

UNIVERSITÄT FREIBURG, SCHWEIZ
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT
DEPARTEMENT FÜR MEDIZIN

In Zusammenarbeit mit der
EIDGENÖSSISCHEN HOCHSCHULE FÜR SPORT MAGGLINGEN

CROSS-LIMB INTERFERENZ NACH UNILATERALEM EXPLOSIVKRAFTTRAINING EINER
BALLISTISCHEN HANDGELENKFLEXION

Abschlussarbeit zur Erlangung des Masters in
Bewegungs- und Sportwissenschaften
Option Unterricht

Referent
Prof. Dr. Wolfgang TAUBE

Betreuer-In
Martin KELLER
Jan RUFFIEUX

Simon HEIMGARTNER
Fischbach-Göslikon, Januar 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Zusammenfassung.....	5
1 Einleitung.....	6
1.2 Von der klassischen Konditionierung zu spezifischen Gehirnstrukturen	7
1.3 Motorisches Lernen	9
1.3.1 Mechanismen des motorischen Lernens	10
1.3.2 Kortikale Neuroplastizität beim motorischen Lernen.....	12
1.4 Cross-limb Interferenz: Die Verknüpfung zweier Phänomene.....	16
1.4.1 Cross-limb Transfer	17
1.4.2 Mechanismen des Cross-limb Transfers.....	20
1.4.3 Interferenz im motorischen Lernen.....	23
1.4.4 Mechanismen der Interferenz im motorischen Lernen	26
1.4.5 Cross-limb Interferenz	27
1.5 Ziele und konkrete Fragestellung.....	29
2 Methoden	31
2.1 Anmerkung	31
2.2 Probanden	31
2.3 Untersuchungsdesign	31
2.4 Datensammlung und Datenaufarbeitung.....	34
2.5 Statistik	35
3 Resultate.....	37
3.1 Cross-limb Transfer	37
3.2 Explosivkrafttraining und Genauigkeitstraining.....	38
3.2.1 Explosivkrafttraining	38
3.2.2 Genauigkeitstraining.....	40
3.3 Interferenz und Cross-limb Interferenz.....	41
3.3.1 Interferenz.....	43
3.3.2 Cross-limb Interferenz	44
3.3.3 Ausmass der Interferenz und Cross-limb Interferenz	45
3.4 Reine Explosivkraftwerte und reine Timingwerte.....	46

3.4.1 Reine Explosivkraftwerte.....	47
3.4.2 Reine Timingwerte.....	49
3.5 Anmerkung	50
4 Diskussion.....	51
4.1 Cross-limb Transfer	51
4.2 Trainingsanpassungen und Trainingsdauer.....	52
4.3 Interferenz und Cross-limb Interferenz.....	54
4.4 Analyse der reinen Explosivkraft und der reinen Timingwerte.....	56
4.5 Schlussfolgerung.....	57
Literaturverzeichnis	59
Dank.....	65
Persönliche Erklärung.....	66
Urheberrechtserklärung.....	67

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zeitabhängige zelluläre Mechanismen der Plastizität (Adkins et al., 2006).....	14
Abb. 2: Hypothesen der Mechanismen des Cross-limb Transfers (Lee et al., 2010).	21
Abb. 3: Methodische Übersicht des Studiendesigns von Lundbye-Jensen et al. (2011)	24
Abb. 4: Methodische Übersicht des Studiendesigns von Lauber et al. (2013)	28
Abb. 5: Studiendesign.....	32
Abb. 6: Cross-limb Transfer aller Probanden.....	38
Abb. 7: Erzielte Leistungssteigerung der vier Gruppen während des Explosivkrafttrainings.	39
Abb. 8: Absolute Leistungsverbesserung der Explosivkraft in Newton für die vier Gruppen.	40
Abb. 9: Leistungsverbesserung der vier Gruppen während des Genauigkeitstrainings.	40
Abb. 10: Absolute Leistungsverbesserung des Genauigkeitstrainings.	41
Abb. 11: Verlauf der Explosivkraft (Pre1 - Post4).	42
Abb. 12: Ausmass der Interferenz.	43
Abb. 13: Ausmass der Cross-limb Interferenz.....	44
Abb. 14 Ausmass der Cross-limb Interferenz in der nicht trainierten Hand	45
Abb. 15: Vergleich des Ausmasses der Interferenz.	46
Abb. 16: Verlauf der reinen Explosivkraft (Pre1 - Post4)	47
Abb. 17: Vergleich des Ausmasses der Interferenz für die reinen Explosivkraftwerte.....	48
Abb. 18: Verlauf der Timinganpassungen (Pre1 - Post4).....	49

Zusammenfassung

Die Tatsache, dass unilaterales Training auch zu Leistungsverbesserungen auf der kontralateralen und untrainierten Seite führen kann, ist seit längerer Zeit bekannt. Es scheint, dass hauptsächlich neuroplastische Anpassungen in die untrainierte Hemisphäre transferieren können und den sogenannten Cross-limb Transfer verursachen. In früheren Forschungsarbeiten konnte zudem aufgezeigt werden, dass der in einer Aufgabe erzielte Leistungserfolg wieder eingebüsst werden kann, wenn kurz nach dem Trainieren eine Zweitaufgabe ausgeübt wird. Dies jedoch nur dann, wenn die Zweitaufgabe mit demselben Muskel und in dieselbe Bewegungsrichtung wie die primäre Aufgabe ausgeführt wird. Hauptverantwortlich für solche Interferenzeffekte scheinen Störungen der Gedächtniskonsolidierung zu sein.

Diese Arbeit befasst sich mit der Cross-limb Interferenz, einer noch wenig beschriebenen Kombination der zwei zuvor erwähnten Phänomene. Es konnte aufgezeigt werden, dass es auch zu Interferenzeffekten kommt, wenn zwischen zwei Sequenzen eines ballistischen Explosivkrafttrainings mit dem Handgelenkflexor eine Genauigkeitsaufgabe mit dem nicht trainierten Handgelenkflexor durchgeführt wird. Diese Studie ist zudem die Erste, welche das Ausmass der Interferenz direkt mit dem Ausmass der Cross-limb Interferenz vergleicht. Insgesamt 48 Probanden, aufgeteilt in vier Gruppen, führten ein Explosivkrafttraining mit der dominanten Hand aus. Dabei konnte nebst einer höchst signifikanten ($p < 0.001$) Steigerung der Explosivkraft in der trainierten Hand auch eine höchst signifikante ($p < 0.001$) Leistungssteigerung in der nicht trainierten Hand ausgemacht werden. Nach dem Explosivkrafttraining trainierten die Probanden eine Genauigkeitsaufgabe. Die Durchführung der Genauigkeitsaufgabe mit der dominanten Hand und dem Agonisten führte zu einem höchst signifikanten ($p < 0.001$) Leistungsabfall (Interferenz) bei der Wiederaufnahme des Explosivkrafttrainings. Ebenfalls fiel der Leistungsabfall (Cross-limb Interferenz) hoch signifikant ($p < 0.01$) aus, wenn die Genauigkeitsaufgabe mit der nicht dominanten Hand und dem Agonisten trainiert wurde. Das Ausmass der Interferenz fiel im Vergleich zu demjenigen der Cross-limb Interferenz leicht stärker aus, unterscheidet sich jedoch nicht signifikant ($p = 0.3$) voneinander. Es wird angenommen, dass während des Explosivkrafttrainings und Genauigkeitstrainings auch die kortikospinalen Areale der nicht trainierten Seite Aktivität aufwiesen. Weitere Studien sind jedoch nötig, um die Funktionsweise der Cross-limb Interferenz zu klären.

1 Einleitung

Lernen – ein Wort, welches gerade im schulischen Alltag regelmässig verwendet wird und dessen Bedeutung allgemein als selbstverständlich und selbsterklärend angesehen wird. Das Zitat des Psychologen Manfred Spitzer verdeutlicht ungemein, welchen Stellenwert dem Lernbegriff beigemessen wird: „Wenn man irgendeine Aktivität nennen sollte, für die der Mensch optimiert ist, so wie der Albatros zum Fliegen oder der Gepard zum Rennen, dann ist es beim Menschen das Lernen (Spitzer, 2003, S. 10).“ Erst bei genauerer Betrachtung wird jedoch klar, was für ein komplexes Netzwerk von Prozessen und welche Vielfalt an Verwendungsmöglichkeiten hinter dem Wort stecken. Mit dem Verständnis der Bedeutung und der Funktionsweise des Lernens eröffnet sich eine Vielzahl elementarer Prozesse der Bewegungswissenschaft. Wer sich mit dem Begriff des Lernens auseinandersetzt, wird zwangsläufig auch auf Gedächtnis – und Speicherprozesse stossen. „Lernen ist gleichbedeutend mit Informationsverarbeitung und – speicherung. Lernen und Gedächtnis lassen sich nicht trennen“ (Mielke, 2001, S. 13). Es stellt sich somit die Frage, wie die beiden Phänomene miteinander verknüpft sind und welche Strukturen auf welchen Ebenen in den verschiedenen Prozessen involviert sind. Beim Verlauf des Erlernens treten für die Forschung spannende Phänomene und Anpassungen auf neuronaler und muskulärer Ebene auf. Ein Lernprozess besteht aus dem Zeitraum, in welchem eine Aufgabe durchgeführt und komplett konsolidiert wird. Die in dieser Arbeit erläuterten Phänomene „Cross-limb Transfer“ und „Cross-limb Interferenz“ sind Erscheinungen, welche während Lernprozessen beobachtet werden können. Aus diesen Gründen soll der Begriff des „Lernens“ in diesem einleitenden Teil genauer erläutert werden und als Sinnbild für die Klärung der für diese Arbeit bedeutsamen Prozesse und Strukturen stehen. Wasserzieher (1974) bezieht sich bei der Erklärung des Begriffes „Lernen“ auf dessen gotische und indogermanische Herkunft: Es handelt sich um eine Kombination der Begriffe „Wissen“ (lais) und „Gehen“ (lis). Es kann bereits mit dem Verständnis des Herkunftsbegriffs angenommen werden, dass für die Aneignung und Speicherung von Wissen ein spezifischer Weg über mehrere Stationen zurückgelegt werden muss. Somit ist es auch nicht erstaunlich, dass in Kombination mit dem Wort „Lernen“ immer wieder die Metapher der hinterlassenen Fussabdrücke im Sand oder der Spur im Schnee fällt.

1.2 Von der klassischen Konditionierung zu spezifischen Gehirnstrukturen

Die per Zufall entdeckte klassische Konditionierung von Pawlow (1849 – 1936) legte den Grundstein zur Erforschung des Lernens auf neuronaler Ebene. Schermer (2006) erklärt in seinem Buch, wie Pawlow bei seinen Versuchen über die Verdauungsphysiologie erkannt hatte, dass die Versuchstiere bereits vor der Darbietung des Futters (natürlicher Auslöser) die Speichelsekretion auslösten. Weiterführende Analysen dieses Phänomens führten schliesslich zur Entdeckung und der Benennung des bedingten Reflexes. „Bei der klassischen Konditionierung wird somit eine im Verhaltensrepertoire befindliche Reaktion durch einen ehemals neutralen Stimulus ausgelöst, d.h. das Versuchstier lernt, auf einen neuen Reiz mit einem verfügbaren Verhalten zu antworten“ (Schermer, 2006, S. 27). Durch die klassische Konditionierung konnten bereits früh einfache Formen des Lernens experimentell nachgewiesen werden. Kandel, Schwartz, and Jessel (2011, p. 676, S. 676) schrieben zu der Entdeckung der klassischen Konditionierung durch Pawlow folgendes: „Pawlovs Arbeiten markierten eine wichtige Verlagerung des Schwerpunkts der Lernforschung, weg von einer Betonung der Introspektion hin zu einer objektiven Analyse von Reiz und ausgelöster Reaktion“. Ein weiteres Beispiel der klassischen Konditionierung ist die „eyeblick classical conditioning“. Diese Form der Konditionierung hat mit der Zeit und dem Zusammenhang der Erforschung spezifischer, am Lernprozess beteiligter Strukturen stark an Bedeutung gewonnen. Levey and Martin (1968) beschrieben in ihrer Studie das Phänomen genauer. Das reflexartige Schliessen des Augenlieds bei einem darauf treffenden Luftstrahl legte für diese Form der Konditionierung die Basis. Es wurde erkannt, dass bei genügend oft durchgeführter Koppelung des Luftstrahls mit einem kurz zuvor abgespielten Ton, zu einem späteren Zeitpunkt die reflexartige Schliessung des Augenlieds auch nur durch den abgespielten Ton hervorgerufen wurde. Wiederum wurde also gelernt, auf einen neuen Reiz mit einem verfügbaren Reflex zu antworten. Revolutionär an der Studie von Levey and Martin (1968) war jedoch, dass sie nicht das Phänomen selbst, sondern die damit verbundenen Prozesse in den Vordergrund stellten: „Most of the current work on human conditioning is concerned with the conditioned eyelid response, yet relatively little attention has been paid to its nature“ (Levey & Martin, 1968, S. 398). Es wurde somit schon früh erkannt, dass Konditionierung wie die „eyeblick classical conditioning“ auch beim Menschen zu wichtigen Erkenntnissen bezüglich der an Lernprozessen beteiligten Strukturen führen kann. Dies führte wiederum dazu, dass sich die klassische Konditionierung im Verlauf der Zeit zu einer der fundamentalsten Methoden des assoziativen Lernens entwickelt hat und als eine der wichtigsten Methoden der Erforschung der neuronalen Basis des Lernens gilt (Thompson & Krupa, 1994).

Besonderes Ansehen erlangten die Untersuchungen zur klassischen Konditionierung zu einem späteren Zeitpunkt mit dem Aufzeigen konkreter Lernprozesse und den dabei beteiligten Regionen im Gehirn. Schreurs et al. (1997) untersuchten in ihrer Studie die Korrelation zwischen dem veränderten Blutfluss regionaler Gehirnstrukturen und der Antwort der „eyeblick classical conditioning“ und zogen dadurch Rückschlüsse betreffend beteiligter Gehirnregionen. Dabei wurden bei zehn zufällig ausgewählten Versuchsteilnehmern Paarungen von einem Ton und einem auf das linke Auge treffenden Luftstrahl durchgeführt. Die Versuchsleiter erkannten dabei einen signifikanten Anstieg des Blutflusses im rechten auditiven Kortex (Kontralateral zum Luftstrahl) und eine signifikante Abnahme des Blutflusses sowohl im rechten, wie auch im linken zerebellaren Kortex. Nicht signifikante Veränderungen des Blutflusses wurden in verschiedensten weiteren Arealen beobachtet (rechter auditiver assoziativer Kortex, linker temporal okzipitaler Kortex, linker präfrontaler Kortex). Eine positive Korrelation zwischen Veränderungen des Blutflusses in spezifischen Gehirnregionen und der konditionierten Antwort wurde im Kleinhirn, dem rechten temporalen Kortex und dem linken prämotorischen Kortex beobachtet. Negative Korrelationen sind im linken präfrontalen Kortex und dem rechten parietalen Kortex aufgetreten. Schreurs et al. (1997) konnten also mehrere konkrete Gehirnnareale aufzeigen, welche bei Lernprozessen beteiligt sein könnten. Die Schlussfolgerung der beschriebenen Studie fiel somit wie folgt aus:

These data suggest that a form of learning as apparently simple as eyeblink conditioning appears to engage an extensive network of neural systems [...] and memory may involve the interactions among a number of neural systems and that any region has the potential to play a role depending on the requirements of the task (Schreurs et al., 1997, S. 2154).

Kluwe, Lüser, and Rösler (2003) fassten in ihrem Buch „Principles of Learning and Memory“ die wichtigsten Ergebnisse aus verschiedensten Studien zusammen, welche die an Lernprozessen beteiligten Gehirnregionen durch Experimente der klassischen Konditionierung erforscht haben. Nebst klassischen Experimenten wurden hier auch immer wieder Läsionsstudien erwähnt, die eine entscheidende Rolle im Lokalisieren der beim Lernen beteiligten Areale spielen können. So zeigte beispielsweise Yeo (1991), dass Versuchstiere mit einer Kleinhirnläsion nicht mehr in der Lage waren, eine konditionierte Antwort auf einen bedingten Stimulus zu erlernen. Diese Tatsache geht mit einer Anzahl Studien einher, welche während der klassischen Konditionierung eine starke neuronale Aktivität im Kleinhirn beobachtet haben und somit diesem Areal eine fundamentale Bedeutung für das assoziative Lernen beimessen. Kluwe et al. (2003) erwähnten des Weiteren den Hippocampus und die Basalganglien als elementare und an Lernprozessen beteiligte Strukturen. Diese Befunde sind

insofern spannend, da zu einem späteren Zeitpunkt die Studie von Adkins, Boychuk, Remple, and Kleim (2006) dieselben Gehirnnareale betreffend neuronaler Anpassung erwähnt haben. Nur handelte es sich bei genanntem Studiendesign nicht mehr um einfache Reflexe, sondern um komplexe motorische Bewegungen.

1.3 Motorisches Lernen

Das oben beschriebene Kapitel ist demzufolge bedeutsam, da einerseits die Historik der Erforschung des zentralen Nervensystems beleuchtet wurde und andererseits mit der Entdeckung des bedingten Reflexes der Ursprung der wissenschaftlichen Untersuchung des motorischen Lernens aufgezeigt wurde. Die Entdeckung des bedingten Reflexes von Pawlow (1849 – 1936) legte somit den Grundstein für das einfache Verständnis der Bewegung als Reflexkette oder das heute oft verwendete Paradigma von Reiz und Reaktion. Zudem scheinen die bei der klassischen Konditionierung beteiligten Gehirnnareale auch bei komplexeren Bewegungen des motorischen Lernens eine Rolle zu spielen. Diese komplexen Bewegungen werden im Folgenden genauer analysiert, was wiederum erlaubt, wichtige und aktuelle Rückschlüsse betreffend neuronale Prozesse zu ziehen.

Der Mensch besitzt ein fast unerschöpfliches Repertoire an komplexen motorischen Bewegungsfertigkeiten. Einige, wie das Gehen oder Velofahren, werden gänzlich unbewusst und bereits im Kindesalter erlernt. Andere, wie beispielsweise der Tennisservice, sind auf spezifische Trainingseinheiten zurückzuführen. Laut Wolpert, Diedrichsen, and Flanagan (2011, S. 739) sehen wir uns täglich mit dem Erwerb und Erhalt motorischer Fertigkeiten konfrontiert: „We exercise these abilities when taking up new activities — whether it is snowboarding or ballroom dancing — but also engage in substantial motor learning on a daily basis as we adapt to changes in our environment, manipulate new objects and refine existing skills.“ Die Forscher fassten in ihrem Text das Ergebnis aus einer Vielzahl von Studien zum motorischen Lernen zusammen und konzentrierten sich dabei auf die Voraussetzungen, die das motorische Lernen ermöglichen oder favorisieren. Auch wenn wir uns praktisch ständig und oft unbewusst in Phasen des motorischen Lernens aufhalten, sind heute verschiedene Mechanismen bekannt, die für den Prozess des Erwerbs oder Erhalts von Bewegungen von Bedeutung sind. Diese Mechanismen werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt. Aufgrund des dieser Arbeit gesetzten Rahmens und der enormen Prozessvielfalt, können die Mechanismen nicht in ihrer Vollständigkeit behandelt werden.

1.3.1 Mechanismen des motorischen Lernens

Wie zuvor bereits kurz erwähnt, können Bewegungen sowohl implizit (unbewusst), wie auch explizit (bewusst) erlernt werden. Die Art des Lernprozesses kann die Stabilität des Lernergebnisses stark beeinflussen. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass implizit erlernte Bewegungen stabiler gegenüber Störungen und Belastungen der Umwelt sind (R. S. Masters, Poolton, & Maxwell, 2008). Eine Studie, welche diese Annahme unterstützt, untersuchte zwei verschiedene Gruppen, die den Golfschlag jeweils implizit, respektive explizit erlernten. Die implizite Gruppe führte beim Einlochen der Golfbälle eine Zweitaufgabe aus, die das Bewusstsein um die ausgeführte Bewegung verblasen liess. Die explizite Gruppe hingegen übte den Golfschlag mittels Lehrbuch und konkreter Regeln (Masters, 1992). Obwohl die explizite Gruppe bei den ersten Einlochversuchen noch erfolgreicher war, zeigte die implizite Gruppe bei einem finalen Durchgang unter Stresseinfluss eine deutlich erfolgreichere Performance. Die Stabilität implizit konsolidierter Fertigkeiten gegenüber Umweltbelastungen wurde hier bestätigt. Laut Stark-Inbar, Raza, Taylor, and Ivry (2016) gehören gefestigte und stabile motorische Fertigkeiten in der Taxonomie stets zur impliziten oder prozedurale Seite. In der Theorie wird diese Tatsache damit begründet, dass mit fortschreitender Aneignung einer Fertigkeit die Fähigkeit des Verbalisierens des Lernprozesses entfällt und einer automatisierten und unbewussten Seite weicht.

Traditional theories postulate that motor skills are initially acquired explicitly via cognitive processing which is verbally based. As learning proceeds, the skill becomes automated or implicit. That is, the verbal rules used to perform the skill are “forgotten”, and task-relevant information processing becomes unconscious (Maxwell, Masters, Kerr, & Weedon, 2001, S. 1049).

