning for sensorimotor adaptation tasks. *J Neurosci, 24*, 8662-71.

Calvin-Figuiere, S., Romaiguere, P., Gilhodes, J. C. & Roll, J. P. (1999). Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration. *Exp Brain Res, 124*, 342-50.

Caselli, P., Conforto, S., Schmid, M., Accornero, N. & D'Alessio, T. (2006). Difference in sensorimotor adaptation to horizontal and vertical mirror distortions during ballistic arm movements. *Hum Mov Sci, 25*, 310-25.

Choe, C. S. & Welch, R. B. (1974). Variables affecting the intermanual transfer and decay of prism adaptation. *J Exp Psychol, 102*, 1076-84.

Coello, Y., Orliaguet, J. P. & Prablanc, C. (1996). Pointing movement in an artificial perturbing inertial field: a prospective paradigm for motor control study. *Neuropsychologia, 34*, 879-92.

Cordo, P., Carlton, L., Bevan, L., Carlton, M. & Kerr, G. K. (1994). Proprioceptive coordination of movement sequences: role of velocity and position information. *J Neurophysiol, 71*, 1848-61.

Cothros, N., Wong, J. D. & Gribble, P. L. (2006). Are there distinct neural representations of object and limb dynamics? *Exp Brain Res, 173*, 689-97.

Davidson, P. R., Wolpert, D. M., Scott, S. H. & Flanagan, J. R. (2005). Common encoding of novel dynamic loads applied to the hand and arm. *J Neurosci, 25*, 5425-9.

Dewar, R. (1970). Adaptation to displaced vision - the influence of distribution of practice on retention. *Percept & Psychophys, 8*, 33-34.

Dizio, P. & Lackner, J. R. (1995). Motor adaptation to Coriolis force perturbations of reaching movements: endpoint but not trajectory adaptation transfers to the nonexposed arm. *J Neurophysiol, 74*, 1787-92.

Flanagan, J. R., Nakano, E., Imamizu, H., Osu, R., Yoshioka, T. & Kawato, M. (1999). Composition and decomposition of internal models in motor learning under altered kinematic and dynamic environments. *J Neurosci, 19*, RC34.

Franklin, D. W., So, U., Burdet, E. & Kawato, M. (2007). Visual feedback is not necessary for the learning of novel dynamics. *PLoS One, 2*, e1336.

Galea, J. M. & Miall, R. C. (2006). Concurrent adaptation to opposing visual displacements during an alternating movement. *Exp Brain Res, 175*, 676-88.

Gandevia, S. C., Macefield, V. G., Bigland-Ritchie, B., Gorman, R. B. & Burke, D. (1993). Motoneuronal output and gradation of effort in attempts to contract acutely paralysed leg muscles in man. *J Physiol, 471*, 411-27.

Gandolfo, F., Mussa-Ivaldi, F. A. & Bizzi, E. (1996). Motor learning by field approximation. *Proc Natl Acad Sci U S A, 93*, 3843-6.

Gentilucci, M., Toni, I., Chieffi, S. & Pavesi, G. (1994). The role of proprioception in the control of prehension movements: a kinematic study in a peripherally deafferented patient and in normal subjects. *Exp Brain Res, 99*, 483-500.

Ghahramani, Z. & Wolpert, D. M. (1997). Modular decomposition in visuomotor learning. *Nature, 386*, 392-5.

Gilhodes, J. C., Roll, J. P. & Tardy-Gervet, M. F. (1986). Perceptual and motor effects of agonist-antagonist muscle vibration in man. *Exp Brain Res, 61*, 395-402.

Goedert, K. M. & Willingham, D. B. (2002). Patterns of interference in sequence learning and prism adaptation inconsistent with the consolidation hypothesis. *Learn Mem, 9*, 279-92.

Goodbody, S. J. & Wolpert, D. M. (1998). Temporal and amplitude generalization in motor learning. *J Neurophysiol, 79*, 1825-38.

Goodwin, G. M., McCloskey, D. I. & Matthews, P. B. (1972). Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception? *Science, 175*, 1382-4.

Graziano, M. S. (1999). Where is my arm? The relative role of vision and proprioception in the neuronal representation of limb position. *Proc Natl Acad Sci U S A, 96*, 10418-21.