Ein Begriff, welcher eng mit dem impliziten und expliziten Lernen einhergeht, ist derjenige des fehlerbedingten (errorful) und fehlerlosen (errorless) Lernens. Möglichst wenige Fehler während eines Lernprozesses minimieren die durch den Lernenden durchgeführten Korrekturhypothesen, was wiederum zu einem unbewusst stattfindenden Lernprozess führt. Somit findet sich der Begriff des „errorless learnings“ in der Wissenschaft oft als Synonym des impliziten Lernens wieder, wobei das „errorful learning“ auf das explizite Lernen bezogen wird (Maxwell et al., 2001).

Wolpert et al. (2011) sahen einen wichtigen Punkt im motorischen Lernen bei der Effizienz der Aneignung taskspezifischer Informationen. Es konnte aufgezeigt werden, dass das motorische System bereits am Lernprozess selbst beteiligt ist, indem es unwichtige Informationen herausfiltert und die Aufmerksamkeit auf das Wesentliche richtet. Most, Scholl, Clifford, and Simons (2005) bestätigten diese Erkenntnis in einer Studie. Dabei waren die Probanden nicht

in der Lage, unerwartet aufgetretene Störungen im Testdesign wahrzunehmen. Das motorische System einer Person bestimmt also je nach persönlichen Zielsetzungen den Rahmen der wahrgenommenen Informationen. Damit diese Fokussierung stattfinden kann, ist es jedoch wichtig, dass eine Aufgabe auf relevanten Informationen gründet. Das Resultat lässt vermuten, dass Informationen nur dann wahrgenommen werden, wenn sie für die Aufgabe relevant erscheinen.

Nebst der Auswahl taskspezifischer Informationen scheint laut Wolpert et al. (2011) auch die Entscheidungsgeschwindigkeit der Bewegungsauswahl ein wichtiger Mechanismus des motorischen Fertigkeitserwerbs zu sein. Ein beliebtes Untersuchungsziel dieses Phänomens stellen die Sakkadenbewegungen der Augen dar. Gold and Shadlen (2007) zeigten beispielsweise mittels auf einem in zwei Hälften geteilten Bildschirm auf, dass sich die Probanden, je nach Form und Bewegung der auf dem Bildschirm abgebildeten Punkte, enorm schnell und intuitiv für die visuelle Fixierung einer Bildschirmseite entschieden haben. Die Kapazität des neurologischen Systems, Entscheidungen sehr schnell und effizient zu treffen, lässt sogar Bewegungskorrekturen durch ein Feedback sensorischer Informationen noch während der Ausführungsphase zu. Diese Form von Bewegungskontrolle trifft laut der „closed-loop theory“ von Adams (1971) hauptsächlich auf „langsame“ motorische Bewegungen zu, welche für ihre Bewegungsausführung mehr als 200ms beanspruchen und somit genügend Zeit für die Nutzung sensorischer Informationen aufweisen. Bei schnellen Bewegungen unter 200ms geschieht die Bewegungsregulierung über die „feedforward Kontrolle“ und ohne Miteinbeziehung sensorischer Information für die Bewegungsausführung. Hierbei ist für die Qualität der Bewegung eine möglichst genaue Prognose der Bewegungsantwort vor der eigentlichen Bewegungsausführung elementar (Wolpert et al., 2011). Die Forscher messen der Prognose sensorischer Konsequenzen einer Bewegung im motorischen Lernprozess im Allgemeinen einen grossen Stellenwert zu. Durch diesen Mechanismus wird das Lernen unter ständigem Abgleich erwarteter und effektiver sensomotorischer Konsequenzen ermöglicht. Die Ressource der Informationen stammt dabei aus den Wahrnehmungssystemen (propriozeptiv, vestibulär, visuell, usw.). Nebst den eigenen Wahrnehmungssystemen scheinen jedoch auch Inputs von aussen einen positiven Effekt auf das motorische Lernen zu haben. Laut Wolpert et al. (2011) können von aussen stammende Informationen über das Ergebnis (Erfolg oder Misserfolg) den motorischen Lernprozess stark unterstützen. Das motorische System ist durch diese Informationen gezwungen, durch verschiedene Befehle die erfolgversprechendste Lösung auszuwählen. Laurent (2008) ist es sogar gelungen, eine positive Korrelation zwischen der

positiven Verstärkung und der Aktivität dopaminergen Neurone in den Basalganglien während des motorischen Lernens aufzuzeigen.

Zum Schluss soll auch noch kurz der Einfluss des visuellen Feedbacks auf das motorische Lernen behandelt werden. Batcho, Gagne, Bouyer, Roy, and Mercier (2016) untersuchten zwei verschiedene Gruppen, welche eine ballistische Greifübung über zwei Tage verteilt trainierten. Dabei erhielt die Gruppe 1 ein visuelles Feedback, die zweite Gruppe hingegen musste ohne visuelles Feedback trainieren. Die Forscher konnten durch ihre Studie aufzeigen, dass die Gruppe mit visuellem Feedback einen signifikant schnelleren Lernerfolg erzielte: „Even though both groups showed motor adaptation, the NoVFb-group exhibited slower learning and higher final endpoint error than the VFb-group“ (Batcho et al., 2016, S. 267). Es wird hier aber eindeutig die Meinung vertreten, dass Lernen auch ohne visuelles Feedback möglich ist. In der in dieser Arbeit beschriebenen Studie zur Cross-limb Interferenz, wird das visuelle Feedback während des Trainings angewendet, um einen möglichst grossen Trainingserfolg zu garantieren.

1.3.2 Kortikale Neuroplastizität beim motorischen Lernen

Das oben beschriebene Kapitel zeigt wichtige Mechanismen und Prozesse des motorischen Lernens auf, geht jedoch noch nicht spezifisch auf neuronale Veränderungen in konkreten Gehirnarealen ein. Auf diesen Aspekt der Neuroplastizität wird im nachfolgenden Teil das Augenmerk gelegt. Als Basis für die Annahme, dass motorisches Lernen zu strukturellen Veränderungen auf neuronaler Ebene führt, dient folgendes Zitat von Adkins et al. (2006, S. 1776): „Adult motor behavior is highly adaptive and can be modified in response to a variety of different motor experiences, including skill, strength, and endurance training.“ Diese von aussen beobachtbare Anpassungsfähigkeit muss auf innere neuroplastische Veränderungen zurückgeführt werden. Diese Meinung wird heute allgemein von der Wissenschaft vertreten: „Motor skill training and strength training are associated with different plastic changes in the central nervous system“ (Jensen, Marstrand, & Nielsen, 2005, S. 1558).

Da die Erforschung der Cross-limb Interferenz dieser Arbeit auf einer motorischen Explosivkraftaufgabe in Kombination mit einer Genauigkeitsaufgabe basiert, wird das Augenmerk auf strukturelle Veränderungen beim Kraft - und Fertigkeitstraining (skill training) gelegt.

Fertigkeitstraining

Adkins et al. (2006) beschrieben die neuronalen Anpassungen während des Fertigkeitserwerbs und betonten als wichtiges Areal den motorischen Kortex. Veränderungen treten laut den Forschern durch ein Zusammenspiel dreier Prozesse auf: Proteinsynthese, Synaptogenese und die Reorganisation motorischer Programme. Abbildung 1 zeigt die drei zellulären Mechanismen der Plastizität, welche innerhalb des motorischen Kortex von Ratten während einer Greifübung beobachtet werden konnten. Es können sehr schön drei verschiedene Phasen ausgemacht werden. Die Synthese verschiedener Proteine erfolgte bereits kurz nach dem Trainingsstart, gefolgt von einer signifikanten Vermehrung der Synapsen und der Reorganisation motorischer Programme nach einigen Tagen. Allgemein fällt auf, dass sich der Trainingseffekt bereits unmittelbar nach der Initiierung des Trainings einstellte. Kleim, Lussnig, Schwarz, Comery, and Greenough (1996) stellten schon früh die These auf, dass eine Vermehrung der Synapsen auf einer Proteinsynthese im motorischen Kortex gründen könnte. Das Experiment, welches die Forscher zu dieser Erkenntnis führte, hat zwei Gruppen von Ratten verglichen. Die eine Gruppe absolvierte einen komplizierten motorischen Parcours, während die Kontrollgruppe lediglich über ein flaches Plexiglas laufen musste. Abschliessend fiel auf, dass die Gruppe, welche den motorischen Parcours absolviert hatte, eine erhöhte Proteinsynthese im motorischen Kortex aufwies und sich zudem die Anzahl an Synapsen im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant vermehrt hatte. Diese These ist im Laufe der Zeit von mehreren Forschern bestätigt worden (vergleiche Jones, 1999; Kleim et al., 2002). Es kann also schlussgefolgert werden, dass der Fertigkeitserwerb, die Vermehrung der Synapsen und die Reorganisation der Bewegungsrepräsentation zu einem konstitutiven Anteil von der Proteinsynthese im motorischen Kortex abhängen:

The functional organization of adult cerebral cortex is characterized by the presence of highly ordered sensory and motor maps. Despite their archetypical organization, the maps maintain the capacity to rapidly reorganize, suggesting that the neural circuitry underlying cortical representations is inherently plastic. Here we show that the circuitry supporting motor maps is dependent upon continued protein synthesis (Kleim et al., 2003, S. 167).

Laut Jensen et al. (2005) spielt sich die Reorganisation motorischer Bewegungsrepräsentationen zu einem Grossteil im motorischen und primär-motorischen Kortex ab. Diese Gehirnareale bilden komplexe Netzwerke und sind für die Ansteuerung konkreter Gliedmassen oder die Initiierung eines spezifischen Bewegungsprogramms verantwortlich. Dabei fällt auf, dass die Topographie der jeweiligen Bewegungsrepräsentation im primärmotorischen Kortex je nach Stufe des Fertigkeitserwerbs eine unterschiedliche Grösse einnehmen kann. Pearce, Thickbroom, Byrnes, and Mastaglia (2000) präsentierten in

diesem Zusammenhang die Erkenntnis, dass die Repräsentation der Hand von professionellen Racketsportlern im erwähnten Areal einen viel grösseren Anteil einnimmt, als diejenige einer Kontrollgruppe von Nicht-Racketspielern. Zudem zeigten Elitespieler bei der Reizung des den Schlagarm repräsentierenden Areals im primärmotorischen Kortex ein signifikant höheres evoziertes Potential (MEP). Ähnliche Resultate wurden auch aus der Erforschung von Elitemusikern reproduziert (Watson, 2006).

Nebst den bisher genannten Gehirnnarealen wurden in verschiedenen weiteren Studien während des Fertigkeitserwerbs auch strukturelle und funktionale Anpassungen in den Basalganglien (Conner, Culberson, Packowski, Chiba, & Tuszynski, 2003), dem Kleinhirn (De Zeeuw & Yeo, 2005) und im Nucleus ruber (Hermer-Vazquez et al., 2004) beobachtet. Zudem wurde auch immer wieder erwähnt, dass die genannten Systeme nicht nur die Fähigkeit zur Plastizität aufweisen, sondern die Art und Form der strukturellen Veränderungen direkt aus der jeweiligen motorischen Erfahrung resultiert und somit stark taskspezifisch ist (Adkins et al., 2006). Es soll hier noch angemerkt werden, dass in diesem Kapitel die neuronale Plastizität in Verbindung mit den wichtigsten kortikalen Arealen erläutert wurde. Es ist durchaus davon auszugehen, dass sich Plastizität während des motorischen Lernens auch in den spinalen Arealen abspielt. Diese sind jedoch aus wissenschaftlicher Sicht noch weniger ausführlich beleuchtet worden (Adkins et al., 2006).

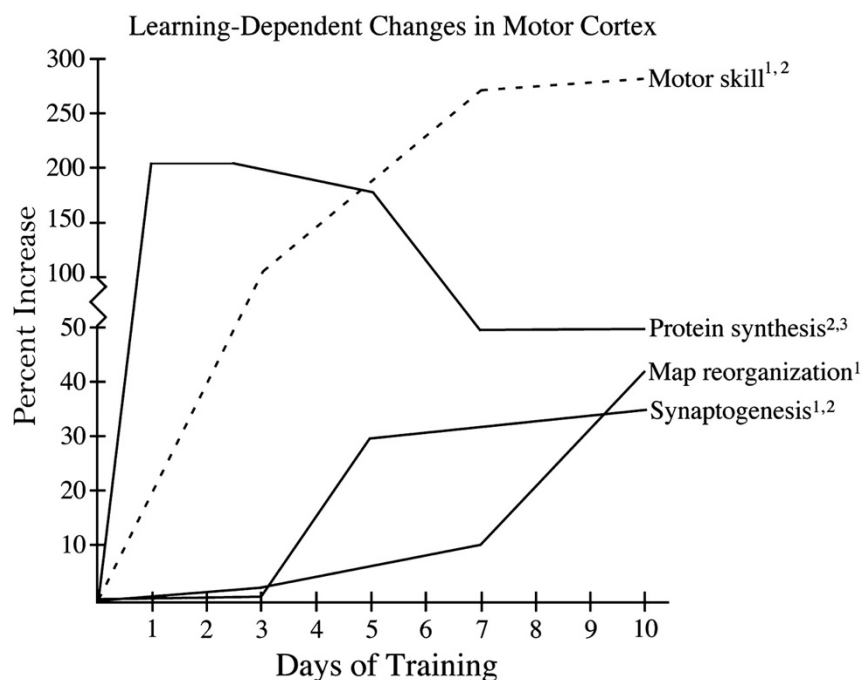


Abbildung 1: Zeitabhängige zelluläre Mechanismen der Plastizität, beobachtet im motorischen Kortex von Ratten während eines Greiftasks (aus Adkins et al., 2006, S. 1778).

Krafttraining

Jensen et al. (2005) verwiesen auf die Tatsache, dass bei einem Krafttraining die muskelspezifischen Anpassungen erst nach einer Trainingszeit ab vier Wochen erkennbar werden. Dies lässt die Vermutung aufkommen, dass zumindest die Trainingsfortschritte, die vor der gesagten Zeit auftreten, auf neuronale Anpassungen zurückgeführt werden müssen. Auch Adkins et al. (2006, S. 1777) vertreten diese Meinung:

Although strength training induces wellcharacterized intramuscular adaptations, growth of muscle fibers cannot account for all observed increases in strength. For example, significant strength gains occur before muscle hypertrophy [...].

Doch bevor solch konkrete Veränderungen angesprochen werden, muss zuerst die Legitimität geklärt werden, das Krafttraining als Teil des motorischen Lernens zu betrachten. Carroll, Riek, and Carson (2001) sehen den Zusammenhang darin, dass Athleten während des Krafttrainings lernen, die für eine Aufgabe benötigten Muskelgruppen optimal zu rekrutieren und anzusteuern. Das Ziel des Krafttrainings ist dabei stets, einen möglichst hohen Leistungsoutput zu erzielen. Somit scheint es nicht abwegig zu sein, dass während des Krafttrainings ähnliche neuronale Veränderungen wie beim Fertigkeitstraining beobachtet werden können.

Es wurde auch immer wieder angesprochen, wie schwierig es sein kann, Krafttraining und Fertigkeitstraining als zwei voneinander unabhängige Formen des motorischen Lernens anzuschauen (Jensen et al., 2005). Gerade weil während eines Krafttrainings auch neue Bewegungssequenzen erlernt oder zumindest verfeinert werden, was wiederum der Definition des Fertigkeitstrainings entspricht. Anders herum sind beim Fertigkeitserwerb auch stets Muskelgruppen involviert und die Qualität der Bewegung hängt oft von der nötigen Kraftentwicklung ab. Somit ist es schwierig zu unterscheiden, welche neuronalen Veränderungen lediglich für das erhöhte Kraftpotential verantwortlich sind und welche Veränderungen mit einer während des Krafttrainings erlernten Bewegung einhergehen (Adkins et al., 2006). Die Forscher sind sich jedoch einig, dass Krafttraining zu einer erhöhten Erregbarkeit der taskspezifischen Motoneuronen führt. Eine Studie, welche diese Behauptung untermauert, wurde von VandenBerg et al. (2001) durchgeführt. Dabei wurden Ratten in drei verschiedene Gruppen eingeteilt. Eine Kraftgreifgruppe, eine Greifgruppe und eine Kontrollgruppe. Das 30 - tägige Training der Kraftgreifgruppe bestand darin, ein sich stets vergrößerndes Bündel an Spaghetti hochzuheben, während die Greifgruppe lediglich ein einzelnes Spaghetti hochheben musste. Die Kontrollgruppe absolvierte keinerlei Training. Nach der Trainingsperiode wurden durch Mikrostimulation die Bewegungsrepräsentationen der taskspezifischen Bewegung im motorischen Kortex visualisiert. Zudem wurde mit Hilfe eines Elektronenmikroskops die Synapsendichte der taskspezifischen Motoneuronen aus einer

Gewebeprobe gemessen. Die Resultate zeigten, dass die Bewegungsrepräsentation der Greifbewegung im motorischen Kortex sowohl bei der Kraftgreifgruppe, wie auch bei der Greifgruppe expandiert ist. Nur die Kraftgreifgruppe wies aber zudem eine erhöhte Synapsendichte und somit eine effizientere Ansteuerung der spinalen Motoneurone auf. In der Diskussion ist die Reorganisation der Bewegungsrepräsentation im motorischen Kortex dem Fertigkeitstraining zugeschrieben worden, wobei die vergrößerte Synapsendichte durch das Krafttraining erklärt wurde. Es wird heute allgemein die Meinung vertreten, dass Krafttraining zu einer erhöhten Erregbarkeit der bewegungsspezifischen Motoneuronen führt, jedoch sonstige kortikalen Anpassungen der Bewegung selbst und somit dem Fertigkeitserwerb beigemessen werden sollen:

Skill training induces synaptogenesis, synaptic potentiation, and reorganization of movement representations within motor cortex. [...] Strength training alters spinal motoneuron excitability and induces synaptogenesis within spinal cord, but it does not alter motor map organization. (Adkins et al., 2006, S. 1776).

Im Übrigen wurde auch der in den nächsten Kapiteln ausführlich beschriebene Cross-limb Transfer bei der Erforschung der veränderten neuronalen Ansteuerung der Muskeln nach einem Krafttraining entdeckt. So erwähnte beispielsweise Enoka (1988), dass die erhöhte Erregbarkeit der Motoneurone eines einseitig trainierten Glieds auch auf der kontralateralen und nicht trainierten Seite beobachtet werden kann.

1.4 Cross-limb Interferenz: Die Verknüpfung zweier Phänomene

Der Begriff Cross-limb Interferenz setzt sich aus den beiden in der Bewegungswissenschaft beobachteten und erforschten Phänomenen Interferenz und Cross-limb Transfer (je nach Nomenklatur auch als kontralateraler Trainingseffekt oder Cross-education bezeichnet) zusammen. Um die Cross-limb Interferenz verstehen zu können, ist es wichtig, zuerst die Verhaltensdaten und zugrunde liegenden Mechanismen der isolierten Phänomene aufzuklären. Der Cross-limb Transfer und die Interferenz werden somit in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

1.4.1 Cross-limb Transfer

Die Tatsache, dass der Trainingseffekt eines einseitig trainierten Gliedes auch auf der kontralateralen und untrainierten Seite auftritt, ist seit längerer Zeit bekannt. Bereits im letzten Jahrhundert entdeckten Scripture, Smith, and Brown (1894), dass nach einem Krafttraining auch ein Kraftanstieg in der nicht aktiv trainierten Hand auszumachen war. Damals war jedoch noch keine Nomenklatur oder Erklärung für die Funktion dieses Phänomens bekannt.

The results show a steady increase in the muscular power of the right hand due to direct practice and also an increase in the power of the left hand due to what we might call „indirect practice“ (Scripture et al., 1894, S. 119).

Später konnte die Existenz des zuvor beschriebenen Phänomens in einer Vielzahl von Studien bestätigt werden. Zudem setzte sich auch eine konkrete Bezeichnung für die kontralaterale Leistungssteigerung während eines einseitig durchgeführten Trainings durch. Die Erscheinung wurde nun mehrheitlich als „Cross-education“ (Barss, Pearcey, & Zehr, 2016) oder „Cross-limb Transfer“ (Stockel, Carroll, Summers, & Hinder, 2016) bezeichnet. In dieser Arbeit wird das Phänomen fortwährend Cross-limb Transfer genannt.

Um die bestehenden Verhaltensdaten des Cross-limb Transfers besser nachvollziehen zu können, wird an dieser Stelle eine typische Beispielsstudie von Carroll, Lee, Hsu, and Sayde (2008) zusammengefasst. Die Forscher liessen in ihrer Studie neun Probanden eine Explosivkraftaufgabe ausführen. Dabei galt es während insgesamt 300 Versuchen, die maximale Beschleunigung der Zeigefingerabduktion mit dem rechten Zeigefinger zu verbessern. Vor dem Training und nach 150 Wiederholungen wurden zudem die Werte der linken Hand gemessen. Hier wurde ebenfalls die Erregbarkeit der kortikalen Areale mittels TMS ermittelt. Das gesamte Training war somit in zwei Testblöcke mit der linken Hand und 30 Trainingsblöcke mit der rechten Hand aufgeteilt, wobei ein Trainingsblock 10 Zeigefingerabduktionen entsprach. Nach jedem Trainingsblock bekamen die Probanden eine Ruhepause von 30 Sekunden zugesprochen. Eine Testgruppe bestehend aus neun Teilnehmern fungierte als Kontrollgruppe und führte nur die Testblöcke, nicht aber das Training durch. Die Resultate konnten aufzeigen, dass die Probanden ihre maximale Beschleunigung des trainierten Fingers nach 150 Wiederholungen um 114% und bis zum Ende des Trainings sogar um 140% verbesserten. Die maximale Beschleunigung des untrainierten linken Fingers verbesserte sich bis zur Halbzeit um 50 % und bis zum Ende des Trainings um signifikante 82%. Zudem konnte eine erhöhte neuronale Ansteuerung der linken untrainierten Hand beobachtet werden. Des Weiteren vergrößerte sich die kortikospinale Erregbarkeit sowohl von der trainierten, wie auch der untrainierten Hand. Die verbesserte Ansteuerung und zunehmende Erregbarkeit lassen

bereits auf die Funktionsweise des Cross-limb Transfers schliessen. Diese wird im nächsten Kapitel ausführlich behandelt.

Munn, Herbert, and Gandevia (2004) leisteten einen wichtigen Beitrag zur Aufdeckung der Verhaltensdaten des Cross-limb Transfers, indem sie in einer Metaanalyse zwischen 1949 und 2002 die Ergebnisse veröffentlichter Studien auswerteten. Die Forscher konzentrierten sich in ihrer Analyse ausschliesslich auf Studien, welche den Cross-limb Transfer in Bezug auf ein Krafttraining analysierten, das mit mindestens 50% der willkürlich möglichen Maximalkraft durchgeführt wurde. Grund für die Analyse einer grossen Anzahl an Studien war hauptsächlich die Kritik, dass übliche Studien mit einer Probandenanzahl von durchschnittlich 10 Versuchsteilnehmern keine valide statistische Auswertung zulassen. Somit wurden schlussendlich 13 Studien, welche die nötigen Kriterien erfüllt hatten und insgesamt 309 Probanden miteinschliessen, für die Analyse der Resultate berücksichtigt. Die Auswertung zeigte einen durchschnittlichen Kraftanstieg des nicht trainierten Glieds von 7.8%, was wiederum 35% des Trainingseffekts des trainierten Glieds entsprach. Der in dieser Metaanalyse determinierte Kraftanstieg von rund 8% konnte ein Jahr später in einer breit angesiedelten Studie von Munn, Herbert, Hancock, and Gandevia (2005) bestätigt werden. Die Forscher untersuchten insgesamt 115 Probanden auf den kontralateralen Kraftanstieg nach einem sechswöchigen und einseitig durchgeführten Krafttraining mit dem Ellbogenflexor. Somit liegen diese Werte weit unterhalb der als Beispielsstudie erwähnte Forschungsarbeit von Carroll et al. (2008). Dies liegt jedoch daran, dass in besagter Studie das Timing als leistungsbestimmender Parameter und nicht der effektive Kraftanstieg selbst untersucht wurde. Zudem unterschieden sich die beiden Trainings in ihrer Trainingsdauer. Die Studie von Carroll et al. (2008) bezog sich auf eine kurzzeitige Trainingsdauer, welche primär neuronale Anpassungen ermöglichte. Die lange Trainingsdauer der Studie von Munn et al. (2005) legt nahe, dass nebst neuronalen Anpassungen auch muskelspezifische Anpassungen aufgetreten sind. Lediglich den neuronalen Anpassungen ist es jedoch möglich, in die kontralaterale und untrainierte Seite zu transferieren (Evetovich et al., 2001). Die eher ungewohnte Zeigefingerabduktion der Studie von Carroll et al. (2008) birgt zudem rein aufgrund der speziellen Bewegungsausführung ein grösseres Anpassungspotential, als dies die eher gewöhnliche Bewegung der Studie von Munn et al. (2005) zugelassen hat.

Die unterschiedlichen Resultate bestätigen die Vermutung, dass das Ausmass des Cross-limb Transfers je nach analysiertem Task unterschiedlich ausfallen kann. Diese Erkenntnis wird auch von Lee, Gandevia, and Carroll (2009, S. 802) vertreten: „It is well known that the contralateral, untrained limb can benefit from unilateral strength training. This so-called „contralateral

strength training effect” or „cross education” is task specific and occurs in the opposite, homologous muscles.“

Nebst der Taskspezifität ist auch das Lernumfeld und allem voran das Vorhandensein eines visuellen Feedbacks entscheidend für das Ausmass des Cross-limb Transfers (Lee et al., 2010). Die Taskspezifität und das Trainingsumfeld scheinen in der Kraftzunahme des untrainierten Gliedes eine wichtige Rolle zu spielen. Das Ausmass des Cross-limb Transfers hängt also von vielen Faktoren ab, womit eine Verallgemeinerung der Kraftanstiege generell in Frage gestellt werden sollte. So wurde beispielsweise aufgezeigt, dass Aufgaben, welche für ihre Ausführung eine hohe Kraftproduktion und eine starke neuronale Aktivität aufweisen, zu einem besonders grossen Kraftanstieg des nicht trainierten Gliedes führten (Lauber et al., 2013). Zudem ist heute auch bekannt, dass der Cross-limb Transfer direkt von der im Training erzielten Leistungssteigerung abhängt. Die auf ein untrainiertes Glied transferierte absolute Leistungszunahme ist somit umso grösser, je stärker sich ein Proband zuvor durch ein Training verbessert hat.

Lee and Carroll (2007) fassten in ihrer Arbeit die wichtigsten Erkenntnisse aus bisherigen Studien über den Cross-limb Transfer zusammen, was eine gute Übersicht betreffend den aktuellen Wissensstand des Phänomens ergibt. Dabei tritt der Cross-limb Transfer sowohl in den oberen und unteren Extremitäten und sowohl in grossen, wie auch in kleinen Muskelgruppen auf. Die Transferleistung scheint dabei weder geschlechtsabhängig, noch altersabhängig zu sein. Es gibt jedoch auch Forscher, welche gegenteilige Resultate in ihrer Studie erzielt haben. Hinder, Schmidt, Garry, Carroll, and Summers (2011) erkannten beispielsweise während einer ballistischen Zeigefingerabduktionsaufgabe, dass lediglich die junge Probandengruppe einen signifikanten ($p = 0.005$) Leistungsanstieg im untrainierten Glied aufwies. Die ältere Probandengruppe zeigte trotz erhöhter kortikospinaler Erregbarkeit in der trainierten, wie auch in der untrainierten Seite, keinen Cross-limb Transfer. Zudem vertritt Farthing, Chilibeck, and Binsted (2005) die Meinung, dass die Transferleistung primär von der dominanten Seite in die nicht dominante Seite, nicht aber umgekehrt erfolgt. Diese Resultate werden im nachfolgenden Kapitel noch genauer diskutiert. Lee and Carroll (2007) zeigten des Weiteren, dass Cross-limb Transfer sowohl durch willentlichen Effort, elektrische Stimulation oder mentale Praktiken verursacht werden konnte. Dabei ist unabhängig von der Trainingsform keine Muskelaktivität und somit auch keine Hypertrophie im untrainierten Muskel zu erwarten. Zum Abschluss muss noch erwähnt werden, dass der Cross-limb Transfer nicht nur im Krafttraining, sondern durchaus auch im Fertigkeitstraining beobachtet werden kann. Ein Beispiel dafür zeigt die Untersuchung von Perez et al. (2007). Die Forscher liessen die

Probanden einen spezifischen Präzisionstask mit den Fingern der rechten Hand trainieren und erkannten nach dem Training eine signifikante Leistungszunahme bei der Durchführung des Tasks mit den Fingern der linken Hand. Ein weiteres beliebtes Beispiel sind sogenannte „mirror tracing Aufgaben“, bei welchen Probanden einer Figur durch einen Spiegel betrachtet möglichst genau folgen müssen. Die Bedingungen sind dabei durch die Spiegelverkehrtheit erschwert. Cook (1933) konnte so mit Hilfe einer sternförmigen mirror tracing Aufgabe schon früh den Cross-limb Transfer im Fertigkeitstraining aufzeigen.

1.4.2 Mechanismen des Cross-limb Transfers

Obwohl immer wieder fleissig über den Cross-limb Transfer berichtet wurde, ist dessen Funktionsweise und die zugrunde liegenden Mechanismen noch nicht restlos aufgedeckt (Lee et al., 2010). Wie im Kapitel über die kortikale Neuroplastizität bereits erwähnt wurde, stellt sich erst nach einer mindestens vierwöchigen Trainingsdauer Hypertrophie im betroffenen Muskel ein. Es ist also anzunehmen, dass durch den Cross-limb Transfer erzielte Leistungssteigerungen zumindest zu einem Grossteil auf neuronaler Ebene erklärt werden müssen. Die Tatsache, dass ein Trainingseffekt auch auf der untrainierten Seite auftritt, ist zudem an sich ein Beweis für neuronale und nicht muskelspezifische Anpassungen, welche zu einer Leistungssteigerung führen (Lee & Carroll, 2007). Es konnte durch Elektromyographie in einer Studie aufgezeigt werden, dass unilaterales Training tatsächlich zu keinerlei Muskelaktivität im kontralateralen Muskel (Quadriceps Femoris) führte (Evetovich et al., 2001). Es scheint somit unwahrscheinlich zu sein, dass die untrainierte Seite ausreichende Trainingsreize für eine physiologische muskelspezifische Anpassung erhält.

Im Laufe der Zeit haben sich zwei Hypothesen herauskristallisiert, welche die dem Cross-limb Transfer zugrunde liegenden Mechanismen zu einem gewissen Teil zu erläutern vermögen (Lee et al., 2010). Gemäss der Abbildung 2 werden die Hypothesen im Folgenden genauer erläutert. Die erste Hypothese (bilateral access hypothesis) vermutet das Vorhandensein eines motorischen Programms an einem Ort im zentralen Nervensystem, auf welches sowohl die trainierte, wie auch die untrainierte Hemisphäre zugreifen kann. Die zweite Hypothese (cross-activation hypothesis) basiert auf den Beobachtungen, dass ein einseitig durchgeführtes Training eines Gliedes sowohl auf der kontralateralen, wie auch auf der ipsilateralen Seite kortikale Aktivität mit sich bringt. Es wird also angenommen, dass es trotz einseitigem Training zu Anpassungen in beiden Hemisphären und somit zu taskspezifischen Änderungen im neuronalen Kreislauf kommt. Lee et al. (2010) zeigten mittels eines ballistischen

Schnellkrafttasks des Zeigfingers, dass beim einseitigen Training nicht nur die kortikospinale Aktivität der trainierten, sondern auch der untrainierten Seite stark zugenommen hat.

Practice of a ballistic finger abduction task with the right hand produced a rapid improvement in performance that generalized to the untrained, left hand. The behavioural improvement was accompanied by a bilateral increase in corticospinal excitability. Thus, practice of ballistic contractions with one hand increases cortical excitability ipsilateral to the moving hand. The data add to evidence that the ipsilateral motor cortex is involved during unilateral motor learning (Lee et al., 2010, S. 207).

Zudem führte die Anwendung von transkranieller Magnetstimulation (TMS) des motorischen Kortex ipsilateral zur trainierten Seite zu einem verringerten Cross-limb Transfer. Es kann somit angenommen werden, dass dieses Gehirnareal am Leistungstransfer beteiligt ist. Die Ergebnisse unterstützen schlussfolgernd die Vermutung, dass es durch einseitiges Training auch zu neuronalen Anpassungen in der nicht trainierten Hemisphäre kommt, wodurch der „cross-activation hypothesis“ eine grosse Bedeutung beigemessen werden kann. Die erhöhte kortikale Erregbarkeit der nicht trainierten Seite konnte zudem bereits zwei Jahre zuvor von Carroll et al. (2008) während eines ballistischen Trainings beobachtet werden. Lee et al. (2010) vertreten die Ansicht, dass gerade ballistische und nahe an der Maximalkraft ausgeführte Tasks in der „cross-activation hypothesis“ einen wichtigen Mechanismus für die Transferleistung finden. Solche Tasks setzen eine starke neuronale Ansteuerung des für die Aufgabe benötigten Glieds voraus.

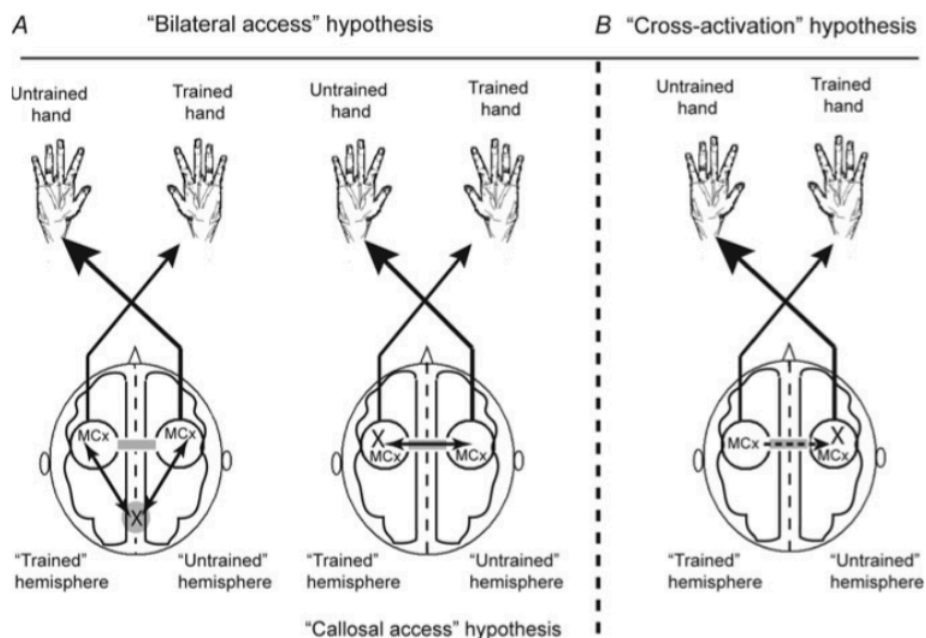


Abbildung 2: Schematische Darstellung der beiden Hauptkategorien der Hypothesen der Mechanismen des Cross-limb Transfers. Das X repräsentiert dabei den Ort, wo die Anpassungen für die Verbesserungen im untrainierten Glied anzusiedeln sind. Der Graue Balken stellt das corpus callosum dar, welches einen wichtigen Anteil an der Transferleistung zwischen den beiden Hemisphären zu haben scheint. (Lee, Hinder, Gandevia, & Carroll, 2010, S. 202)

Die Abbildung 2 zeigt nochmals die verschiedenen Hypothesen der Mechanismen des Cross-limb Transfers. Am meisten Ähnlichkeit zur „Cross-activation hypothesis“ weist dabei die „Callosal access hypothesis“ auf. Hierbei wird angenommen, dass die primären Anpassungen eines Trainings unabhängig von der trainierten Seite stets in der dominanten Hemisphäre auftreten. Die Anpassungen können dann je nach Bedarf durch die Querverbindung (corpus callosum) zwischen den Gehirnhälften transferieren und für die Leistungssteigerung auf der trainierten oder nicht trainierten Seite sorgen (Taylor & Heilman, 1980). Laut dieser Theorie wären die Anpassungen der dominanten Seite stets grösser, ungeachtet dessen, ob mit dieser oder der nicht-dominanten Seite trainiert wird. Farthing et al. (2005) bewiesen in ihrer Studie jedoch genau das Gegenteil, indem sie 39 Rechtshänderinnen ein sechswöchiges Ulnarabduktionstraining durchführen liessen. Dabei trainierte eine Gruppe mit der dominanten rechten Hand, eine Gruppe mit der nicht dominanten linken Hand und eine Gruppe fungierte als Kontrollgruppe und trainiert gar nicht. Die Resultate zeigten, dass lediglich ein signifikanter Transfer des Trainings in die nicht-dominante Seite erfolgte und die Gruppe, welche mit der linken Hand trainiert hatte, keinerlei Cross-limb Transfer aufwies. Die Tatsache, dass der Cross-limb Transfer grösser ausfällt, wenn mit der dominanten Seite trainiert wird, bestätigten auch andere Studien (Criscimagna-Hemminger, Donchin, Gazzaniga, & Shadmehr, 2003; Wang & Sainburg, 2004). Lee and Carroll (2007) zeigten in ihrer Arbeit betreffend mögliche Mechanismen des Cross-limb Transfers auf, dass durchaus beide Transferrichtungen, also von der dominanten in die nicht dominante und auch umgekehrt, auftreten können. Ist die Transferleistung unabhängig vom Training mit der dominanten oder nicht dominanten Seite gleich gross, so wird von einem symmetrischen Transfer gesprochen. Dabei kann dieser Transfer vollständig - mit gleich grossem Leistungsanstieg wie auf der trainierten Seite - oder unvollständig erfolgen.

Lee and Carroll (2007) vertreten die Meinung, dass grundsätzlich alle beim motorischen Lernen beteiligten kortikalen Areale (vergleiche Kapitel Neuroplastizität beim motorischen Lernen) am Cross-limb Transfer beteiligt sein können. Durch den bilateralen Transfer ist es jedoch wahrscheinlich, dass Gehirnareale mit stark ausgeprägter bilateraler Projektion besonders stark am Phänomen beteiligt sind: „Brain regions with strong bilateral cortical projections such as M1 and supplementary motor areas (SMAs) are likely candidates for this type of neural adaptation“ (Lee & Carroll, 2007, S. 10). So führten in einer Studie beispielsweise einfache Kontraktionsbewegungen zu kurzzeitigen neuronalen Veränderungen im primär motorischen Kortex (Muellbacher, Ziemann, Boroojerdi, Cohen, & Hallett, 2001).

Zum Abschluss soll an dieser Stelle noch angemerkt werden, dass sich die in diesem Kapitel erwähnten Hypothesen nicht gegenseitig ausschliessen müssen, sondern durchaus verschiedene Mechanismen am Cross-limb Transfer beteiligt sein können. Es soll jedoch auch bewusst gemacht werden, dass auf Experimenten basierende Hypothesen und Erkenntnisse zumindest ein Stück weit stets spekulativ sind (Lee & Carroll, 2007).

1.4.3 Interferenz im motorischen Lernen

Der Begriff Interferenz wird auch im Alltag verwendet und ist stark in der Physik verankert. Hierbei beschreibt Interferenz, einfach ausgedrückt, das Phänomen, dass sich zwei Wellen zum Zeitpunkt des Zusammentreffens gegenseitig überlagern und somit stören. Ähnliche Beobachtungen konnten auch in der Bewegungswissenschaft aufgezeigt werden. Laut Meinel and Schnabel (2007) wird im Bewegungslernen von Interferenz gesprochen, wenn sich verschiedene Lernprozesse gegenseitig stören oder sogar löschen und sich somit an der Gedächtniskonsolidierung hindern. Es kann dabei zwischen retroaktiver und proaktiver Interferenz unterschieden werden. Die erste Form beschreibt die Überlagerung von etwas bereits Gelerntem mit einem neuen Lernvorgang, während bei der proaktiven Interferenz neu Gelerntes durch bereits stattgefundene Lernvorgänge gestört wird. Solche Formen der Interferenz konnten in etlichen Lernparadigmen beobachtet werden, so beispielsweise auch in kognitiven Lernprozessen. Bereits vor mehr als hundert Jahren erkannten Müller and Pilzecker (1900) Effekte kognitiver Interferenz, indem sie Probanden Silbenlisten erlernen liessen. Da sich die vorliegende Forschungsarbeit primär auf das motorische Lernen konzentriert, wird auch das Phänomen der Interferenz unter diesem Beobachtungsfeld bearbeitet. Laut Lewis and Miles (1956) scheint im motorischen Lernen primär die retroaktive Interferenzbedeutsam zu sein. Dieser Befund wird auch durch das Zitat bestätigt: „Humans are capable of learning numerous motor skills, but newly acquired skills may be abolished by subsequent learning“ untermauert (Lundbye-Jensen et al., 2011, S. 1).

Die Studie von Lundbye-Jensen et al. (2011) fungiert in diesem Kapitel als Beispielsstudie für das Aufzeigen der Interferenz anhand von Verhaltensdaten. Das Hauptziel der Studie war herauszufinden, unter welchen Umständen die Durchführung einer Zweitaufgabe kurz nach der Absolvierung einer primären Aufgabe Interferenz verursachen kann. Die Forscher liessen für ihre Studie insgesamt 12 Gruppen mit durchschnittlich 8 Probanden pro Gruppe ein ballistisches Krafttraining (FT) mit dem Plantarflexor ausführen. Danach wurde analysiert, ob und in welcher Form eine dem Training folgende Zweitaufgabe (beispielsweise Genauigkeitstraining AT) negative Einflüsse auf den Trainingserfolg des Krafttrainings

ausübte. Die Abbildung 3 gibt eine genaue Übersicht über das Studiendesign und den Inhalt der Zweitaufgaben.