Gribble, P. L., Mullin, L. I., Cothros, N. & Mattar, A. (2003). Role of cocontraction in arm movement accuracy. *J Neurophysiol, 89*, 2396-405.

Guédon, O., Gauthier, G., Cole, J., Vercher, J.-L. & Blouin, J. (1998). Adaptation in visuomanual tracking depends on intact proprioception. *J Mot Behav, 30*, 234-248.

Hay, L., Bard, C., Ferrel, C., Olivier, I. & Fleury, M. (2005). Role of proprioceptive information in movement programming and control in 5 to 11-year old children. *Hum Mov Sci, 24*, 139-54.

Heuer, H. (1984). Motor learning as a process of structural constriction and displacement. In: Prinz, W. & Sanders, A. F. (eds) *Cognition and motor processes.* Springer, Berlin, Heidelberg, pp 295-305.

Heuer, H. & Hegele, M. (2008). Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice. *Exp Brain Res, 185*, 101-10.

Holmes, N. P., Crozier, G. & Spence, C. (2004). When mirrors lie: "visual capture" of arm position impairs reaching performance. *Cogn Affect Behav Neurosci, 4*, 193-200.

Howard, I. P. (1971). Perceptual learning and adaptation. *Br Med Bull, 27*, 248-52.

Hwang, E. J., Donchin, O., Smith, M. A. & Shadmehr, R. (2003). A gain-field encoding of limb position and velocity in the internal model of arm dynamics. *PLoS Biol, 1*, E25.

Hwang, E. J., Smith, M. A. & Shadmehr, R. (2006). Dissociable effects of the implicit and explicit memory systems on learning control of reaching. *Exp Brain Res, 173*, 425-37.

Imamizu, H. & Shimojo, S. (1995). The locus of visual-motor learning at the task or manipulator level: implications from intermanual transfer. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 21*, 719-33.

Inglis, J. T. & Frank, J. S. (1990). The effect of agonist/antagonist muscle vibration on human position sense. *Exp Brain Res, 81*, 573-80.

Ingram, H. A., van Donkelaar, P., Cole, J., Vercher, J. L., Gauthier, G. M. & Miall, R. C. (2000). The role of proprioception and attention in a visuomotor adaptation task. *Exp Brain Res, 132*, 114-26.

Jones, K. E., Wessberg, J. & Vallbo, A. (2001). Proprioceptive feedback is reduced during adaptation to a visuomotor transformation: preliminary findings. *Neuroreport, 12*, 4029-33.

Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L. & Stelmach, G. E. (1997). Adaptation to gradual as compared with sudden visuo-motor distortions. *Exp Brain Res, 115*, 557-61.

Kitazawa, S., Kimura, T. & Uka, T. (1997). Prism adaptation of reaching movements: specificity for the velocity of reaching. *J Neurosci, 17*, 1481-92.

Kluzik, J., Diedrichsen, J., Shadmehr, R. & Bastian, A. J. (2008). Reach adaptation: what determines whether we learn an internal model of the tool or adapt the model of our arm? *J Neurophysiol, 100*, 1455-64.

Kohler, I. (1955). Experiments with prolonged optical distortions. *Acta Psychol, 11*, 176-178.

Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F. & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nat Neurosci, 2*, 1026-31.

Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M. F. & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci, 20*, 8916-24.

Krakauer, J. W., Ghez, C. & Ghilardi, M. F. (2005). Adaptation to visuomotor transformations: consolidation, interference, and forgetting. *J Neurosci, 25*, 473-8.

Lackner, J. R. (1984). Some influences of tonic vibration reflexes on the position sense of the contralateral limb. *Exp Neurol, 85*, 107-13.

Lackner, J. R. & Taublieb, A. B. (1984). Influence of vision on vibration-induced illusions of limb movement. *Exp Neurol, 85*, 97-106.

Lackner, J. R. & Dizio, P. (1994). Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. *J Neurophysiol, 72*, 299-313.

Lackner, J. R. & DiZio, P. A. (2000). Aspects of body self-calibration. *Trends Cogn Sci, 4*, 279-88.

Lackner, J. R. & DiZio, P. (2002). Adaptation to Coriolis force perturbation of movement trajectory; role of proprioceptive and cutaneous somatosensory feedback. *Adv Exp Med Biol, 508*, 69-78.