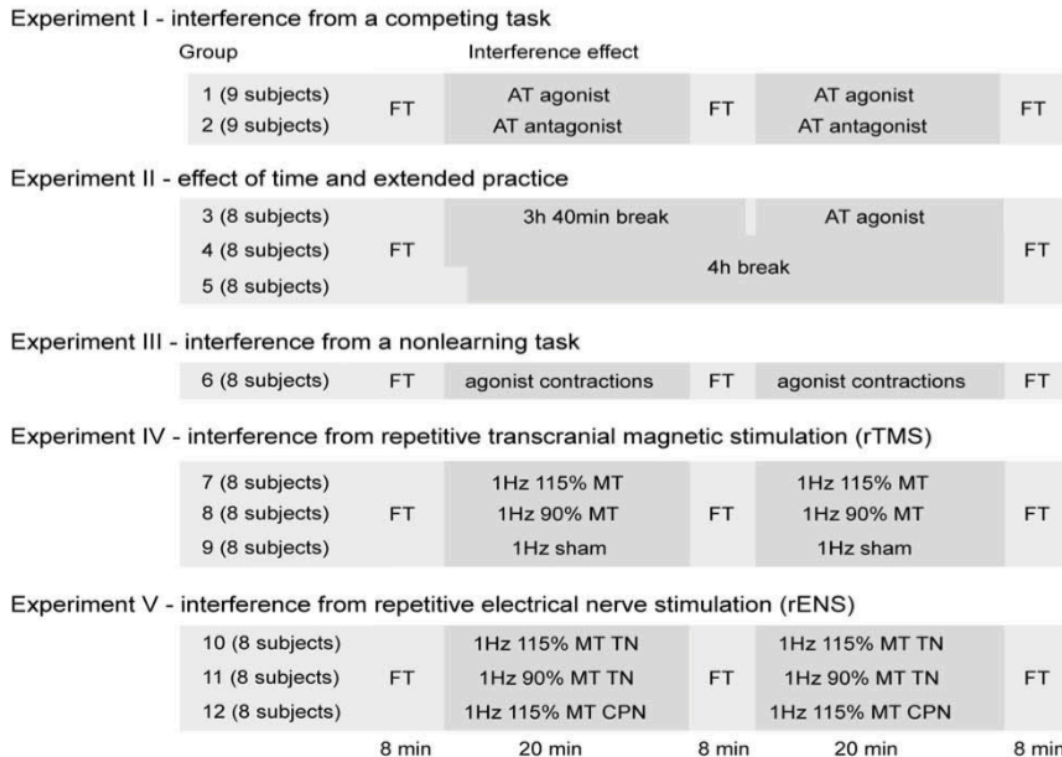


Abbildung 3: Methodische Übersicht des Studiendesigns von Lundbye-Jensen, Petersen, Rothwell, and Nielsen (2011, S. 3)

Die Erkenntnisse, welche aus den Resultaten der Studie von Lundbye-Jensen et al. (2011) gezogen werden konnten, fassen die elementarsten Verhaltensdaten der Interferenz im motorischen Lernen zusammen und sollen an dieser Stelle präsentiert werden. So tritt laut den Forschern Interferenz im motorischen Lernen auf, wenn:

- Aufgabe 2 mit demselben Muskel und in dieselbe Bewegungsrichtung wie Aufgabe 1 ausgeführt wird;
- Aufgabe 2 kurz nach Aufgabe 1 ausgeführt wird;
- Aufgabe 2 eine „learning“ Aufgabe darstellt. Eine Aufgabe also, in welcher bewusst und mit dem eigenen Können ein Fortschritt erzielt werden kann;
- Nach der Aufgabe 1 der primär motorische Kortex des repräsentativen Feldes des soeben beanspruchten Glieds mittels TMS gestört wird;
- Die peripheren Bahnen des in Aufgabe 1 benötigten Muskels gereizt werden.

Die Studie von Lundbye-Jensen et al. (2011) war die erste Studie, welche Interferenz durch die Reizung eines spezifischen kortikalen Areals verursachen konnte. Die Bedeutung der Zeit, welche zwischen zwei ausgeübten ähnlichen Aufgaben liegt, schien bereits vor der beschriebenen Studie eine bekannte Grösse zu sein. So beobachteten bereits Brashers-Krug, Shadmehr, and Bizzi (1996), dass nach einer vierstündigen Pause zwischen zwei konkurrierenden Aufgaben keine Interferenz mehr aufgetreten ist.

Im Gegensatz zum Cross-limb Transfer scheint die Interferenz im motorischen Lernen zu einem gewissen Mass altersabhängig zu sein. Dorfberger, Adi-Japha, and Karni (2007) liessen drei verschiedene Altersgruppen (9 Jahre, 12 Jahre, 17 Jahre) eine Fingersequenzaufgabe trainieren. Nach einer Pause von 24 Stunden zeigten alle drei Gruppen einen sehr ähnlichen Trainingserfolg. Dem Retentionstest wurde ein Training einer ähnlichen, zweiten Fingersequenzaufgabe angehängt und nach einer erneuten Pause von 24 Stunden wurde der Einfluss des zweiten Trainings auf die ursprüngliche Aufgabe gemessen. Hier zeigte die Gruppe mit dem Durchschnittsalter von 17 Jahren deutlich mehr Interferenz als die beiden jüngeren Gruppen. Auch Roig, Ritterband-Rosenbaum, Lundbye-Jensen, and Nielsen (2014) konnten mittels eines ballistischen Trainings, gefolgt von einer Genauigkeitsaufgabe, die grösste Anfälligkeit gegenüber Interferenz in der ältesten Probandengruppe feststellen. Es muss somit generell davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Alter auch ein erhöhtes Potential möglicher Interferenz vorliegen könnte.

Eine letzte spannende Erkenntnis im Zusammenhang mit dem Auftreten von Interferenz im motorischen Lernen soll zum Abschluss dieses Kapitels präsentiert werden. Debarnot, Maley, Rossi, and Guillot (2010) untersuchten, ob Interferenz auch im Mentaltraining auftreten kann. Dafür liessen die Forscher zwei Gruppen einen Fingertask trainieren. Eine Gruppe führte die Aufgabe effektiv motorisch aus, während die zweite Gruppe das Training lediglich mental durchführte. Den interferierenden zweiten Fingertask führten beide Gruppen motorisch aus. Interessanterweise zeigte in der Testphase die Gruppe, welche die erste Aufgabe mental trainiert hatte, keine Interferenz. Die Resultate lassen darauf schliessen, dass Mentaltraining zur Vermeidung von Interferenz angewandt werden könnte. Die Testergebnisse eröffnen jedoch auch die Frage, ob Mentaltraining eine ausreichend starke kortikale Aktivität verursachen kann, die wiederum zu einem effizienten Trainingserfolg führt.

1.4.4 Mechanismen der Interferenz im motorischen Lernen

Müller and Pilzecker (1900) beschrieben bereits um 1900 das Auftreten von Interferenz während des Lernens von Silbenlisten. Bedeutsam an dieser Studie war jedoch vor allem die Tatsache, dass auch zum ersten Mal das Wort der Gedächtniskonsolidierung im Zusammenhang mit der Interferenz fiel. Bereits bei der Entdeckung der Interferenz schien somit einer der determinierenden Mechanismen im Zusammenhang mit dem Auftreten der Interferenz gefunden worden zu sein. Gedächtniskonsolidierung kann dabei als Prozess angesehen werden, in welchem das Gedächtnis als Funktion der Zeit stabil gegenüber Ablenkungen der Aussenwelt wird: „Consolidation is defined as the process, by which motor memories become increasingly stable with continued passage of time, and one mechanism of interference is disruption of consolidation“ (Lundbye-Jensen et al., 2011, S. 1). Die Forscher gehen davon aus, dass die Effizienz der Synapsen im neuronalen Kreislauf sehr kurzfristig gesteigert werden kann. Für eine Stabilisierung scheint jedoch die Proteinsynthese notwendig zu sein, welche erst nach einigen Stunden einsetzt. Laut Brashers-Krug et al. (1996) ist die Stabilisierung eines Gedächtnisprogrammes möglich, indem neuronale Prozesse auch nach der Beendigung eines Trainings und somit ohne motorische oder kognitive Anstrengung weiterlaufen. Wie Lundbye-Jensen et al. (2011) in ihrem Zitat erwähnten, scheint die Störung der Konsolidierungsphase ein Hauptgrund zu sein, weshalb Interferenz auftritt. Das motorische Gedächtnis scheint unmittelbar nach dem Training noch sehr instabil zu sein und verfestigt sich erst nach einer gewissen Zeit. So ist es auch nicht erstaunlich, dass die Ausführung einer neuen Aufgabe unmittelbar nach einem Training die Konsolidierung des motorischen Gedächtnisses stört und infolgedessen Interferenz in Bezug auf das primär ausgeführte Training auftreten kann (Shadmehr & Brashers-Krug, 1997).

Dass die Zeit, welche zwischen der Ausführung zweier ähnlichen Aufgaben liegt, eine determinierende Grösse für das Auf- bzw. Nichtauftreten von Interferenz darzustellen scheint, kann aus verschiedenen Studien entnommen werden, welche den Einfluss des Schlafes auf die Konsolidierung eines erzielten Lernerfolges untersuchten. Feld, Weis, and Born (2016) liessen beispielsweise zwei Gruppen eine Liste von 160 Wortpaarungen erlernen. Nach der Lernphase durfte die eine Gruppe eine Nacht lang schlafen, während die Kontrollgruppe wachgehalten wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass die Gruppe, welche nach dem Lernen eine Nacht lang schlafen konnte, die Wortpaarungen signifikant besser reproduzieren konnte. Morita, Ogawa, and Uchida (2016) bestätigten dieses Erkenntnis in ihrer Studie. Dafür liessen sie zwei Gruppen das Jonglieren üben. Nach dem Üben durfte eine Gruppe 70 Minuten lang schlafen, während die zweite Gruppe dieselbe Zeit lang wach gehalten wurde. Bereits die kurze Schlafpause führte

zu einer signifikant besseren Performance im Retentionstest. Der positive Effekt des Schlafes auf die Gedächtniskonsolidierung beim motorischen Lernen ist mittlerweile in der Wissenschaft derart stark verankert, dass in einigen Studien bereits von der „schlafabhängigen“ Konsolidierung gesprochen wird (Diogo et al., 2016). Die Beispielsstudie von Lundbye-Jensen et al. (2011) und die Studie von Brashers-Krug et al. (1996) zeigten ihrerseits, dass nach einer Ruhepause von vier Stunden zwischen zwei Aufgaben das motorische Gedächtnis genügend stark stabilisiert wurde, sodass nach der Durchführung einer interferierenden Aufgabe keine Interferenz mehr hervorgerufen wurde.

Für die Konsolidierung eines motorischen Gedächtnisinhaltes scheint der primär-motorische Kortex von Bedeutung zu sein (Lundbye-Jensen et al., 2011). Die Autoren dieser Studie haben gezeigt, dass ein fünfzehnminütiges rTMS-Protokoll mit überschwelliger Reizintensität über dem kontralateralen Kortex zur trainierten Hand ebenfalls Interferenz auslöst. Allerdings scheint auch die Stimulation peripherer Nerven in der Konsolidierungsphase zu einem Interferenzeffekt zu führen, weshalb die neuronale Grundlage von Interferenz noch nicht abschliessend geklärt ist. Es muss an dieser Stelle noch angesprochen werden, dass im Vergleich zum Cross-limb Transfer nur wenig über die Funktionsweise der Interferenz bekannt ist und nebst der Störung der Gedächtniskonsolidierung weitere, im Moment noch unbekannte Mechanismen von Bedeutung sein könnten (Lundbye-Jensen et al., 2011).

1.4.5 Cross-limb Interferenz

Lauber et al. (2013) waren die Ersten, welche den Cross-limb Transfer mit der Interferenz in Verbindung brachten und somit den Begriff „Cross-limb Interferenz“ hervorriefen. Ziel ihrer Untersuchung war es, herauszufinden, ob Interferenz nach einem Genauigkeitstask auch im untrainierten Glied auftritt: „The aim of the present study therefore was to test if cross-limb interference effects can be observed in the limb contralateral to the limb that initially practiced a ballistic force task followed by a visuomotor accuracy task“ (Lauber et al., 2013, S. 1). Für die Studie wurden insgesamt 55 Probanden auf fünf Gruppen verteilt. Die Aufgabe A bildete ein ballistischer Kontraktionstask mit dem Zeigefinger, während in der Aufgabe B ein Genauigkeitstask mit demselben Finger ausgeübt wurde. Der Unterschied in den verschiedenen Gruppen lag hauptsächlich in der Trainingsdauer der Aufgabe B, welche zwischen 6 und 12 Minuten variierte. Bei einer Gruppe wurde zusätzlich mittels TMS die kortikale Aktivität ipsilateral zur trainierten Seite gemessen. Das Genaue Studiendesign kann aus der Abbildung 4 entnommen werden.

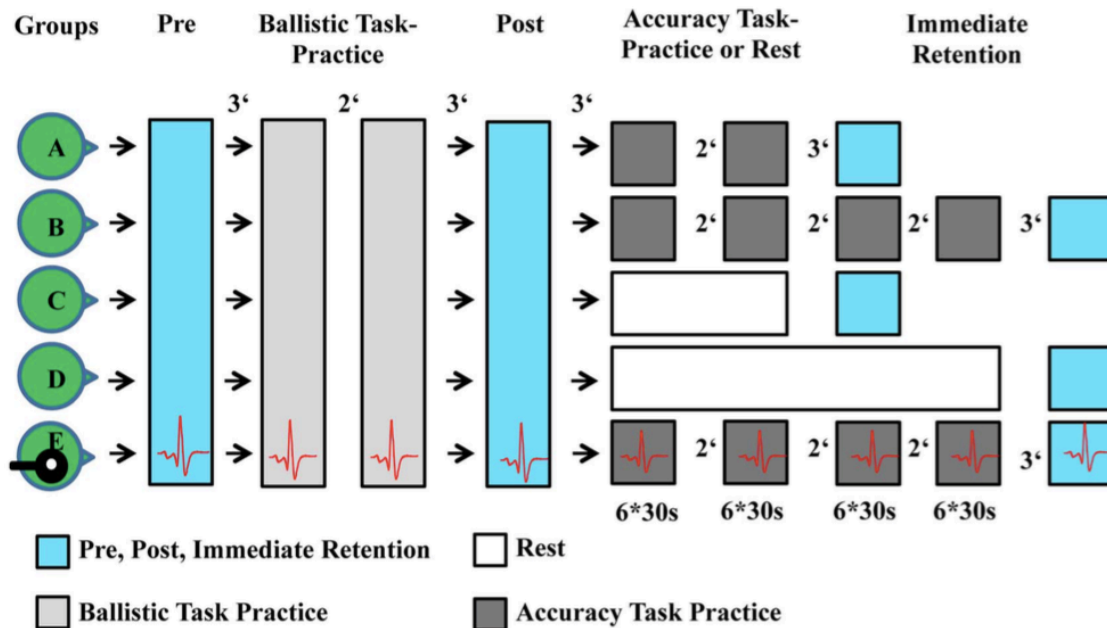


Abbildung 4: Methodische Übersicht des Studiendesigns von Lauber et al. (2013, S. 2)

Tatsächlich konnte bei den Probanden nach einem interferierenden Genauigkeitstask B nicht nur Interferenz im zuvor trainierten, sondern auch im untrainierten Glied ausgemacht werden. Im untrainierten Glied zeigten jedoch nur die Gruppen, welche den Genauigkeitstask 12 Minuten lang trainiert hatten, eine signifikante Leistungsabnahme im Retentionstest. Diese Resultate führen zur Erkenntnis, dass die Cross-limb Interferenz vom Ausmass des Lernerfolges abhängen könnte, welcher in der interferierenden Aufgabe erzielt wird: „Interestingly, the cross-limb interference effect depends on the level of skill acquisition in the newly acquired (interfering) task“ (Lauber et al., 2013, S. 7).

Zudem konnten die Forscher während der Trainingsphase einmal mehr eine erhöhte kortikospinale Erregbarkeit in der nicht trainierten Hemisphäre beobachten. Diese Tatsache bedeutet wiederum einen verstärkenden Beweis für die „Cross-activation Hypothese“.

In the present study, the TMS results obtained during the training of the BT task are in line with this cross-activation hypothesis as they demonstrate an increase in corticospinal excitability in the neural circuits being involved in the control of the opposite untrained limb (Lauber et al., 2013, S. 6).

1.5 Ziele und konkrete Fragestellung

Die Arbeit soll an der Studie von Lauber et al. 2013 anknüpfen und gewonnene Erkenntnisse bestätigen, weiterentwickeln oder verwerfen. Es ist grundsätzlich die erste Studie, welche untersucht, ob das Ausführen einer interferierenden Aufgabe mit dem untrainierten Glied Interferenz im zuvor trainierten Glied verursacht.

Ein grundlegendes Ziel war es, ein funktionierendes Studiendesign zu entwickeln, welches valide Resultate hervorbringt. Diese sollen dazu dienen, ein junges und wenig beschriebenes Phänomen tiefgreifender zu verstehen.

Es besteht zudem die Vermutung, dass neue Erkenntnisse aus der Kombination verschiedener Phänomene per se Chancen für die genauere Erklärung der Funktionsweise der isolierten Phänomene oder zumindest für weitere Bestätigungen oder Verwerfungen von Hypothesen hervorbringen. Folgendes Beispiel soll diese Vermutung bestärken. Lundbye-Jensen et al. (2011, S. 10) kamen durch ihre Studie über die Interferenz im motorischen Lernen zu folgendem Schluss: „For interference to occur a second task must involve activation of, and learning in, the same neural circuits.“ Kann diese Arbeit Interferenz im trainierten Glied nach dem Ausführen eines zweiten Tasks mit dem untrainierten Glied beweisen, so muss die Annahme verfolgt werden, dass während des Ausführens dieser Aufgabe mit dem untrainierten Glied neuronale Aktivität in denselben kortikalen Arealen des zuvor trainierten Glieds stattfindet. Dies würde die „Cross-activation Hypothese stark unterstützen.

Die Studie wird wiederum die Erste sein, welche das Ausmass der Interferenz und der Cross-limb Interferenz einander direkt gegenüberstellen und somit vergleichen kann. Zudem verfolgt die Studie das Ziel, einmal mehr den Cross-limb Transfer im motorischen Lernen aufzuzeigen. Durch eine verhältnismässig grosse Probandenzahl (48) kann der Kritik von Munn et al. (2004) entgegengewirkt werden. Die Forscher kritisierten in ihrer Forschungsarbeit die statistische Aussagekraft von Studien über den Cross-limb Transfer, welche mit durchschnittlich 10 Versuchsteilnehmern eine geringe Probandenzahl aufwiesen.

Ein weiteres Ziel der Studie liegt in der Betrachtung der ballistischen Explosivkraftaufgabe. Hierfür soll untersucht werden, ob sich die Probanden primär im Timing oder effektiv in der entwickelten Explosivkraft verbessern.

Aus all den genannten Punkten gehen folgende Hypothesen hervor, welche im Verlauf dieser Arbeit untersucht werden sollen:

- (1) Sowohl die ballistische Explosivkraftaufgabe, wie auch die Genauigkeitsaufgabe sind Lernaufgaben und rufen eine Leistungsverbesserung hervor.
- (2) Die Probanden verbessern sich dabei sowohl im Timing, wie auch in der effektiven

Explosivkraft.

- (3) Die Probanden zeigen nach dem ballistischen Explosivkrafttraining auch eine Leistungssteigerung im nicht trainierten Glied (Cross-limb Transfer).
- (4) Sowohl die Durchführung der interferierenden Aufgabe mit dem trainierten, als auch mit dem untrainierten Glied führen zu Interferenz, bzw. Cross-limb Interferenz im Retentionstest.
- (5) Das Ausmass der Interferenz ist kleiner, wenn die interferierende Aufgabe mit dem untrainierten Glied ausgeführt wird.
- (6) Keine Interferenz wird verursacht, wenn die ballistische Explosivkraftaufgabe mit dem Agonisten und die Genauigkeitsaufgabe mit dem Antagonisten ausgeführt wird.

Die konkrete Fragestellung lautet folgendermassen:

Kommt es zu Cross-limb Interferenz, wenn zwischen zwei Sequenzen eines ballistischen Explosivkrafttrainings mit dem Handgelenkflexor eine Genauigkeitsaufgabe mit dem nicht trainierten Handgelenkflexor durchgeführt wird? Und hat die Interferenz primär Einfluss auf die Explosivkraft oder auch auf das Timing?

Dabei interessieren auch die Erkenntnisse, welche aus einem Auftreten oder auch „Nicht - Auftreten“ des Phänomens gezogen werden können.

2 Methoden

2.1 Anmerkung

Die Testreihe wurde zusammen mit Vincent Aebischer entwickelt, welcher seine Arbeit über die Interferenz im ballistischen motorischen Lernen verfasste. Der Vorteil der gemeinsamen Testdurchführung lag darin, dass wir uns gegenseitig bei der Rekrutierung von Probanden und der Testdurchführung unterstützen konnten. Für die Arbeit erfolgte jedoch eine individuelle Aufarbeitung und Interpretation der Daten. Zudem wurde das Augenmerk auf unterschiedliche Phänomene gelegt.

2.2 Probanden

Insgesamt 48 gesunde Probanden (18 weiblich, 30 männlich) haben an dieser Studie teilgenommen. Eine Einteilung in vier verschiedene Gruppen (D_Agon, D_Antag, ND_Agon, ND_Antag) mit jeweils 12 Teilnehmern pro Gruppe erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Das Alter der Versuchsteilnehmer lag zwischen 20 und 55 Jahren. Von den 48 Probanden waren 46 Rechtshänder und zwei Linkshänder.

Da das Training aus einer ballistischen Explosivkraftaufgabe, ausgeführt mit den Handgelenkflexoren resultierte, galt folgendes Ausschlusskriterium: Nur gesunde Probanden ohne bekannte Beschwerden oder Verletzungen in den beiden Handgelenken und Unterarmen waren zur Teilnahme an dieser Studie berechtigt. Vor dem Beginn der Messungen wurden die Probanden über den Ablauf und das Ziel der Studie informiert.

2.3 Untersuchungsdesign

Die Studie wurde entwickelt, um das Phänomen des Cross-limb Transfers und der Cross-limb Interferenz im motorischen Lernen zu untersuchen. Gemäss der Abbildung 5 wird nachfolgend das Untersuchungsdesign erklärt. Alle Probanden führten ein ballistisches Explosivkrafttraining mit dem Handgelenkflexor durch, nach welchem ein Genauigkeitstraining folgte. Danach wurde in einem zweiten Explosivkrafttraining erneut die Explosivkraft des Handgelenkflexors gemessen. Unmittelbar vor dem Training und unmittelbar nach dem Training wurde zudem das Kraftniveau in jeweils fünf Versuchen in der nicht trainierten Hand gemessen (Pretest, Posttest, Retentionstest). Da der maximale Kraftanstieg in einem sehr kurzen Intervall von 200ms gemessen wurde, soll bewusst von einer Explosivkraftaufgabe und nicht von einer Maximalkraftaufgabe gesprochen werden. Das

Explosivkrafttraining erfolgte stets mit der dominanten Hand, um einen maximalen Effekt des Cross-limb Transfers zu gewährleisten. Farthing et al. (2005) konnte in seiner Studie aufzeigen, dass die Transferleistung primär von der dominanten in die nicht dominante Hand erfolgte. Dieses Ergebnis wurde für das entsprechende Untersuchungsdesign berücksichtigt.

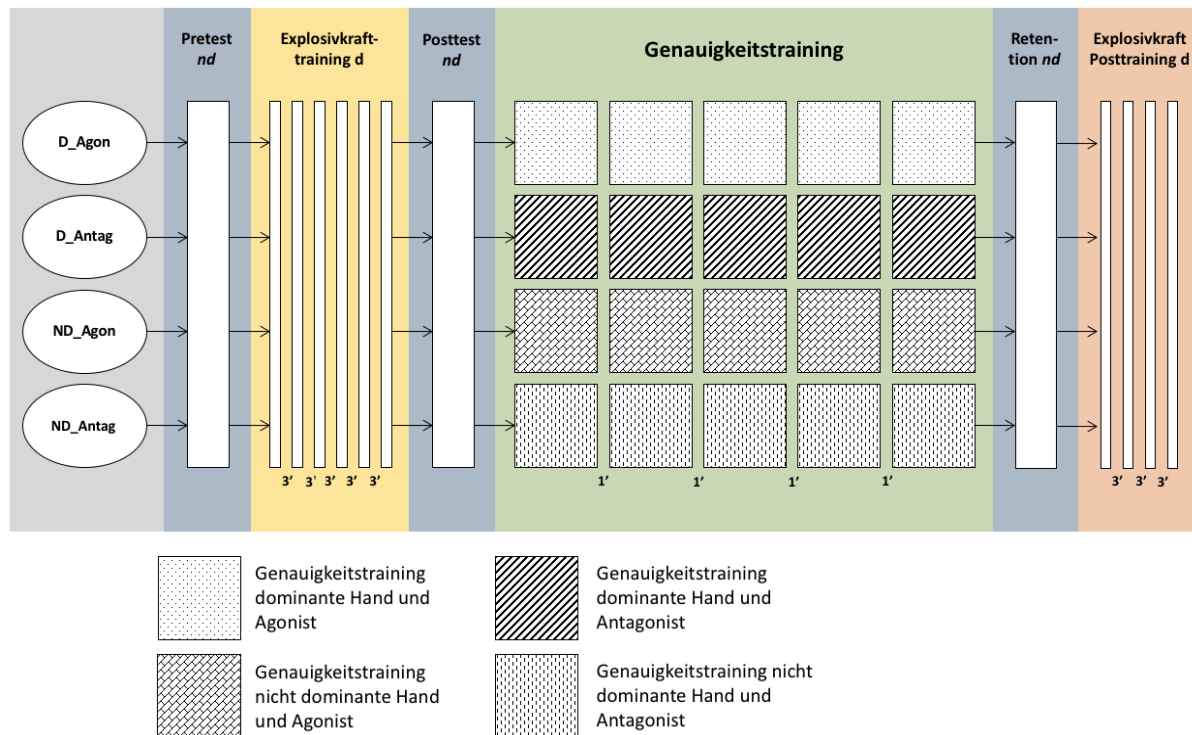


Abbildung 5: Studiendesign. Die Abkürzungen d und nd beziehen sich auf die Durchführung mit der dominanten, respektive mit der nicht dominanten Hand. Die Gruppennamen sind aus der spezifischen Durchführung des Genauigkeitstrainings entstanden.

Die Abbildung 5 gibt einen generellen Überblick über das Studiendesign und den individuellen Durchlauf der vier Gruppen. Die Probanden wurden zu Beginn der Messung auf einen Stuhl gesetzt, der individuell an die entsprechende Körpergröße angepasst werden konnte. Das Messgerät befand sich unmittelbar vor den Versuchsteilnehmern, fest fixiert auf einem Tisch. Das Kernelement bestand aus einem Metallstab, welcher direkt mit einer Kraftmessplatte verbunden war. Die Probanden legten den Unterarm auf das Messgerät und griffen nach dem Metallstab. Zwei Holzbolzen vermochten das Handgelenk zu fixieren und in korrekter Position zu halten. Die Fixierung verhinderte zudem eine unerwünschte Krafteinwirkung auf den Metallstab, die nicht aus dem Handgelenk, sondern aus dem gesamten Armbereich erfolgen könnte. Die korrekte Bewegung wurde den Probanden erklärt und demonstriert. Danach durften die Probanden fünf Testversuche mit der dominanten Hand ausführen, um sich an die Bewegung zu gewöhnen. Dann erfolgte die eigentliche Messung.

Ein Ton signalisierte den baldigen Start der Messung. Nach drei Sekunden ertönte ein weiterer Ton mit einer höheren Tonfrequenz, worauf nach 200ms der maximale Kraftanstieg während

weiteren 200ms ermittelt wurde. Die 200ms nach dem zweiten Ton bis zum effektiven Messbeginn waren für die Probanden wichtig. Einerseits mussten sie den Messbeginn nicht antizipieren, andererseits erlaubte das Finden des perfekten Timings einen grösseren Lerneffekt. In fünf Versuchen mit der nicht dominanten Hand wurde das Ausgangsniveau für die Analyse des Cross-limb Transfers ermittelt. Danach erfolgte das Explosivkrafttraining mit der dominanten Hand, bestehend aus sechs Serien (Pre1 - Pre6) mit jeweils fünf Wiederholungen. Um einen Ermüdungseffekt zu vermeiden, mussten die Probanden nach jeder Serie für drei Minuten ruhen. Zum Abschluss des Explosivkrafttrainings wurden erneut fünf Explosivkraftmessungen mit der nicht dominanten Hand durchgeführt.

Das Genauigkeitstraining erfolgte mit demselben Messgerät und derselben Armposition, wie das Explosivkrafttraining. Die Genauigkeitsaufgabe war namensgebend für die vier Gruppen. Die Gruppe 1 bestritt die Genauigkeitsaufgabe mit der dominanten Hand und dem Agonisten und wurde somit als Gruppe D_Agon bezeichnet. Die Gruppe D_Antag führte die Genauigkeitsaufgabe mit der dominanten Hand und dem Antagonisten aus. Die Gruppe ND_Agon und ND_Antag bezeichneten die Gegengruppen, welche die Genauigkeitsaufgabe mit der nicht dominanten Hand und dem Agonisten, respektive Antagonisten ausführten. Das Explosivkrafttraining und Posttraining wurde stets mit der dominanten Hand und dem Agonisten ausgeführt (siehe Abbildung 5).

Ziel des Genauigkeitstrainings war es, mittels Krafteinwirkung auf den Metallstab einen roten Punkt in seiner Position zu manipulieren und diesen möglichst genau einer, auf dem Computer abgebildeten Kurvenlinie, folgen zu lassen. Die Kurvenamplitude entsprach einer Maximalkraftspanne der Probanden, welche zwischen 2% (tiefster Punkt der Kurve) und 12% (höchster Punkt der Kurve) lag. Das Genauigkeitstraining bestand aus fünf Serien (1 - 5) mit fünf Wiederholungen und 60 Sekunden interserieller Pausen zwischen den Serien.

Nach dem Genauigkeitstraining wurde der Task A in identischer Art und Weise wiederholt. Einziger Unterschied lag in einer verkürzten Dauer des Explosivkrafttrainings, neu bestehend aus vier Serien (Post1 - Post4) mit fünf Wiederholungen.

Der positive Einfluss des visuellen und verbalen Feedbacks auf die Leistungsverbesserung der Probanden wurde in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich erläutert. Aus diesen Gründen erhielten die Versuchsteilnehmer während der gesamten Versuchsdurchführung sowohl visuelles, wie auch verbales Feedback.

2.4 Datensammlung und Datenaufarbeitung

Das Explosivkrafttraining und Genauigkeitstraining wurden mit Hilfe von *Matlab* und *Python* entwickelt. Die Software erlaubte eine direkte Übertragung der Daten auf den Bildschirm und somit ein direktes visuelles Feedback für die Probanden. Die ermittelten Daten konnten einfach in eine Excelmappe übertragen und weiter aufgearbeitet werden. Im Explosivkrafttraining wurden die Kraftwerte von der Kraftmessplatte in Newton umgewandelt, welche für eine Weiterverarbeitung nicht zusätzlich transformiert werden mussten. Für die Genauigkeitsaufgabe wurde das quadratische Mittel der vertikalen Differenz zwischen der Zielkurve und der effektiv durch die Probanden gefahrene Kurve ermittelt und von *Matlab* in Fehlerprozentwerte umgewandelt. Diese konnten wiederum in eine Excelmappe überführt und weiterverwendet werden. Die Software *Matlab* erlaubte zudem die Visualisierung der Kraftkurven des Explosivkrafttrainings. Aus diesen konnten für eine zusätzliche Analyse die reinen Explosivkraftwerte und reinen Timingwerte der Probanden ermittelt werden. Folgende Messwerte wurden aus den Kraftkurven errechnet und in eine Excelmappe übertragen:

- Startwert (SV): Kraftwert in Newton zum effektiven Messbeginn 200 ms nach dem Startton.
- Endwert (EV): Kraftwert in Newton zum effektiven Messende 200 ms nach dem Messbeginn.
- Resultat (R): Differenz zwischen SV und EV. Dieser Wert wurde für die Analyse der Explosivkraft verwendet.
- Reiner Timingwert (OT): Differenz zwischen dem Startton und dem Beginn der Krafteinwirkung in Millisekunden. Dieser Wert wurde für die Analyse der Anpassungen an das Timing verwendet
- Reine Explosivkraft (V200): Kraftwert in Newton 200 ms nach dem Beginn der Krafteinwirkung auf den Messstab. Dieser Wert wurde für die Analyse der reinen Explosivkraft verwendet.

Die weitere Aufarbeitung, Ordnung und Visualisierung der gesammelten Daten erfolgte fortlaufend durch *Excel*.

2.5 Statistik

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der verschiedenen Werte (Explosivkraft, Fehlerprozent, reine Explosivkraft und Timing) wurden für jede einzelne Serie des Trainings und Posttrainings ermittelt und deskriptiv dargestellt.

Um den Verlauf der verschiedenen Gruppen während des Explosivkrafttrainings und des Genauigkeitstrainings zu evaluieren, wurden ANOVAs mit Messwiederholung durchgeführt. Die abhängige Variable war im Falle der Explosivkrafttrainings die Kraft in Newton und für das Genauigkeitstraining die Fehlerprozentwerte. Die Innersubjektfaktoren bildeten die verschiedenen Serien (Pre1 - Pre6 und Post1 - Post4 im Falle der Analyse des gesamten Explosivkrafttrainings und Posttrainings) und die Zwischensubjektfaktoren die vier Gruppen (D_Agon vs. D_Antag vs. ND_Agon vs. ND_Antag). Für die Analyse der Trainings- und Interferenzeffekte wurden die Tests der Innersubjekteffekte (Serie und Serie * Gruppe) verwendet. Um signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Serien innerhalb der Gruppen festzustellen, wurden zusätzlich t-Tests für verbundene Stichproben gerechnet. Für die Untersuchung der Interferenz und Cross-limb Interferenz wurde die letzte Serie des Trainings mit der ersten Serie des Posttrainings verglichen. ANOVAs mit Messwiederholung Gruppe (D_Agon vs. D_Antag) * Serie (Pre6 vs. Post1) und Gruppe (ND_Agon vs. ND_Antag) * Serie (Pre6 vs. Post1) verglichen die Interferenzgruppen mit den „Kontrollgruppen“. Die t-Tests für verbundene Stichproben errechneten, ob die Leistungseinbußen signifikanten Werten entsprachen. Um das Ausmass der Interferenz mit der Cross-limb Interferenz zu vergleichen, wurde die Bilanz (Leistungsanstieg Pre1 vs. Pre6 - Leistungsabnahme Pre6 vs. Post1) der Probanden der Interferenz- und Cross-limb Interferenzgruppe gebildet und die Ergebnisse der beiden Gruppen in einem t-Test für unabhängige Variablen gegenübergestellt.

Die Tests der Innersubjekteffekte wurden allesamt mit dem Statistikprogramm *SPSS* durchgeführt. Die t-Tests wurden direkt in Excel gerechnet und mit der Anzahl der verglichenen Serien Bonferroni-korrigiert. Um die Anzahl der Korrekturen zu reduzieren, wurden primär die erste und letzte Serie der Trainings verglichen. Bei der Analyse der Interferenzgruppen stets die letzte Serie des Trainings mit der ersten Serie des Posttrainings. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf $\alpha = 0.05$ festgelegt. Für die Verbalisierung des Signifikanzeffekts wurde folgende Regel angewandt: $\alpha < 0.05$ = signifikanter Unterschied; $\alpha < 0.01$ = hoch signifikanter Unterschied; $\alpha < 0.001$ = höchst signifikanter Unterschied. Folgende Regel wurde für die visuelle Darstellung des Leistungsunterschieds in den Abbildungen gewählt: * für signifikant; ** für hoch signifikant; *** für höchst signifikant.

Um der Verfälschung der statistischen Analyse durch Ausreisser entgegenzuwirken, wurden jeweils nur die drei besten Versuche einer Trainingsserie berücksichtigt, welche eigentlich aus fünf Versuchen bestand.

3 Resultate

Für die Resultate werden die Mittelwerte jeder Serie der verschiedenen Tests (Pretest nd, Posttest nd, Retentionstest nd, Explosivkrafttraining d, Explosivkraftposttraining d und Genauigkeitstraining) der vier Gruppen analysiert und grafisch dargestellt. Es ist wichtig zu verstehen, dass lediglich das Genauigkeitstraining teilweise mit der nicht dominanten Hand und dem Antagonisten ausgeführt wurde. Zudem wurden die Tests zur Analyse des Cross-limb Transfers mit der nicht trainierten und somit nicht dominanten Hand ausgeführt. Das Explosivkrafttraining und Explosivkraftposttraining führten alle Gruppen identisch, mit der dominanten Hand und dem Agonisten aus.

Aufgrund der Vielzahl der Resultate und der verschiedenen Phänomene, finden sich teilweise auch im vorliegenden Kapitel kleine erklärende Abschnitte aus der Einleitung und dem Methodikteil wieder. Dies soll das Verständnis des Lesers fördern.

3.1 Cross-limb Transfer

Die Abbildung 6 zeigt den Cross-limb Transfer aller Probanden ($N = 47$). Eine fehlerhafte Messung konnte nicht für die statistische Analyse verwendet werden. Aus der Graphik sind die drei Versuche zu entnehmen, welche jeweils vor und direkt nach dem Explosivkrafttraining gemessen wurden. Die Versuchsreihe wurde für die statistische Analyse in zwei Serien, dem Pretest (unmittelbar vor dem Explosivkrafttraining gemessen) und dem Posttest (unmittelbar nach dem Explosivkrafttraining gemessen), zusammengefasst. Ein T-Test für verbundene Stichproben ergibt einen höchst signifikanten ($p < 0.001$) Leistungsanstieg zwischen dem Pre- und dem Posttest. Die Explosivkraft steigt von $195.1 \text{ N} \pm 9.4 \text{ N}$ um $21.4 \text{ N} \pm 3.5 \text{ N}$ auf $216.5 \text{ N} \pm 9.1 \text{ N}$, was wiederum einem prozentuellen Leistungsanstieg von 11.0 % gegenüber dem Pretest entspricht. Der Leistungsanstieg beträgt 76.5 % des im Training erzielten Explosivkraftanstiegs.

Zwischen dem Pretest und dem Posttest lag ein aus sechs Serien bestehendes Explosivkrafttraining, welches mit der dominanten Hand ausgeführt wurde.

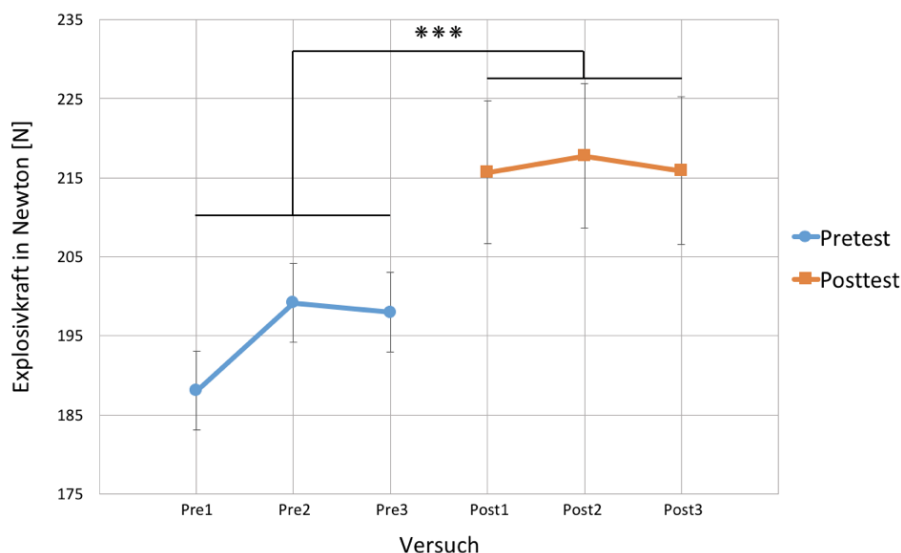


Abbildung 6: Cross-limb Transfer aller Probanden, gemittelt auf die drei Versuche des Pretests und die drei Versuche des Posttests. Für die statistische Analyse wurden die drei Versuche gemittelt und in einem gepaarten T-Test gegenübergestellt. Drei Sterne stehen für einen höchst signifikanten Leistungsanstieg zwischen dem Pretest und dem Posttest. Aus Gründen der Visualisierung werden die Daten der Versuche Pre 1 bis Pre 3 und Post 1 bis Post 3 jeweils einzeln dargestellt, auch wenn diese Daten für die statistische Analyse gemittelt wurden.

3.2 Explosivkrafttraining und Genauigkeitstraining

Hierbei wird untersucht, ob es sich bei den beiden Aufgaben um Lernaufgaben handelt, ob also aktiv und bewusst ein Lernerfolg erzielt wird und sich die verschiedenen Gruppen während des Trainings ähnlich entwickeln. Die Abbildung 7 zeigt den Trainingsverlauf der Explosivkraftaufgabe und die Abbildung 9 den Verlauf des Genauigkeitstrainings. Die Werte wurden normiert, sodass alle vier Gruppen vom selben Ausgangsniveau aus starten. Dies wurde dadurch erreicht, dass die Daten der ersten Serie als 100 % definiert wurden und alle nachfolgenden Serien daran normiert wurden. Folglich repräsentieren alle Werte grösser 1 eine prozentuale Zunahme und alle Daten kleiner 1 eine prozentuale Abnahme (zum Beispiel: 0.95 entspricht einer 5-prozentigen Abnahme). Es können somit nicht die absoluten Kraftwerte, sondern indirekt die prozentuellen Kraftzunahmen im Explosivkrafttraining oder die Fehlerprozentabnahmen im Genauigkeitstraining aus den Graphiken entnommen werden.

3.2.1 Explosivkrafttraining

Eine ANOVA mit Messwiederholung zeigt für das Explosivkrafttraining einen höchst signifikanten ($p < 0.001$) Serieneffekt. Alle Gruppen zeigen während des Explosivkrafttrainings einen ähnlichen Verlauf (Serie * Gruppe: $p = 0.64$) der Leistungszunahme. Die Gruppen verbessern sich in den Kraftwerten von der Serie 1 zur Serie 6 im Mittel um $28.0 \text{ N} \pm 4.4 \text{ N}$,

was einem prozentuellen Kraftanstieg von $17.0 \% \pm 2.9 \%$ und einer höchst signifikante ($p < 0.001$) Leistungsverbesserung entspricht.