Lackner, J. R. & DiZio, P. (2005). Motor control and learning in altered dynamic environments. *Curr Opin Neurobiol, 15*, 653-9.

Lai, E. J., Hodgson, A. J. & Milner, T. E. (2003). Influence of interaction force levels on degree of motor adaptation in a stable dynamic force field. *Exp Brain Res, 153*, 76-83.

Lajoie, Y., Paillard, J., Teasdale, N., Bard, C., Fleury, M., Forget, R. & Lamarre, Y. (1992). Mirror drawing in a deafferented patient and normal subjects: visuoproprioceptive conflict. *Neurology, 42*, 1104-6.

Lazar, G. & Van Laer, J. (1968). Adaptation to displaced vision after experience with lesser displacements. *Percept Mot Skills, 26*, 579-82.

Mather, J. & Lackner, J. (1975). Adaptation to visual rearrangement elicited by tonic vibration reflexes. *Exp Brain Res, 24*, 103-105.

Matthews, P. B. (1988). Proprioceptors and their contribution to somatosensory mapping: complex messages require complex processing. *Can J Physiol Pharmacol, 66*, 430-8.

Matthews, P. B. C. (1972). Mammalian muscle receptors and their central actions. In: *Arnold*, London

McCracken & G, S. (1977). A test of the shema theory of discrete motor learning. *J Mot Behav, 9*, 193-201.

McGaugh, J. L. (2000). Memory - a century of consolidation. *Science, 287*, 248-51.

McNay, E. C. & Willingham, D. B. (1998). Deficit in learning of a motor skill requiring strategy, but not of perceptuomotor recalibration, with aging. *Learn Mem, 4*, 411-20.

Miall, R. C., Jenkinson, N. & Kulkarni, K. (2004). Adaptation to rotated visual feedback: a re-examination of motor interference. *Exp Brain Res, 154*, 201-10.

Milner, T. E. & Franklin, D. W. (2005). Impedance control and internal model use during the initial stage of adaptation to novel dynamics in humans. *J Physiol, 567*, 651-64.

Mistry, S. & Contreras-Vidal, J. L. (2004). Learning multiple visuomotor transformations: adaptation and context-dependent recall. *Motor Control, 8*, 534-46.

Morton, S. M. & Bastian, A. J. (2004). Prism adaptation during walking generalizes to reaching and requires the cerebellum. *J Neurophysiol, 92*, 2497-509.

Mueller, G. E. & Pilzecker, A. (1900). Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis. *Zeitschrift für Psychologie, 1*, 1-288.

Naito, E., Roland, P. E. & Ehrsson, H. H. (2002). I feel my hand moving: a new role of the primary motor cortex in somatic perception of limb movement. *Neuron, 36*, 979-88.

Osu, R., Hirai, S., Yoshioka, T. & Kawato, M. (2004). Random presentation enables subjects to adapt to two opposing forces on the hand. *Nat Neurosci, 7*, 111-2.

Pipereit, K., Bock, O. & Vercher, J. L. (2006). The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res, 174*, 45-52.

Redding, G. M. & Wallace, B. (1996). Adaptive spatial alignment and strategic perceptual-motor control. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 22*, 379-94.

Redding, G. M. & Wallace, B. (2002). Strategic calibration and spatial alignment: a model from prism adaptation. *J Mot Behav, 34*, 126-38.

Redding, G. M. & Wallace, B. (2004). First-trial adaptation to prism exposure: artifact of visual capture. *J Mot Behav, 36*, 291-304.

Redding, G. M., Rossetti, Y. & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neurosci Biobehav Rev, 29*, 431-44.

Robertson, E. M. (2004). Skill learning: putting procedural consolidation in context. *Curr Biol, 14*, R1061-3.

Roll, J. P. & Vedel, J. P. (1982). Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography. *Exp Brain Res, 47*, 177-90.

Roll, J. P., Vedel, J. P. & Ribot, E. (1989). Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res, 76*, 213-22.

Sainburg, R. L. & Wang, J. (2002). Interlimb transfer of visuomotor rotations: independence of direction and final position information. *Exp Brain Res, 145*, 437-47.

Sainburg, R. L., Lateiner, J. E., Latash, M. L. & Bagesteiro, L. B. (2003). Effects of altering initial position on movement direction and extent. *J Neurophysiol, 89*, 401-15.

Scheidt, R. A., Conditt, M. A., Secco, E. L. & Mussa-Ivaldi, F. A. (2005). Interaction of visual and proprioceptive feedback during adaptation of human reaching movements. *J Neurophysiol, 93*, 3200-13.

Schmidt, R. & Lee, T. (1999). Motor control and learning: a behavioral emphasis. In: *Human Kinetics*, Champaign

Seidler, R. D., Noll, D. C. & Chintalapati, P. (2006). Bilateral basal ganglia activation associated with sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res, 175*, 544-55.

Seitz, R. J. (2001). Motorischs Lenen: Untersuchungen mit der funktionellen Bildgebung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 52*, 343349.

Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J Neurosci, 14*, 3208-24.

Shadmehr, R. & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci, 17*, 409-19.

Shadmehr, R. & Moussavi, Z. M. (2000). Spatial generalization from learning dynamics of reaching movements. *J Neurosci, 20*, 7807-15.

Shea, C. H. & Kohl, R. M. (1991). Composition of practice: influence on the retention of motor skills. *Res Q Exerc Sport, 62*, 187-95.

Smith, M. A., Ghazizadeh, A. & Shadmehr, R. (2006). Interacting adaptive processes with different timescales underlie short-term motor learning. *PLoS Biol, 4*, e179.

Soechting, J. F. & Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *J Neurophysiol, 62*, 582-94.

Stratton, G. M. (1897). Vision without inversion of retinal image. *The psychological review, 4*, 341-481.

Takahashi, C. D., Scheidt, R. A. & Reinkensmeyer, D. J. (2001). Impedance control and internal model formation when reaching in a randomly varying dynamical environment. *J Neurophysiol, 86*, 1047-51.

Taub, E. & Goldberg, L. A. (1973). Prism adaptation: control of intermanual transfer by distribution of practice. *Science, 180*, 755-7.

Tillery, S. I., Flanders, M. & Soechting, J. F. (1991). A coordinate system for the synthesis of visual and kinesthetic information. *J Neurosci, 11*, 770-8.

Tong, C., Wolpert, D. M. & Flanagan, J. R. (2002). Kinematics and dynamics are not represented independently in motor working memory: evidence from an interference study. *J Neurosci, 22*, 1108-13.

Tong, C. & Flanagan, J. R. (2003). Task-specific internal models for kinematic transformations. *J Neurophysiol, 90*, 578-85.

van Beers, R. J., Sittig, A. C. & Denier van der Gon, J. J. (1998). The precision of proprioceptive position sense. *Exp Brain Res, 122*, 367-77.

van Beers, R. J., Wolpert, D. M. & Haggard, P. (2002). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Curr Biol, 12*, 834-7.

Vedel, J. P. & Roll, J. P. (1983). Muscle spindle contribution to the coding o fmotor activities in man. *Exp Brain Res Suppl, 7*, 253-265.

Vercher, J. L., Sares, F., Blouin, J., Bourdin, C. & Gauthier, G. (2003). Role of sensory information in updating internal models of the effector during arm tracking. *Prog Brain Res, 142*, 203-22.

Verschueren, S. M., Swinnen, S. P., Cordo, P. J. & Dounskaia, N. V. (1999). Proprioceptive control of multijoint movement: unimanual circle drawing. *Exp Brain Res, 127*, 171-81.

Vindras, P. & Viviani, P. (2002). Altering the visuomotor gain. Evidence that motor plans deal with vector quantities. *Exp Brain Res, 147*, 280-95.

Wada, Y., Kawabata, Y., Kotosaka, S., Yamamoto, K., Kitazawa, S. & Kawato, M. (2003). Acquisition and contextual switching of multiple internal models for different viscous force fields. *Neurosci Res, 46*, 319-31.

Wallace, B. & Garret, J. (1973). Reduced felt arm sensation effects on visual adaptatioan. *Percept & Psychophys, 14*, 597-600.

Wang, J. & Sainburg, R. L. (2003). Mechanisms underlying interlimb transfer of visuomotor rotations. *Exp Brain Res, 149*, 520-6.

Wigmore, V., Tong, C. & Flanagan, J. R. (2002). Visuomotor rotations of varying size and direction compete for a single internal model in motor working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 28*, 447-57.