Die Trainingsverbesserung der einzelnen Gruppen wird zusätzlich in der Abbildung 8 festgehalten. Die Gruppe D_Agon verbessert sich von der Serie der 1 zur Serie 6 hoch signifikant ($p < 0.01$) von ursprünglich $195.1 \text{ N} \pm 9.4 \text{ N}$ auf $228.5 \text{ N} \pm 9.8 \text{ N}$. Die Gruppe D_Antag verbessert sich im Mittel von $175.4 \text{ N} \pm 15.9 \text{ N}$ auf $196.9 \text{ N} \pm 16.6 \text{ N}$, was einem signifikanten ($p = 0.02$) Leistungsanstieg entspricht. Bei der Gruppe ND_Agon fällt die Leistungszunahme zwischen der Serie 1 und der Serie 6 hoch signifikant ($p < 0.01$) aus. Die Probanden vermögen sich im Mittel von $209.3 \text{ N} \pm 25.2 \text{ N}$ (Serie 1) auf $233.1 \text{ N} \pm 22.7 \text{ N}$ (Serie 6) und somit um durchschnittlich $22.0 \text{ N} \pm 8.0 \text{ N}$ zu verbessern. Zum Schluss zeigt auch die Gruppe ND_Antag einen signifikanten ($p = 0.04$) Leistungszuwachs während des Explosivkrafttrainings. Die Probanden vermögen ihrerseits einen Leistungsanstieg von $254.4 \text{ N} \pm 19.8 \text{ N}$ auf $287.5 \text{ N} \pm 16.4 \text{ N}$ zwischen der ersten und der letzten Serie des Explosivkrafttrainings zu verbuchen.

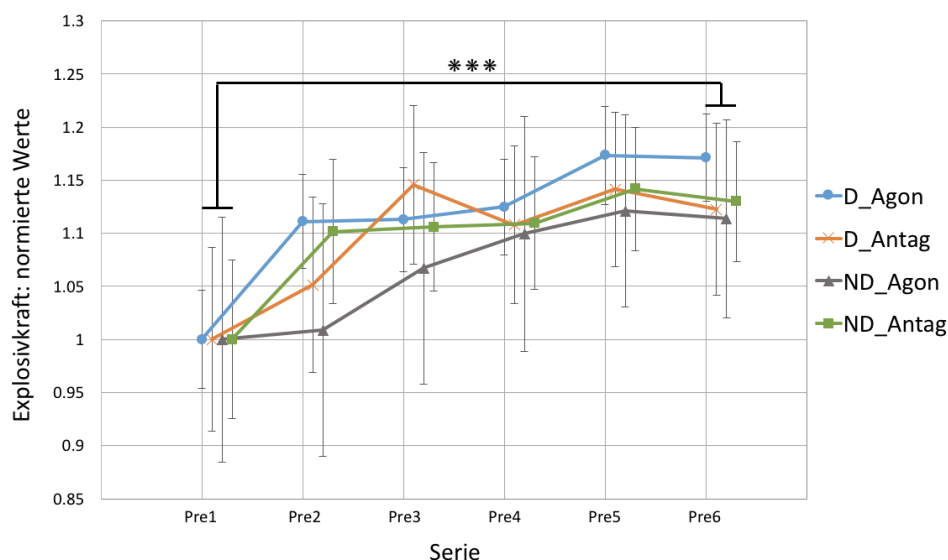


Abbildung 7: Erzielte Leistungssteigerung der vier Gruppen innerhalb des Explosivkrafttrainings. Die absoluten Werte (Explosivkraft in Newton) wurden auf die erste Serie normiert, so dass alle Gruppen vom selben Ausgangsniveau aus starten. Die eingezeichnete Signifikanz steht für das Mittel aller vier Gruppen und für einen höchst signifikanten Leistungsanstieg zwischen der ersten und der letzten Serie des Trainings.

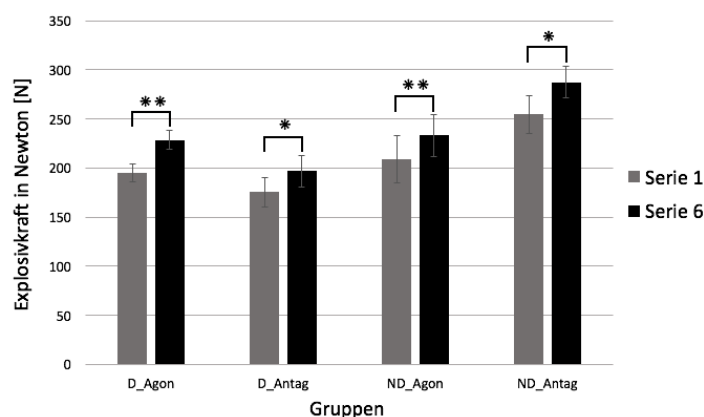


Abbildung 8: Absolute Leistungsverbesserung der Explosivkraft in Newton für die vier Gruppen, erzielt zwischen der ersten und der letzten Serie des Explosivkrafttrainings. Zusätzlich ist über den Säulen das Signifikanzniveau der Leistungsunterschiede eingetragen (* für signifikant, ** für hoch signifikant, *** für höchst signifikant).

3.2.2 Genauigkeitstraining

Aus der Abbildung 9 wird bereits visuell ersichtlich, dass sich die vier Gruppen im Verlauf des Genauigkeitstrainings sehr ähnlich entwickeln. Diese Annahme bestätigt auch die ANOVA mit Messwiederholung, welche für den Interaktionseffekt einen nicht signifikanten Wert (Serie * Gruppe: $p = 0.607$) errechnet. Der Serieneffekt hingegen ist höchst signifikant ($p < 0.001$), was die Abnahme der Fehlerprozentzahlen im Verlauf der fünf Serien widerspiegelt. Jede einzelnen der vier Gruppen vermag sich zwischen der Serie 1 und der Serie 5 des Genauigkeitstrainings höchst signifikant ($p < 0.001$) zu verbessern. Im Mittel beträgt die Fehlerreduktion von der Serie 1 (absoluter Fehler: $25.4 \% \pm 1 \%$) zur Serie 5 (absoluter Fehler: $16.8 \% \pm 0.6 \%$) $8.6 \% \pm 0.6 \%$, was wiederum einer höchst signifikanten Leistungsverbesserung ($p < 0.001$) entspricht.

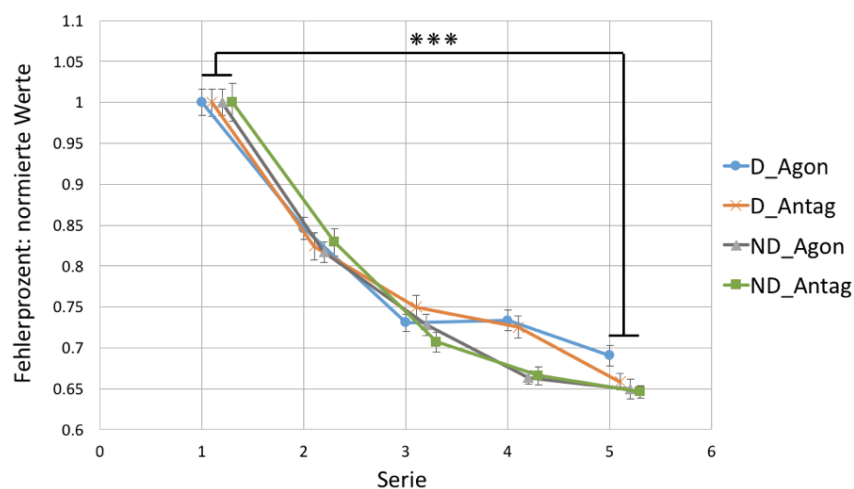


Abbildung 9: Leistungsverbesserung der vier Gruppen während des Genauigkeitstrainings. Die absoluten Werte (Fehlerprozent) wurden auf die erste Serie normiert, so dass alle Gruppen vom selben Ausgangsniveau starten. Aus der y-Achse ist somit indirekt die prozentuelle Leistungsverbesserung zu entnehmen. Das eingetragene Signifikanzniveau entspricht einer höchst signifikanten Verbesserung der vier Gruppen von der Serie 1 zur Serie 5 des Genauigkeitstrainings.

Da im Genauigkeitstraining effektiv die Fehlerprozentwerte gemessen wurden, entsprechen die oben geschilderten Daten den absoluten Werten. In einem Prozentsatz ausgedrückt, vermögen die Probanden ihre Fehlerzahl im Mittel um 32,4 Prozent \pm 1,8 Prozent zwischen der Serie 1 und der Serie 5 zu reduzieren (vergleiche Abbildung 9).

Aus der Abbildung 10 sind zudem die absoluten Fehlerprozentreduktionen von jeder der vier Gruppen zu entnehmen. Die t-Tests für verbundene Stichproben ergeben für jede Gruppe eine höchst signifikante ($p < 0.001$) Fehlerreduktion zwischen der ersten und der letzten Serie des Genauigkeitstrainings.

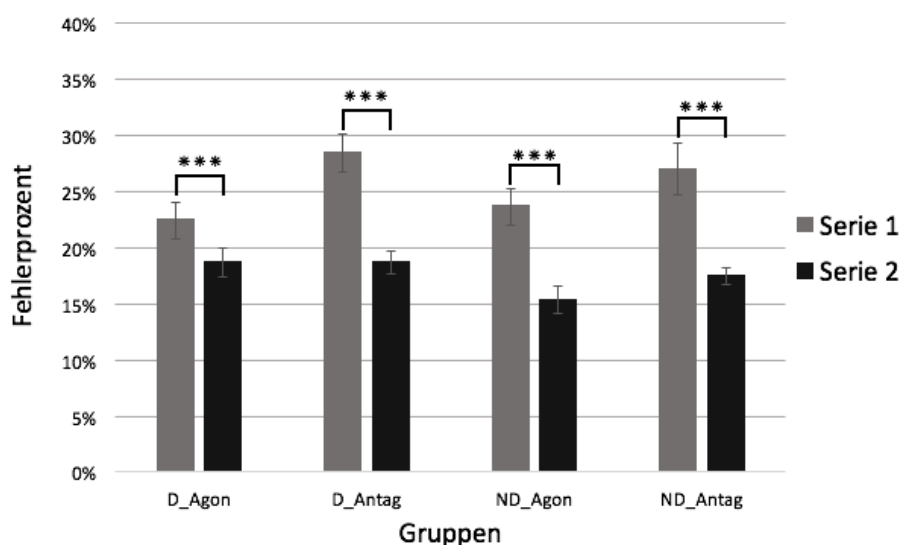


Abbildung 10: Absolute Leistungsverbesserung, welche zwischen der Serie 1 und der Serie 5 des Genauigkeitstrainings erzielt wurde. Alle Gruppen vermochten sich höchst signifikant zu verbessern, was den Markierungen oberhalb der Balken entnommen werden kann.

3.3 Interferenz und Cross-limb Interferenz

Das vorhergehende Kapitel beschreibt die Leistungsverbesserung, welche während des Trainings in der Explosivkraft und der Genauigkeit erzielt wurde. Nun gilt es zu untersuchen, ob und in welcher Ausprägung die Genauigkeitsaufgabe die Reprise des Explosivkrafttrainings beeinflusst. Die Abbildung 11 fungiert als Übersichtsgraphik und zeigt die normierten Explosivkraftwerte aller Gruppen, welche während des Trainings und des Posttrainings erzielt wurden. Unmittelbar nach der sechsten Serie des Trainings führten die Probanden das Genauigkeitstraining aus und wurden danach erneut in einem Posttraining auf die Explosivkraft getestet. Für das Phänomen der Interferenz und der Cross-limb Interferenz interessiert hauptsächlich, wie sich die Explosivkraft von der letzten Serie des Trainings (Pre6) zur ersten Serie des Posttrainings (Post1) verändert. Dieser Bereich ist in der Abbildung 11 zusätzlich durch einen roten Rahmen markiert worden.

Aus der Graphik ist zu entnehmen, dass die beiden Gruppen, welche die Genauigkeitsaufgabe mit dem Agonisten ausführten (Gruppe D_Agon und Gruppe ND_Agon), eine deutliche Leistungseinbusse bei der Wiederaufnahme des Trainings erleiden. Die Gruppen, welche die Genauigkeitsaufgabe mit dem Antagonisten trainierten (Gruppe D_Antag und Gruppe ND_Antag), vermögen die erzielte Leistungsverbesserung im Training in das Posttraining zu übernehmen. Dieser visuell erkennbare Unterschied schlägt sich auch in der statistischen Untersuchung nieder. Eine ANOVA mit Messwiederholung für alle Gruppen über den gesamten Verlauf der 10 Serien zeigt neben einem höchst signifikanten ($p < 0.001$) Serieneffekt auch einen deutlichen Unterschied des Explosivkraftverlaufs zwischen den verschiedenen Gruppen (Serien * Gruppe: $p = 0.002$). Dabei unterscheidet sich die Gruppe D_Agon und ND_Agon in ihrem Verlauf über die 10 Serien nicht signifikant voneinander (Serien * Gruppe: $p = 0.326$). Auch die Gruppe D_Antag und ND_Antag zeigen einen ähnlichen Verlauf über alle Serien betrachtet (Serien * Gruppe: $p = 0.473$). Für die Untersuchung der Interferenz und der Cross-limb Interferenz wird im nachfolgenden Kapitel die Serie 6 des Trainings und die Serie 1 des Posttrainings isoliert analysiert.

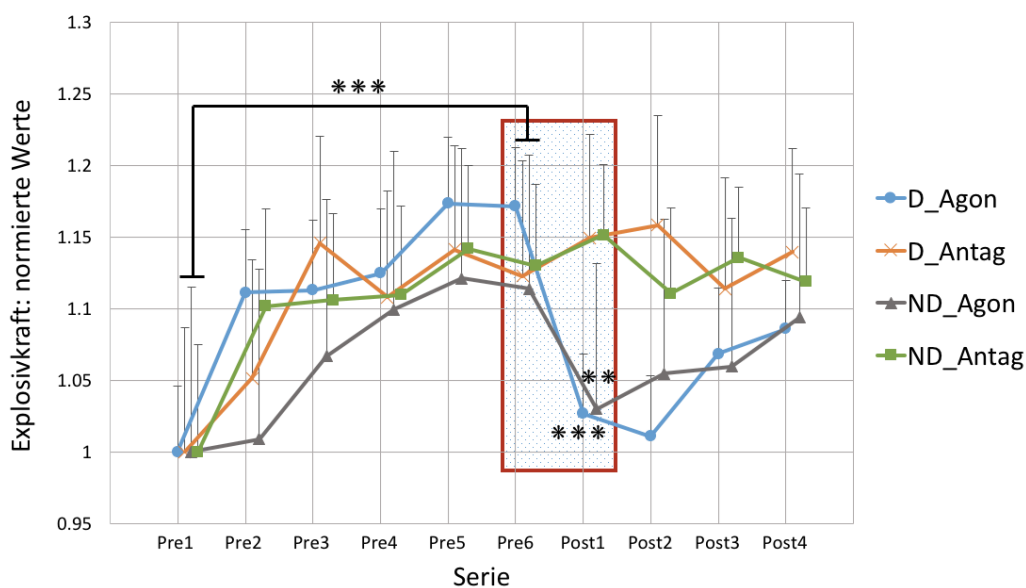


Abbildung 11: Verlauf der Explosivkraft, dargestellt über die gesamten Serien des Trainings und Posttrainings. Die absoluten Werte (Explosivkraft in Newton) wurden auf die erste Serie normiert. Zudem sind die wichtigsten Signifikanzen eingetragen. Pre 1 - Pre 6 widerspiegelt das Explosivkrafttraining mit einem höchst signifikanten Leistungsanstieg aller Gruppen. Von Pre6 zu Post1 sind die Effekte der Interferenz und Cross-limb Interferenz ersichtlich (roter Rahmen). Gruppe D_Agon erleidet einen höchst signifikanten Leistungsabfall (Interferenz), während die Gruppe ND_Agon hoch signifikant an Leistung einbüsst (Cross-limb Interferenz).

3.3.1 Interferenz

Interferenz kann erwartet werden, wenn die Genauigkeitsaufgabe in dieselbe Bewegungsrichtung und mit demselben Agonisten, wie das Training ausgeführt wird. Keine Interferenz sollte hingegen die Gruppe zeigen, welche die Genauigkeitsaufgabe in die entgegengesetzte Bewegungsrichtung und mit dem Antagonisten durchführt. Somit wird hier die Gruppe D_Agon der Gruppe D_Antag gegenübergestellt und zwischen der Serie 6 des Explosivkrafttrainings und der Serie 1 des Explosivkraftposttrainings analysiert. Die Ergebnisse sind zusätzlich in der Abbildung 12 visualisiert. Aus Übersichtsgründen wurde hierbei der Trainingserfolg zwischen der Serie 1 und der Serie 6 des Explosivkrafttrainings ebenfalls mitverarbeitet (vergleiche Kapitel 3.2.1 Explosivkrafttraining).

Die ANOVA mit Messwiederholung zeigt zwischen der Serie 6 des Trainings und der Serie 1 des Posttrainings einen höchst signifikanten (Serie * Gruppe: $p < 0.001$) Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die Gruppe D_Agon büsst einen höchst signifikanten ($p < 0.001$) Leistungsabfall zwischen der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings ein. Die Gruppe D_Antag zeigt hingegen keine signifikante ($p = 0.8$) Leistungsveränderung zwischen der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings.

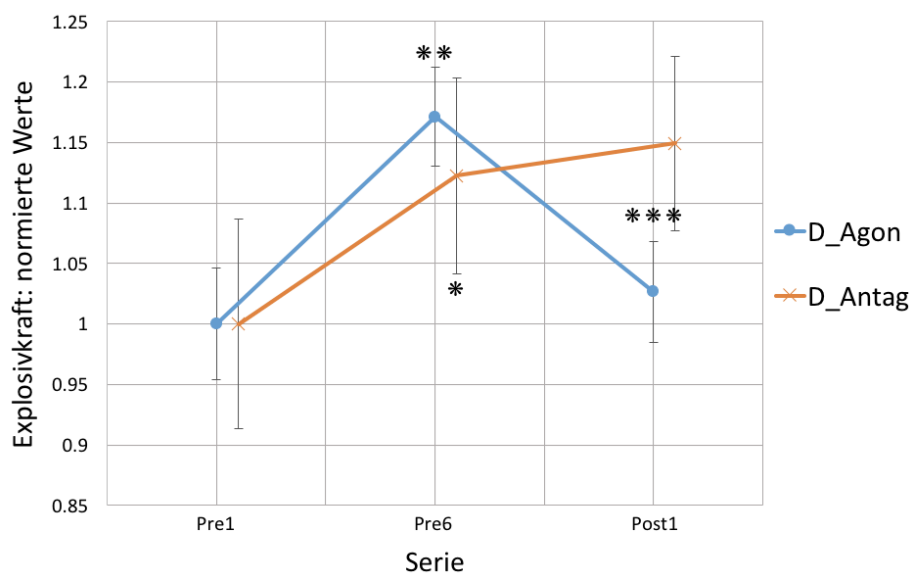


Abbildung 12: Ausmass der Interferenz. Die Gruppe D_Agon weist einen höchst signifikanten Leistungsabfall zwischen Pre6 und Post1 auf und zeigt somit deutliche Interferenz. Die „Kontrollgruppe“ D_Antag erleidet keine Leistungseinbusse zwischen Pre - und Posttest und somit auch keine Interferenz. Durch die eingetragene Leistungssteigerung im Training von Pre 1 zu Pre 6 (hoch signifikant für D_Agon und signifikant für D_Antag) wird das Ausmass der Interferenz ersichtlich.

3.3.2 Cross-limb Interferenz

Cross-limb Interferenz darf erwartet werden, wenn die Genauigkeitsaufgabe mit dem kontralateralen Agonisten und in dieselbe Bewegungsrichtung, wie das Training ausgeführt wird. Im Gegensatz dazu ist keine Cross-limb Interferenz zu erwarten, wenn es sich um den kontralateralen Antagonisten und die entgegengesetzte Bewegungsrichtung handelt. Somit wird hier die Gruppe ND_Agon der Gruppe ND_Antag entgegengesetzt und die Ergebnisse in der Abbildung 13 dargestellt.

Die ANOVA mit Messwiederholung zeigt zwischen der Serie 6 des Trainings und der Serie 1 des Posttrainings einen hoch signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen (Serie * Gruppe: $p = 0.001$). Die Gruppe ND_Agon zeigt einen hoch signifikanten ($p = 0.006$) Leistungsabfall der Explosivkraft zwischen der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings. Die Gruppe ND_Antag weist keinen signifikanten ($p = 0.4$) Unterschied zwischen den beiden Serien auf.

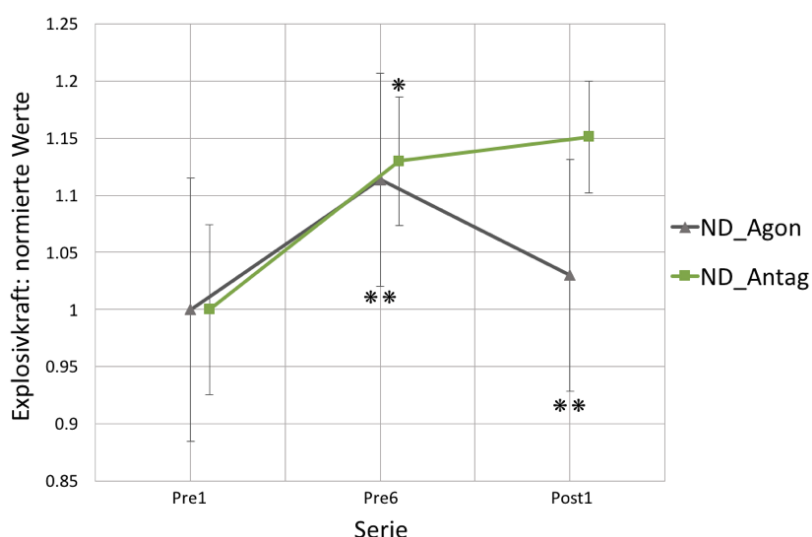


Abbildung 13: Ausmass der Cross-limb Interferenz. Die Gruppe ND_Agon weist einen hoch signifikanten Leistungsabfall zwischen Pre6 und Post1 auf und zeigt somit deutliche Cross-limb Interferenz. Die „Kontrollgruppe“ ND_Antag erleidet keine Leistungseinbußen zwischen Pre- und Posttest und somit auch keine Cross-limb Interferenz. Durch die eingetragene Leistungssteigerung im Training von Pre 1 zu Pre 6 (hoch signifikant für ND_Agon und signifikant für ND_Antag) wird das Ausmass der Cross-limb Interferenz ersichtlich.

Cross-limb Interferenz kann auch in der im Training indirekt (durch den Cross-limb Transfer) trainierten Hand aufgedeckt werden. Die Gruppen D_Agon und D_Antag zeigen einen hoch signifikanten (Serie * Gruppe: $p = 0.005$) Unterschied im Verlauf der Explosivkraft zwischen dem Posttest und dem Retentionstest. Von den ursprünglich zwischen dem Pretest und dem Posttest gewonnenen $23.2 \text{ N} \pm 3.2 \text{ N}$, verliert die Gruppe D_Agon zwischen dem Posttest und dem Retentionstest im Mittel $6.8 \text{ N} \pm 2.8 \text{ N}$. Von den 12 Probanden büßen jedoch deren fünf keine Leistung ein, was eine grosse Varianz innerhalb der Gruppe ergibt. Die Gruppe D_Antag

büsst zwischen dem Posttest und dem Retentionstest keine Leistung ein und kann sich sogar um weitere $10.8 \text{ N} \pm 4.6 \text{ N}$ steigern. Lediglich zwei der 12 Probanden zeigen einen minimalen Leistungsabfall zwischen dem Posttest und dem Retentionstest. Die in der Gruppe D_Agon beobachtete Cross-limb Interferenz zwischen dem Posttest und dem Retentionstest entspricht nach entsprechender Bonferroni-Korrektur keinem signifikanten ($p = 0.08$) Leistungsabfall mehr. Auch der in der Gruppe D_Antag erkannte Leistungsanstieg zwischen den beiden Serien ist nicht signifikant ($p = 0.1$). In der Abbildung 14 ist der Verlauf der Explosivkraft beider Gruppen graphisch abgebildet.

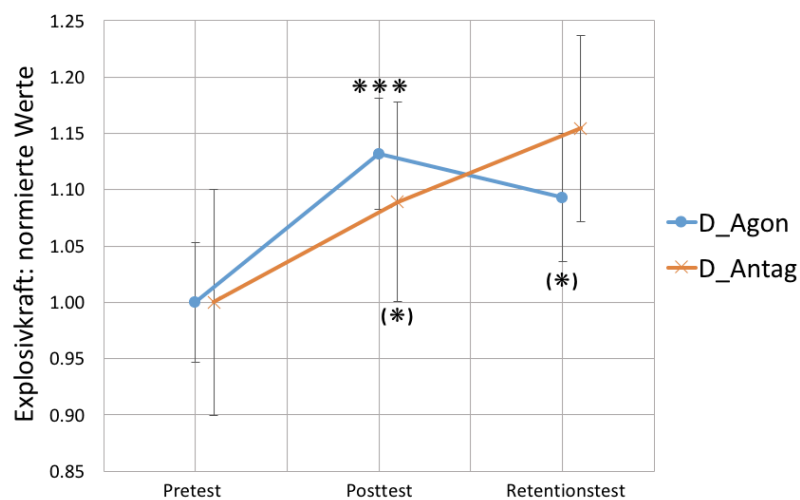


Abbildung 14 Ausmass der Cross-limb Interferenz, beobachtet in der indirekt (durch den Cross-limb Transfer) trainierten, nicht dominanten Hand. Die Gruppe D_Agon büsst zwischen dem Posttest und dem Retentionstest leicht an Leistung ein. Die eingeklammerte Signifikanz über dem Retentionstest bedeutet, dass der Leistungsabfall vor entsprechender Bonferroni-Korrektur signifikant ausgefallen wäre. Die eingetragene Signifikanz über dem Posttest bezieht sich auf den, durch den Cross-limb Transfer erzielten, Leistungsanstieg zwischen dem Pretest und dem Posttest. Eingeklammert bedeutet: Signifikant vor entsprechender Bonferroni-Korrektur.

3.3.3 Ausmass der Interferenz und Cross-limb Interferenz

Da diese Arbeit die erste ist, welche die Interferenz direkt mit der Cross-limb Interferenz vergleichen kann, ist es interessant zu untersuchen, ob es einen Unterschied zwischen dem Ausmass der Interferenz und demjenigen der Cross-limb Interferenz im motorischen Lernen gibt. Für die statistische Analyse wurde die Differenz zwischen dem im Training erzielten Leistungsanstieg und der durch die interferierende Genauigkeitsaufgabe hervorgerufene Leistungseinbusse errechnet. Die Bilanzergebnisse der Gruppen D_Agon (Interferenz) und ND_Agon (Cross-limb Interferenz) wurden weiterführend in einem t-Test für unabhängige Stichproben auf einen signifikanten Unterschied des Ausmasses der Interferenz analysiert. Die Ergebnisse werden in der Abbildung 15 dargestellt. Die Baseline ist zusätzlich rot eingefärbt. Sie beschreibt die Grenze, bei welcher die Gruppen eine vollständige Leistungseinbusse

(Leistungsanstieg = Leistungsabfall) erleiden würden. Eine positive Bilanz bedeutet eine unvollständige Interferenz $< 100\%$ und eine negative Bilanz eine vollständige Interferenz $> 100\%$. Die Interferenzgruppe zeigt eine positive Bilanz von $5.2\text{ N} \pm 7\text{ N}$ und erduldet somit ein leicht höheres Ausmass an Interferenz als die Cross-limb Interferenzgruppe, welche eine positive Bilanz von $6.3\text{ N} \pm 8\text{ N}$ aufweist. Der Unterschied zwischen dem Ausmass der beiden Arten der Interferenz fällt jedoch nicht signifikant ($p = 0.9$) aus.

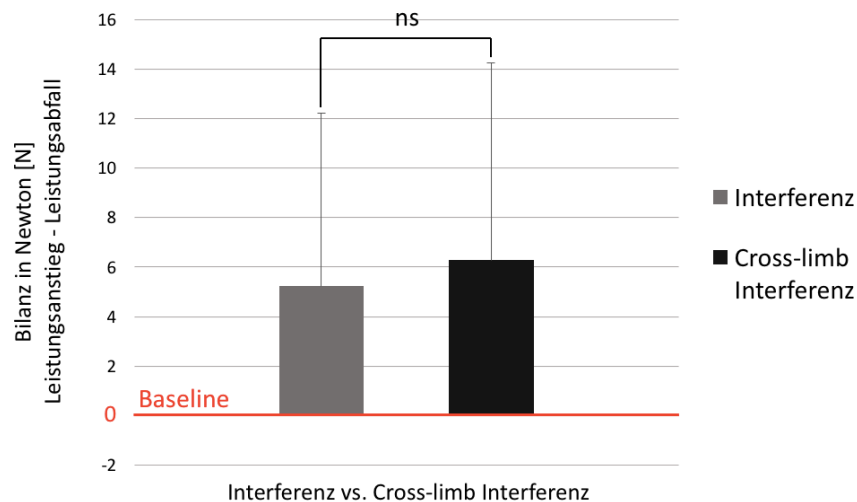


Abbildung 15: Vergleich des Ausmasses der Interferenz mit demjenigen der Cross-limb Interferenz. Für die Interferenzgruppe und Cross-limb Interferenzgruppe wurde die Differenz aus dem erzielten Leistungsanstieg (Pre1-Pre6) und dem erduldeten Leistungsabfall (Pre6 - Post1) errechnet. Die Baseline steht für eine vollständige Interferenz (Leistungsabfall = Leistungsanstieg). Beide Gruppen zeigen eine unvollständige Interferenz und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (gekennzeichnet durch ns).

3.4 Reine Explosivkraftwerte und reine Timingwerte

Eine zusätzliche Analyse der Kraftkurven der Probanden ermöglicht eine isolierte Betrachtung der reinen Explosivkraft und der reinen Timingwerten. Die bisherigen Resultate stellen eine Kombination der beiden Grössen dar, da die Explosivkraft erst 200 Millisekunden nach dem Messstartton ermittelt wurde und die Probanden somit den optimalen Zeitpunkt für den Start der Handgelenkflexion im Verlauf des Trainings bestimmen mussten. Für die reinen Explosivkraftwerte (V200) wurde der Kraftanstieg jedes Probanden, unabhängig der Zeit der ersten Krafteinwirkung, für einen Zeitraum von 200 Millisekunden gemessen. Für die Analyse des Timings wurde die absolute Abweichung zum optimalen Startzeitpunkt (200 Millisekunden nach dem Startton) ermittelt.

Es gilt zu untersuchen, ob sich die Probanden auch in den isolierten Grössen verbessern konnten und ob zwischen dem Training und dem Posttraining Interferenz bzw. Cross-limb Interferenz auszumachen ist.

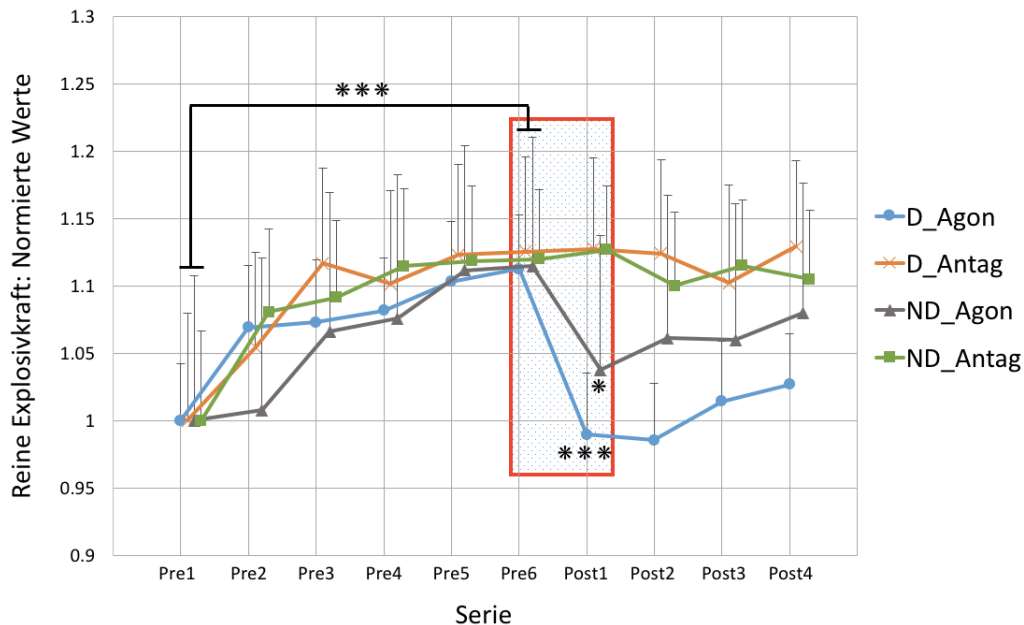


Abbildung 16: Verlauf der reinen Explosivkraft über die gesamten Serien des Trainings und des Posttrainings. Die absoluten Werte (Explosivkraft in Newton) wurden auf die erste Serie normiert. Zudem sind die wichtigsten Signifikanzen eingetragen. Alle Gruppen verbessern sich im Verlauf des Trainings (Pre1 - Pre6) höchst signifikant. Zwischen Pre6 und Post1 ist das Ausmass der Interferenz, bzw. der Cross-limb Interferenz erkennbar. Die Gruppe D_Agon büsst höchst signifikant an Leistung (Interferenz) ein, während die Gruppe ND_Agon einen signifikanten Leistungsabfall (Cross-limb Interferenz) erduldet.

3.4.1 Reine Explosivkraftwerte

Die Abbildung 16 fungiert in diesem Kapitel als Übersichtsgraphik und zeigt den Verlauf der reinen Explosivkraftwerte, welche von den vier Gruppen in den sechs Serien des Trainings und den vier Serien des Posttrainings erreicht wurden. Die Werte wurden erneut auf die erste Serie normiert, so dass alle Gruppen von demselben Ausgangsniveau (100 %) aus starten und das Ausmass der Leistungsveränderung untereinander besser verglichen werden kann.

Während des Trainings wird mit einem höchst signifikanten ($p < 0.001$) Serieneffekt und einem nicht signifikanten Interaktionseffekt (Serie * Gruppe: $p = 0.6$) ein sehr ähnliches Ergebnis, wie unter Betrachtung der Kombination der Explosivkraft und dem Timing erzielt (vergleiche Kapitel 3.2.1 Explosivkrafttraining). Die vier Gruppen verbessern die reine Explosivkraft zwischen der ersten und der letzten Serie des Trainings höchst signifikant ($p < 0.001$), von $225.4 \text{ N} \pm 9.7 \text{ N}$ auf $244.5 \text{ N} \pm 9.3 \text{ N}$. Diese Werte entsprechen einem prozentuellen reinen Kraftanstieg von $14.1 \% \pm 2.3 \%$, welcher durch das Training erzielt wurde.

Über alle Serien des Explosivkrafttrainings und des Explosivkraftposttrainings betrachtet, unterscheiden sich die vier Gruppen in ihrem Verlauf stark (Serie * Gruppe: $p < 0.001$)

voneinander. Hier weisen wiederum die Gruppen D_Agon und ND_Agon (Serie * Gruppe: $p = 0.5$) und die Gruppen D_Antag und ND_Antag (Serie * Gruppe: $p = 0.8$) eine ähnliche Entwicklung der reinen Explosivkraft auf. Es ist somit wahrscheinlich, dass der unterschiedliche Explosivkraftverlauf zwischen den Gruppen im Auftreten der Interferenz und der Cross-limb Interferenz zu finden ist. Die beiden Phänomene sind auch unter isolierter Betrachtung der reinen Explosivkraft deutlich erkennbar. Die Gruppe D_Agon büsst zwischen der letzten Serie des Explosivkrafttrainings und der ersten Serie des Explosivkraftposttrainings einen höchst signifikanten ($p < 0.001$) Leistungsverlust ein. Auch die Gruppe ND_Agon erleidet einen signifikanten ($p = 0.01$) Leistungsabfall zwischen den beiden Serien. Die Gruppe D_Antag ($p = 1.0$) und ND_Antag ($p = 1.0$) weisen keinerlei Interferenz oder Cross-limb Interferenz auf und nehmen den im Training erzielten Leistungsanstieg unverändert in das Posttraining mit. Die Abbildung 17 zeigt den Vergleich des Ausmasses der Interferenz mit demjenigen der Cross-limb Interferenz unter isolierter Betrachtung der reinen Explosivkraft. Die isolierte Betrachtungsweise führt zu etwas ausgeprägteren Ergebnissen. So weist die Interferenzgruppe D_Agon eine negative Bilanz von $-2.2 \text{ N} \pm 5.4 \text{ N}$ und somit eine vollständige Interferenz über das Niveau der Baseline hinaus auf. Die Cross-limb Interferenzgruppe (ND_Agon) zeigt eine positive Bilanz ($8.6 \text{ N} \pm 8.3 \text{ N}$) zwischen dem Leistungsanstieg und dem Leistungsabfall. Ein Proband der Interferenzgruppe büsst zwischen der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings keine Leistung ein. In der Cross-limb Interferenzgruppe können zwei Probanden ihr Leistungsniveau zwischen den beiden Serien aufrechterhalten. Das visuell deutlich erkennbare und ausgeprägtere Ausmass des Leistungsabfalls der Interferenzgruppe reicht jedoch nicht aus, um auch statistisch gesehen ein signifikantes ($p = 0.3$) Ergebnis zu erzielen.

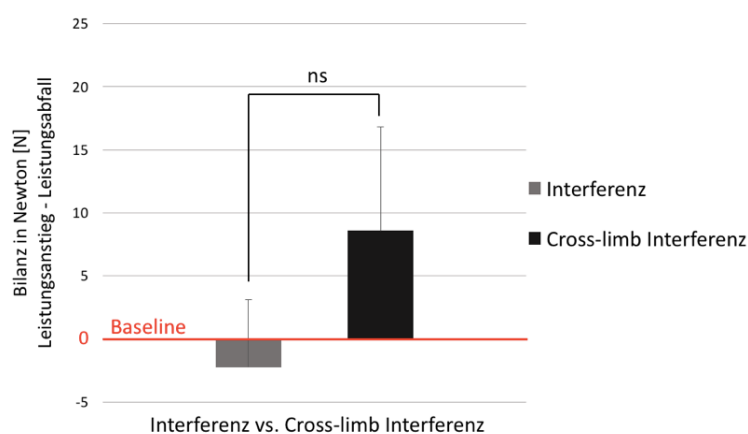


Abbildung 17: Vergleich des Ausmasses der Interferenz (reine Explosivkraftwerte) mit demjenigen der Cross-limb Interferenz (reine Explosivkraftwerte). Für die Interferenzgruppe und Cross-limb Interferenzgruppe wurde die Differenz aus dem erzielten Leistungsanstieg (Pre1 - Pre6) und dem erduldeten Leistungsabfall (Pre6 - Post1) errechnet. Die Baseline steht für eine vollständige Interferenz (Leistungsabfall = Leistungsanstieg). Die beiden Gruppen unterscheiden sich im Ausmass des Leistungsabfalls nicht signifikant (ns) voneinander.

3.4.2 Reine Timingwerte

Aus der Abbildung 18 ist ersichtlich, inwiefern sich die vier Gruppen in den sechs Serien des Trainings und den vier Serien des Posttrainings im Timing angepasst haben. Dabei wurde aus den Kraftkurven der Probanden der Zeitpunkt ermittelt, bei welchem die erste Krafteinwirkung auf den Messstab erfolgte (OT). Aus jedem Wert wurde die absolute Differenz zum optimalen Timingzeitpunkt 200 Millisekunden nach dem Messstartton errechnet. Optimaler Weise ist innerhalb der Gruppen eine Verbesserung hin zum Differenzwert 0 ersichtlich.

Lediglich die Gruppe D_Agon vermag sich von der Serie 1 zur Serie 6 des Trainings signifikant ($p = 0.04$) zu verbessern. Dabei ist eine Verringerung der Differenz zum effektiven Messbeginn von $39.0 \text{ ms} \pm 5.9 \text{ ms}$ auf $21.6 \text{ ms} \pm 5.0 \text{ ms}$ auszumachen. Die Gruppe D_Antag zeigt zwischen der zweiten und dritten Serie des Trainings einen Leistungssprung in der Timingverbesserung ($p = 0.02$), welcher nach entsprechender Bonferroni Korrektur jedoch nicht mehr signifikant ausfällt. Die ANOVA mit Messwiederholung zeigt weder für das Training (Serie * Gruppe: $p = 0.07$), noch für das Posttraining (Serie * Gruppe: $p = 0.36$) eine unterschiedliche Entwicklung in der Timinganpassung der vier Gruppen. Auch über alle 10 Serien des Trainings und Posttrainings hinaus, kann kein signifikanter Interaktionseffekt (Serie * Gruppe: $p = 0.24$) beobachtet werden.

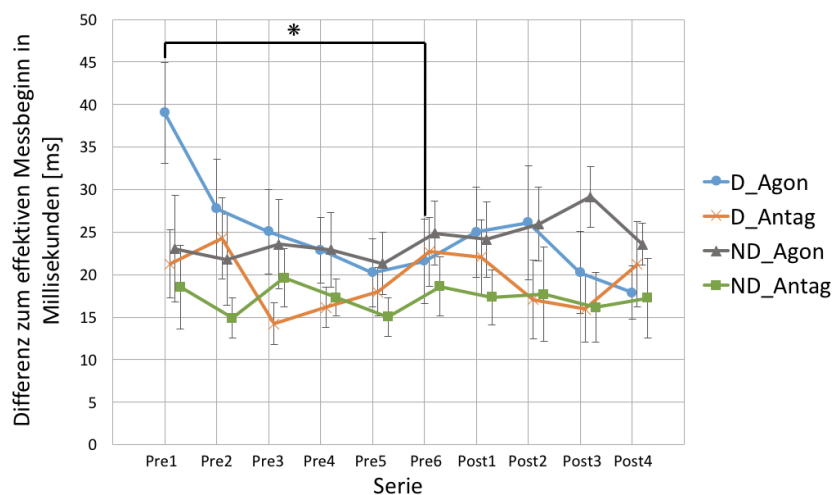


Abbildung 18: Verlauf der Timinganpassungen über die gesamten Serien des Trainings und des Posttrainings. Lediglich die Gruppe D_Agon vermag sich im Verlauf des Trainings von Pre1 zu Pre6 signifikant zu verbessern. Ansonsten sind keine Verbesserungen und auch keine Effekte der Interferenz, bzw. der Cros-limb Interferenz erkennbar.