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. & Flanagan, J. R. (2001). Perspectives and problems in motor learning. *Trends Cogn Sci, 5*, 487-494.

Woolley, D. G., Tresilian, J. R., Carson, R. G. & Riek, S. (2007). Dual adaptation to two opposing visuomotor rotations when each is associated with different regions of workspace. *Experimental Brain Research, 179*, 155-65.

Yang, J. F., Scholz, J. P. & Latash, M. L. (2007). The role of kinematic redundancy in adaptation of reaching. *Exp Brain Res, 176*, 54-69.

6 Anhang

Experiment 1

$Error_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und V^-_{geschw}.

Gruppen	Sign. unterschiedliche Episoden
V^-_{pos} (AD1) vergl. $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	1-9, 11, 13-16, 18, 19
V^-_{pos} (AD1) vergl. $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	2
V^+_{pos} (AD1) vergl. $V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	1-7, 9
V^+_{pos} (AD1) vergl. $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	1-3
$V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2) vergl. $V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	1-12, 14-19
V^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^-_{pos} \rightarrow V^-_{\mathbf{geschw}}$ (AD2)	1-30
V^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{\mathbf{geschw}}$ (AD2)	1-13, 16
$V^-_{pos} \rightarrow V^-_{\mathbf{geschw}}$ (AD2) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow V^-_{\mathbf{geschw}}$ (AD2)	1-30

Relevante extrahierte Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Episode * Bedingung.

$error_d$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und $error_v$ für V^-_{geschw}.

Effekt	V^-_{pos}/V^+_{pos}	V^-_{geschw}
Bedingung	$F(3, 46) = 3{,}86^*$	$F(2, 47) = 19{,}78^{***}$
Episode	$F(29, 1334) = 31{,}46^{***}$	$F(29, 1363) = 24{,}64^{***}$
Bedingung*Episode	$F(87, 1334) = 1{,}60^{***}$	$F(58, 1363) = 10{,}41^{***}$

ANOVAs mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

$Error_d$ für V^-_{pos} / V^+_{pos}.

Bedingung	V^-_{pos} (AD1)	V^+_{pos} (AD1)	$V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	$V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)
V^-_{pos} (AD1)		$p = 0{,}278^{n.s.}$	$p = 0{,}018^*$	$p = 0{,}289^{n.s.}$
V^+_{pos} (AD1)	$p = 0{,}278^{n.s.}$		$p = 0{,}151^{n.s.}$	$p = 0{,}046^{n.s.}$
$V^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	$p = 0{,}018^*$	$p = 0{,}151^{n.s.}$		$p = 0{,}002^{**}$
$V^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	$p = 0{,}289^{n.s.}$	$p = 0{,}046^{n.s.}$	$p = 0{,}002^{**}$	

Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung.

Error$_v$ für $\mathbf{V^-_{geschw}}$.

Bedingung	$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)	$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	$V+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)
$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1)		p = 0,000***	p = 0,049*
$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	p = 0,000***		p = 0,000***
$V+_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	p = 0,049*	p = 0,000***	

Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests des signifikanten Faktors Bedingung.

$\mathbf{V_{max}}$.

Gruppen	**Sign. unterschiedliche Episoden**
$\mathbf{V^-}_{geschw}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^-}_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	3, 5, 7-12, 14, 16, 18, 20-21, 23-29
$\mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^+}_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{geschw}}$ (AD2)	1-12
$\mathbf{V^-}_{pos} \rightarrow \mathbf{V^+}$ (AD2) vergl. $\mathbf{V^+}_{pos} \rightarrow \mathbf{V^+}$ (AD2)	keine Signifikanzen

Relevante extrahierte Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Episode * Bedingung für die Adaptation an $\mathbf{V^-}_{geschw}$.

Experiment 2

Error$_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{pos}.

Gruppen	Sign. unterschiedliche Episoden
$\mathbf{V^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	1-8
$\mathbf{V^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^+_{pos}}$ (AD2)	1-4, 6, 11
$\mathbf{V^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos/novis} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	1-2, 4
$\mathbf{V^+_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	1-3
$\mathbf{V^+_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^+_{pos}}$ (AD2)	1-6, 11
$\mathbf{V^+_{pos}}$ (AD1) vergl. $F^-_{pos/novis} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	1-3
$F^-_{pos/novis} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2)	keine Signifikanz
$F^-_{pos/novis} \rightarrow \mathbf{V^-_{pos}}$ (AD2) vergl. $F^-_{pos} \rightarrow \mathbf{V^+_{pos}}$ (AD2))	1-6, 11
$\mathbf{F^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^-_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-10
$\mathbf{F^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^+_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-13, 15-16
$\mathbf{F^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD1)	1, 14-15
$\mathbf{F^-_{pos}}$ (AD1) vergl. $V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD2)	1-16
$\mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^-_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-8
$\mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD1) vergl. $\mathbf{V^+_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-16
$\mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD1) vergl. $V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD2)	1-16
$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD2) vergl. $\mathbf{V^-_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-16
$V^-_{pos} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos/novis}}$ (AD2) vergl. $\mathbf{V^+_{pos}} \rightarrow \mathbf{F^-_{pos}}$ (AD2)	1-16

Relevante extrahierte Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Episode * Bedingung.

Dist$_{150}$ für $\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$ und $\mathbf{F^-_{pos}}$:

Effekt	$\mathbf{V^-_{pos}}$ / $\mathbf{V^+_{pos}}$	$\mathbf{F^-_{pos}}$
Episode	$F(15, 675) = 2{,}89^{***}$	$F(15, 825) = 7{,}11^{***}$
Bedingung	$F(4, 45) = 1{,}13^{n.s.}$	$F(4, 55) = 0{,}63^{n.s.}$
Episode * Bedingung	$F(60, 675) = 0{,}91^{n.s.}$	$F(60, 825) = 1{,}58^{n.s.}$

ANOVAs mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjekt-faktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

Experiment 3

$Error_t$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und F^-_{geschw}.

Gruppen	Sign. unterschiedliche Episoden
V^-_{pos} (AD1) vergl. $F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	1-3
V^-_{pos} (AD1) vergl. $F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	1-17
V^+_{pos} (AD1) vergl. $F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2)	1-7
V^+_{pos} (AD1) vergl. $F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	1-2, 7, 8, 13
$F^-_{geschw} \rightarrow V^-_{pos}$ (AD2) vergl. $F^-_{geschw} \rightarrow V^+_{pos}$ (AD2)	1-17, 19
F^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	1-20, 22, 24-26
F^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	1-16
$V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	1-21, 23-25, 28, 30

Relevante extrahierte Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Episode * Bedingung.

$Dist_{150}$ für V^-_{pos} / V^+_{pos} und Vel_{150} für F^-_{geschw}.

Effekt	V^-_{pos} / V^+_{pos}	F^-_{geschw}
Episode	$F(29, 1044) = 6{,}68^{***}$	$F(29, 1073) = 0{,}69^{n.s.}$
Bedingung	$F(3, 36) = 1{,}61^{n.s.}$	$F(2, 37) = 0{,}68^{n.s.}$
Episode*Bedingung	$F(87, 1044) = 1{,}10^{n.s.}$	$F(58, 1073) = 1{,}37^{n.s.}$

ANOVAs mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

V_{max} für F^-_{geschw}.

Gruppen	Sign. unterschiedliche Episoden
F^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	4
F^-_{geschw} (AD1) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	1
$V^-_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2) vergl. $V^+_{pos} \rightarrow F^-_{geschw}$ (AD2)	1

Relevante extrahierte Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Episode * Bedingung.

Experiment 4

$Error_t$ der Adaptation.

Kraft	**Werkzeug**	6N/Mansch	6N/Stift	12N/Mansch	12N/STift
6N	Manschette		p = 0,109$^{n.s.}$	p = 0,000***	p = 0,001***
6N	Stift	p = 0,109$^{n.s.}$		p = 0,000***	p = 0,046*
12N	Manschette	p = 0,000***	p = 0,000***		p = 0,059$^{n.s.}$
12N	Stift	p = 0,001***	p = 0,046*	p = 0,059$^{n.s.}$	

Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Kraft * Werkzeug

Vel_{150} der Adaptation

Effekt	**F^{+}_{geschw}**
Episode	F(19, 532) = 2,85***
Kraft (6, 12)	F(1, 28) = 0,15$^{n.s.}$
Werkzeug (Stift, Mansch)	F(1, 28) = 2,56$^{n.s.}$
Episode * Kraft	F(19, 532) = 0,96$^{n.s.}$
Episode * Werkzeug	F(19, 532) = 1,01$^{n.s.}$
Kraft * Werkzeug	F(1, 28) = 0,14$^{n.s.}$
Episode * Kraft * Werkzeug	F(19, 532) = 2,19$^{n.s.}$

ANOVA für die Adaptation mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

Experiment 5

Vel_{150} der Adaptation.

Effekt	**F^{+}_{geschw}**
Gruppe	F(1,11) = 0,37$^{n.s.}$
Block	F(2,22) = 4,15*
Block * Gruppe	F(2,22) = 35,06***
Bewegung	F(19,209) = 6,67***
Bewegung * Gruppe	F(19,209) = 2,58*
Block * Bewegung	F(76,836) = 0,67$^{n.s.}$
Block * Bewegung * Gruppe	F(76,836) = 1,16$^{n.s.}$

ANOVA mit dem Faktor Gruppe und den Innersubjektfaktoren Bewegung und Block. Angegeben sind die F-Werte und Signifikanzniveaus

Vel_{150} der Adaptation.

Gruppe	Block	1-R-AD	2-C-AD	3-R-AD	1-C-AD	2-R-AD	3-C-AD
1	1-R-AD		p=0,000***	p=0,458$^{n.s.}$	p=0,358$^{n.s.}$	p=0,232$^{n.s.}$	p=0,846$^{n.s.}$
1	2-C-AD	p=0,000***		p=0,000***	p=0,196$^{n.s.}$	p=0,006**	p=0,053$^{n.s.}$
1	3-R-AD	p=0,451$^{n.s.}$	p=0,000***		p=0,232$^{n.s.}$	p=0,569$^{n.s.}$	p=0,626$^{n.s.}$
2	1-C-AD	p=0,358$^{n.s.}$	p=0,196$^{n.s.}$	p=0,232$^{n.s.}$		p=0,000***	p=0,846$^{n.s.}$
2	2-R-AD	p=0,392$^{n.s.}$	p=0,006**	p=0,569$^{n.s.}$	p=0,000***		p=0,053$^{n.s.}$
2	3-C-AD	p=0,846$^{n.s.}$	p=0,053$^{n.s.}$	p=0,626$^{n.s.}$	p=0,053$^{n.s.}$	p=0,007**	

Ergebnisse des LSD-Post Hoc Tests der Interaktion Block*Gruppe. (Relevant sind die Ergebnisse von 1-R-AD/1-C-AD; 1-R-AD/2-R-AD, 1-C-AD/2-C-AD, 1-C-AD/3-C-AD, 1-R-AD/3-R-AD.

Experiment 6a/b

Vel_{150} der Adaptation für F^{+}_{geschw}-mV/ F^{+}_{geschw}-oV und V^{+}_{geschw}-mV/ V^{+}_{geschw}-oV sowie $Dist_{150}$ der Adaptation für F^{+}_{pos}mV/ F^{+}_{pos}-oV.

Effekt	F^{+}_{geschw}-mV/ F^{+}_{geschw}-oV	F^{+}_{pos}mV/ F^{+}_{pos}-oV	V^{+}_{geschw}-mV/ V^{+}_{geschw}-oV
Episode	F(21, 252) = 3,75***	F(21, 252) = 0,88$^{n.s.}$	F(21, 441) = 1,93$^{n.s.}$
Gruppe	F(1, 12) = 2,62$^{n.s.}$	F(1, 12) = 0,11$^{n.s.}$	F(1, 21) = 0,95$^{n.s.}$
Episode*Gruppe	F(21, 252) = 0,96$^{n.s.}$	F(21, 252) = 1,0$^{n.s.}$	F(21, 441) = 1,42$^{n.s.}$

ANOVAs mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

Experiment 7

Vel_{150} der Adaptation für F^{+}_{geschw} und $Dist_{150}$der Adaptation für V^{+}_{pos}:

Effekt	F^{+}_{geschw}	V^{+}_{pos}
Episode	F(19, 551) = 1,11$^{n.s.}$	F (19, 532) = 1,18$^{n.s.}$
Bedingung	F(2, 29) = 0,27$^{n.s.}$	F(3, 28) = 1,67$^{n.s.}$
Episode*Bedingung	F(38, 551) = 1,24$^{n.s.}$	F(57, 532) = 1,08$^{n.s.}$

ANOVAs mit dem Faktor Bedingung und dem Innersubjektfaktor Episode. Dargestellt sind F-Werte und Signifikanzniveaus.

Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

Monika Thomas	geb. 28.05.1980 in Aachen
	Rochusstr.91, 50827 Köln

SCHULBILDUNG

08.1989 – 05.1999	Inda-Gymnasium, Aachen, Abschluss: Abitur

STUDIUM

04.2000 – 11.2005	Sportwissenschaften an der Deutschen Sporthochschule Köln, Abschluss: Diplom
Seit 12.2005	Promotionsstudium im Institut für Physiologie und Anatomie der Deutschen Sporthochschule Köln

WISSENSCHAFTLICHE UND BERUFLICHE LAUFBAHN

04.2002 – 11.2005	Studentische Hilfskraft des Instituts für Physiologie und Anatomie, Deutsche Sporthochschule Köln
seit 12.2005	Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für und Anatomie

AUSLANDSAUFENTHALT

06.2007 – 07.2007	Kooperationsprojekt an der Faculté du Sciences du Sport, „Mouvement et Perception“, Université de la Mediterannée, Marseille

Abstract

Diese Arbeit behandelt die Fragestellung nach der Existenz gemeinsamer, interferierender oder unabhängiger Verarbeitungsprozesse bei der sensomotorischen Adaptation an unterschiedliche Störungsarten. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher zur Verfügung stehender sensorischer Informationen auf die Art und Weise der Verarbeitung untersucht. Dazu führten die Probanden Zeigebewegungen zu unterschiedlichen Zielen durch, wobei die direkte Sicht auf die agierende Hand nicht möglich war. Eine visuelle Rückmeldung über die Handposition wurde den Probanden über einen Cursor dargeboten. In verschiedenen Transferexperimenten wurden die Probanden sukzessive jeweils zwei verschiedenen Störungsarten ausgesetzt, die sich in ihrer physikalischen Natur (visuelle Störung, mechanische Störung) und/oder ihrer kinematischen Kopplung zur Handbewegung (abhängig von der Position der Hand, abhängig von der Geschwindigkeit der Hand) oder dem Wirkungsumfang einer applizierten Kraft (definierter Angriffspunkt, kein definierter Angriffspunkt) unterschieden. Die Ergebnisse brachten in allen Experimenten unter anderem positive Transfereffekte zwischen der Adaptation an die unterschiedlichen Störungen hervor. Somit ergaben sich deutliche Indizien gegen interferierende oder unabhängige Verarbeitungsprozesse. Die Art und Weise der gefundenen Transfermuster lässt die Vermutung zu, dass in Abhängigkeit verschiedener Faktoren wie der Art der Beeinflussung (begünstigend oder behindernd) zwischen der Adaptation an unterschiedliche Störungsarten und dem Umfang der Wirkungsweise applizierter Kräfte die adaptiven Prozesse komplett oder teilweise überlappen können. Zusätzlich konnte herausgefunden werden, dass die Präsenz oder Dominanz unterschiedlicher Sinnesmodalitäten während der Adaptation an unterschiedliche Störungsarten die Art und Weise der Verarbeitung nicht beeinflusst.

This work investigated whether common, interfering or independent processes exist for adaptation to different kinds of distortions. Additionally, the influence of different sensory informations on the adaptive processes has been determined. Therefore subjects executed center-out reaching movements to different target locations without seeing their acting hand. Visual feedback about the hand position was given by a cursor. During different transfer experiments subjects were exposed to two different kinds of distortions which differed in its physical nature (visual distortion, mechanical distortion) and/or its kinematic coupling to the hand (position-dependent, velocity-dependent) or in the amount of the effect of an applied force (defined point of contact, no defined point of contact). For all experiments results showed positive transfer effects between the adaptation to the different distortions. Consequently, evidence against interfering or independent adaptive processes has been found. The pattern of transfer suggests that the adaptive processes completely or partially overlap depending on different factors like the kind of influence (beneficial or constraining) between the adaptation to different kinds of distortions and the amount of the effect of applied forces. In addition, it has been shown that the presence or dominance of different kinds of sensory modalities during adaptation to different kinds of distortions does not influence the type of adaptation processing.