Diese Befunde lassen bereits erahnen, dass in der isolierten Betrachtung des Timings auch keine Interferenzeffekte ausfindig gemacht werden können. Die separate Analyse der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings zeigt keinen signifikanten Interaktionseffekt (Serie * Gruppe: $p = 0.82$) der vier Gruppen. Auch die gepaarten t-Tests

können in keiner Gruppe eine Veränderung der Timingdifferenz zum effektiven Messbeginn zwischen der Serie 6 des Trainings und der Serie 1 des Posttrainings ausfindig machen.

Es muss vermutet werden, dass die Zeitspanne von 200 ms zu nahe an der effektiven Reaktionszeit der Probanden liegt und somit das vorhandenen Studiendesign zu wenig Potential für reine Anpassungen im Timing erlaubt.

3.5 Anmerkung

Das Posttraining wurden im Resultatteil nicht explizit analysiert, da es für die zu untersuchenden Phänomene nur bedingt relevant erscheint (Ausnahme bildet die erste Serie des Posttrainings, die für den Interferenzeffekt mit der letzten Serie des Trainings verglichen wurde). Der Vollständigkeit halber werden die wichtigsten Beziehungen des Posttrainings in diesem Kapitel noch kurz erwähnt. Die Werte werden dabei in Kombination mit der Explosivkraft und dem Timing analysiert.

Die ANOVA mit Messwiederholung zeigt für das Posttraining keinen signifikanten ($p = 0.21$) Serieneffekt. Der Interaktionseffekt fällt hingegen signifikant (Serie * Gruppe: $p = 0.027$) aus. Die Interferenzgruppen (D_Agon und ND_Agon) eröffnen die erste Serie des Posttrainings auf einem tieferen Explosivkraftniveau als die Gruppen, welche keine Interferenz aufweisen (D_Antag und ND_Antag) und vermögen sich in der Maximalkraft bis zur Serie 4 des Posttrainings wieder leicht zu steigern. Die Verbesserung der Gruppe D_Agon fällt signifikant ($p = 0.02$) aus. Die Probanden verbessern sich im Mittel von $200.3 \text{ N} \pm 8.3 \text{ N}$ auf $211.9 \text{ N} \pm 7.1 \text{ N}$. Die Leistungssteigerung der Gruppe ND_Agon von $215.6 \text{ N} \pm 21.9 \text{ N}$ auf $229.0 \text{ N} \pm 22.8 \text{ N}$ entspricht jedoch keiner signifikanten ($p = 0.32$) Verbesserung. Die Gruppen D_Antag und ND_Antag stagnieren in ihrer Leistungsverbesserung im Posttraining und vermögen ihre Maximalkraft nicht mehr signifikante ($p > 0.2$) zu steigern.

Die Tatsache, dass die Interferenzgruppen ihre Leistung im Verlauf des Posttrainings nochmals verbessern können, stellt eine wichtige Erkenntnis dar. Es darf daraus geschlossen werden, dass der zwischen der Serie 6 des Trainings und der Serie 1 des Posttrainings erkannte Leistungsabfall nicht durch die Erschöpfung, sondern tatsächlich durch Interferenzeffekte hervorgerufen wurde

4 Diskussion

Diese Forschungsarbeit befasste sich mit den beiden Phänomenen der Interferenz und des Cross-limb Transfers. Das primäre Ziel war es, die Cross-limb Interferenz, eine noch wenig beschriebene Kombination der beiden Phänomene, während einer motorischen Explosivkraftaufgabe zu untersuchen. Die vorliegende Studie ist meines Erachtens die Erste, welche das Ausmass der Interferenz im motorischen Lernen direkt mit dem Ausmass der Cross-limb Interferenz im motorischen Lernen vergleicht. Diese Untersuchung lässt wiederum Rückschlüsse auf bestehende Theorien und Mechanismen der einzelnen Phänomene zu. Zudem vermag es die Studie, die erzielten Verbesserungen in der Explosivkraft und im Timing isoliert oder in Kombination zu betrachten.

4.1 Cross-limb Transfer

Bei der Analyse des Cross-limb Transfers konnte nach einem Explosivkrafttraining der dominanten Hand ein höchst signifikanter ($p < 0.001$) Kraftanstieg in der nicht trainierten Hand festgestellt werden. Die Hypothese, dass die Probanden nach dem ballistischen Explosivkrafttraining auch eine Leistungssteigerung im nicht trainierten Glied aufweisen, kann an dieser Stelle bestätigt werden. Das Studiendesign erfüllte die meisten Kriterien, welche Munn et al. (2004) für die breit angelegte Analyse des Cross-limb Transfers definierten. Das Ergebnis der dreizehn analysierten Studien zeigte einen durchschnittlichen Kraftanstieg im nicht trainierten Glied von 7.8 %. Dieser Wert entsprach wiederum 35 % des erzielten Leistungsanstiegs der trainierten Seite. Der in der vorliegenden Studie erkannte Kraftanstieg der untrainierten Seite von 11 % entspricht ungefähr den Beobachtungen der Metaanalyse von Munn et al. (2004). Das Verhältnis des Kraftanstiegs im Bezug zur trainierten Seite fiel jedoch mit 76 % mehr als doppelt so stark aus. Ein möglicher Grund für die erhöhte Transferleistung könnte in der Trainingsdauer liegen. Die vorliegende Studie bezieht sich auf ein kurzfristiges Training, welches primär neuronale Anpassungen ermöglicht. Munn et al. (2005) liessen die Probanden in ihrer Studie ein sechswöchiges Training mit dem Ellbogenflexor ausführen. Die lange Trainingsdauer legt nahe, dass nebst neuronalen Anpassungen auch muskelspezifische Anpassungen möglich waren. Lediglich neuronale Anpassungen können aber in die nicht trainierte Seite transferieren (Evetovich et al., 2001). Das Fehlen der muskelspezifischen Anpassungen könnte somit einer der Hauptgründe für die verringerte Kraftzunahme der Vergleichsstudie auf der nicht trainierten Seite sein. Die vorliegende Studie weist sowohl in der trainierten, wie auch in der untrainierten Hand lediglich neuronale Anpassungen und somit

einen deutlich verringerten Unterschied zwischen den beiden Seiten auf. Lee and Carroll (2007) legten dar, dass die Transferleistung von der trainierten in die nicht trainierte Seite durchaus stark variieren kann. So konnten auch vollständige Transferleistungen von 100 % beobachtet werden. Die in dieser Arbeit erzielten Resultate regen somit einmal mehr die Diskussion an, inwiefern eine Verallgemeinerung der Effektstärke des Cross-limb Transfers Sinn ergibt. Die Ergebnisse der Studie von Farthing et al. (2005) waren verantwortlich, dass die Probanden das Explosivkrafttraining des Handgelenkflexors in der vorliegenden Studie mit der dominanten Hand ausführten. Die Forscher erkannten in ihrer Arbeit, dass der Cross-limb Transfer der Armmuskulatur lediglich von der dominanten in die nicht dominante Seite erfolgte, jedoch nicht umgekehrt. Der erzielte Kraftanstieg in der nicht trainierten Hand der vorliegenden Studie bestätigt die erkannte Transferrichtung von der dominanten in die nicht dominante Seite. Trotzdem kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden, ob die Transferrichtung unidirektional, also lediglich von der dominanten in die nicht dominante Seite, oder in beide Richtungen erfolgt. Um diese These bestätigen zu können, hätte eine zweite Gruppe das Explosivkrafttraining mit der nicht dominanten Hand ausführen müssen.

Der Studie dieser Arbeit fehlte im Bereich der Analyse des Cross-limb Transfers zudem eine Kontrollgruppe. Es bleibt zu spekulieren, inwiefern die fünf durchgeführten Versuche mit der nicht dominanten Hand für die Bestimmung der Grundkraft bereits als Training fungierten und somit am final erkannten Leistungsanstieg beteiligt waren. Die Arbeit teilt die Kritik von Munn et al. (2004) die sagt, dass für die reine Analyse des Cross-limb Transfers stets eine Kontrollgruppe eingesetzt werden sollte, welche lediglich die Versuche mit dem untrainierten Glied ausführt und in der Zeit des eigentlichen Trainings ruht.

4.2 Trainingsanpassungen und Trainingsdauer

Das in dieser Arbeit ausgeführte Explosivkrafttraining und Genauigkeitstraining ergeben aufgrund der Trainingsdauer einen spannenden Diskussionspunkt. Im Vergleich zu anderen Studien (z.B. Munn et al. (2005)) fiel die Trainingsdauer mit sechs Serien à fünf Wiederholungen für das Explosivkrafttraining und fünf Serien à fünf Wiederholungen für das Genauigkeitstraining, eher kurz aus. Trotzdem vermochten die Probanden ihre Leistungen in beiden Trainingsbereichen höchst signifikant ($p < 0.001$) zu verbessern. Die erste Hypothese, welche von einer Leistungssteigerung in beiden Trainingsbereichen ausging, kann trotz der kurzen Trainingsdauer bestätigt werden. Es darf somit angenommen werden, dass neuroplastische Veränderungen bereits kurz nach dem Training auftreten. In der vorliegenden Studie wird das Augenmerk auf die neuronalen Anpassungen gelegt, da mit muskelspezifischen

Anpassungen erst nach einer längeren Trainingsdauer ab vier Wochen gerechnet werden kann (Jensen et al., 2005). Adkins et al. (2006) beschrieben die drei wichtigsten Prozesse der neuronalen Anpassung beim motorischen Lernen und haben die Proteinsynthese, die Synaptogenese und die Reorganisation motorischer Programme besonders hervorgehoben. Laut den Forschern tritt die Proteinsynthese praktisch unmittelbar mit dem Trainingsbeginn ein. Für die Synaptogenese und die Reorganisation motorischer Programme sei jedoch eine längere Trainingsdauer von mehreren Tagen notwendig. Laut Kleim et al. (1996) ist die Proteinsynthese direkt für die Vermehrung der Synapsen zuständig. Es wäre interessant zu untersuchen, ob die kurze Trainingsdauer (ungefähr 30 min für das Explosivkrafttraining und ungefähr 20 min für das Genauigkeitstraining) bereits zu einer effektiven Vermehrung der benötigten Synapsen oder sogar zu einer Reorganisation des motorischen Programms ausreicht. Carroll et al. (2008) konnten nach einer dieser Studie vergleichbaren Trainingsdauer eine vergrösserte kortikospinale Erregbarkeit in der trainierten Hand feststellen. Auch die vorliegende Arbeit vertritt die Ansicht, dass die erzielten Leistungsverbesserungen im Explosivkrafttraining und Genauigkeitstraining auf neuronale Anpassungen und primär auf eine verbesserte Ansteuerung des benötigten Glieds zurückzuführen waren. Mittels Verfahren wie Elektromyographie, peripherer Nervenstimulation oder transkranieller Magnetstimulation könnte diese These in einer weiterführenden Forschungsarbeit untersucht werden.

Es scheint zudem wahrscheinlich zu sein, dass der Trainingserfolg direkt mit der Natur der Trainingsbewegung zusammenhängt. Carroll et al. (2008) liessen ihre Probanden eine eher ungewohnte Zeigefingerbewegung ausführen und stellten nach dem Training eine Verbesserung der maximalen Beschleunigung über 100 % im Vergleich zum Ausgangswert fest. Die ungewohnte Bewegung in Kombination mit einem klug gewählten Parameter erlaubten enorme Leistungsverbesserungen während des Trainings. Die in der vorliegenden Arbeit ausgeführte Handgelenksflexion stellt eine eher gewöhnliche Bewegung dar, was eine Begründung für das geringere Verbesserungspotential sein könnte. Mit der maximalen Beschleunigung und der Explosivkraft wurden jedoch auch unterschiedliche Parameter untersucht.

4.3 Interferenz und Cross-limb Interferenz

Die Studie vermochte das Phänomen der Interferenz im motorischen Lernen aufzuzeigen. Die Ausführung einer Genauigkeitsaufgabe mit demselben Muskel und in dieselbe Bewegungsrichtung führte zu höchst signifikanten ($p < 0.001$) Leistungseinbussen bei der Wiederaufnahme des Explosivkrafttrainings. Dabei zeigte die Gruppe, welche die Genauigkeitsaufgabe mit dem Antagonisten und somit auch in die entgegengesetzte Bewegungsrichtung ausführte, keine Interferenz. Eine wichtige Erkenntnis von Lundbye-Jensen et al. (2011) konnte somit bestätigt werden. Diese sagt aus, dass Interferenz dann auftritt, wenn die zweite Aufgabe mit demselben Muskel und in dieselbe Bewegungsrichtung wie die erste Aufgabe ausgeführt wird. Diese Tatsache ist wiederum ein Verstärker für die Annahme, dass die Konsolidierung der Explosivkraftaufgabe nur dann ausreichend gestört wurde, wenn durch die Genauigkeitsaufgabe dieselben sensorischen Areale aktiv waren.

Eine weitere Erkenntnis der Forscher war, dass die zweite Aufgabe einer Lernaufgabe entsprechen muss und somit bewusst ein Leistungsgewinn erzielt werden kann. Diese Vorgabe wurde in der vorliegenden Studie erfüllt. Die Analyse der reinen Timingwerte zeigte jedoch, dass sich die Probanden während des Trainings in diesem Bereich nicht verbessern mochten. Unter diesem Aspekt konnte nach der Durchführung der Genauigkeitsaufgabe auch keine Interferenz beobachtet werden. Es ist somit durchaus anzunehmen, dass nicht nur die interferierende Aufgabe einer Lernaufgabe entsprechen muss, sondern auch die primäre Aufgabe diese Voraussetzung erfüllen muss.

Die vorliegende Studie liess die Probanden die interferierende Aufgabe unmittelbar nach dem Explosivkrafttraining ausführen und konnte als Folge dessen bei der Wiederaufnahme des Trainings Interferenz feststellen. Es wird angenommen, dass das motorische Gedächtnis unmittelbar nach dem Training noch sehr instabil ist und sich erst nach einer gewissen Zeit festigt. Verschiedene Studien konnten aufzeigen, dass eine längere Ruhephase zwischen der primären Aufgabe und der interferierenden Aufgabe keine Interferenz mehr verursachte (Brashers-Krug et al., 1996; Feld et al., 2016; Lundbye-Jensen et al., 2011).

Der Fokus dieser Studie lag auf der Untersuchung der Cross-limb Interferenz. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Probanden, welche die Genauigkeitsaufgabe mit der zuvor nicht trainierten Hand und dem Agonisten ausführten, ebenfalls eine hoch signifikante ($p < 0.01$) Leistungseinbusse bei der Wiederaufnahme des Explosivkrafttrainings hinnehmen mussten. Die Kontrollgruppe, welche die Genauigkeitsaufgabe mit der nicht trainierten Hand und dem Antagonisten ausführte, zeigte keine Interferenz. Die Vermutung, dass sowohl die Durchführung der interferierenden Aufgabe mit dem trainierten, als auch mit dem untrainierten

Muskel zu Interferenz, bzw. Cross-limb Interferenz im Explosivkrafttraining führt, kann an dieser Stelle bestätigt werden. Es wird angenommen, dass die von Lundbye-Jensen et al. (2011) festgelegten Richtlinien für das Auftreten der Interferenz auch für das Auftreten der Cross-limb Interferenz gültig sind. Diese Annahme geht auch mit der Beobachtung einher, dass in der vorliegenden Studie keine Interferenz und Cross-limb Interferenz aufgetreten ist, solange die Genauigkeitsaufgabe mit dem Antagonisten und das Explosivkrafttraining mit dem Agonisten ausgeführt wurde. Somit kann auch die sechste Hypothese angenommen werden. Die vorliegende Studie war die Erste, welche das Ausmass der Interferenz direkt mit demjenigen der Cross-limb Interferenz vergleichen konnte. Dafür wurde jeweils die Differenz zwischen der im Training erzielten Leistungszunahme und der durch die interferierende Aufgabe verursachte Leistungsabnahme berechnet. Es wurde angenommen, dass das Ausmass der Interferenz kleiner ausfällt, wenn die interferierende Aufgabe mit dem untrainierten Glied ausgeführt wird. Die Interferenzgruppe zeigte im Vergleich zur Cross-limb Interferenzgruppe ein leicht erhöhtes Ausmass an Interferenz. Der Unterschied entsprach jedoch keinem signifikanten ($p = 0.9$) Wert. Der erkannte Unterschied fiel unter der isolierten Betrachtung der Explosivkraft etwas deutlicher aus. Die Interferenzgruppe wies eine vollständige Interferenz über das Niveau der Baseline hinaus auf. Die Cross-limb Interferenzgruppe hingegen, büsste bei der Wiederaufnahme des Explosivkrafttrainings nicht den gesamten Leistungsgewinn ein und zeigte somit keine vollständige Interferenz. Wiederum entsprach der Unterschied jedoch keinem ($p = 0.3$) Ausmass. Die fünfte Hypothese konnte somit nur bedingt bestätigt werden. Es wird angenommen, dass während der Genauigkeitsaufgabe bei der Cross-limb Gruppe nebst den für die Bewegungsausführung verantwortlichen kortikospinalen Arealen, auch die gegenüberliegenden Areale, welche für die identische Bewegungsausführung der nicht benötigten Hand verantwortlich sind, aktiv waren. Diese deckten sich wiederum mit den für die primär ausgeführte Explosivkraftaufgabe benötigten Arealen, wodurch die Gedächtniskonsolidierung gestört und als Folge dessen Interferenz verursacht wurde. Diese Annahme deckt sich mit der Studie von Lee et al. (2010), welche während einer ballistischen Schnellkraftaufgabe mit dem Zeigefinger nicht nur kortikospinale Aktivität auf der trainierten, sondern auch auf der untrainierten Seite feststellen konnten. Das leicht verringerte Ausmass der Interferenz der Cross-limb Interferenzgruppe könnte auf einer weniger stark ausgeprägten kortikospinalen Aktivität auf der untrainierten Seite beruhen. Ein Erklärungsansatz für diese These könnte in der Forschungsarbeit von Farthing et al. (2005) gefunden werden. Die Forscher kamen zur Erkenntnis, dass der Cross-limb Transfer primär von der dominanten in die nicht dominante Seite, nicht aber umgekehrt erfolgt. Die Cross-limb Interferenzgruppe führte in der

vorliegenden Studie die Genauigkeitsaufgabe mit der nicht dominanten Hand aus, während die Interferenzgruppe die dominante Hand benutzte. Dies könnte dazu führen, dass die Cross-limb Interferenzgruppe eine geringere Aktivität in der kontralateralen Hemisphäre aufwies und dadurch die Gedächtniskonsolidierung weniger stark störte, wie dies die Interferenzgruppe tat. Dieser Erklärungsansatz ist jedoch mit Vorsicht zu genießen. Lee and Carroll (2007) zeigten ihrerseits, dass beide Transferrichtungen möglich sind. Die vorliegende Studie vertritt die Meinung, dass es durch einseitiges Training auch zu neuronalen Anpassungen in der nicht trainierten Hemisphäre kommt und befürwortet somit die „cross-activation hypothesis“.

Die Studie vermochte die Cross-limb Interferenz auch in der zuvor indirekt, durch den Cross-limb Transfer trainierten und nicht dominanten Hand festzustellen. Die Gruppe D_Agon zeigte nach der Durchführung der Genauigkeitsaufgabe mit der dominanten Hand und dem Agonisten eine leichte Leistungseinbusse beim Retentionstest. Die Gruppe D_Antag zeigte keine Leistungsabnahme und vermochte sogar auf einem erhöhten Leistungsniveau einzusteigen. Die durch die Genauigkeitsaufgabe verursachte Leistungsabnahme in der nicht trainierten Hand entsprach jedoch keinem signifikanten ($p = 0.08$) Wert. Die Leistungsabnahme verlor jedoch erst nach entsprechender Bonferroni-Korrektur ihre signifikante Bedeutung. Es wird angenommen, dass die Trainingsdauer und der damit verbundene Lernerfolg der Genauigkeitsaufgabe nicht ausreichend war, um eine deutlichere Cross-limb Interferenz zu verursachen. Die Studie von Lauber et al. (2013) konnte deckungsgleiche Ergebnisse beobachten. Nur die Gruppe, welche die Genauigkeitsaufgabe mindestens 12 Minuten trainierte, zeigte ein signifikantes Ausmass an Cross-limb Interferenz. Die Gruppe, welche die Genauigkeitsaufgabe für 6 Minuten trainierte, wies keine signifikante Leistungseinbusse beim Retentionstask auf.

4.4 Analyse der reinen Explosivkraft und der reinen Timingwerte

Die Möglichkeit, die erzielten Verbesserungen in der Explosivkraft und im Timing isoliert oder in Kombination zu betrachten, ergaben einen interessanten Zusatz für diese Arbeit. Der Grund für die Kombination der Explosivkraft mit den Anpassungen des Timings lag darin, dass eine maximale Leistungssteigerung der Probanden während des Trainings erreicht werden wollte. Vor der Durchführung der Studie wurde generell die Annahme vertreten, dass sich die Probanden primär im Timing, jedoch nicht besonders stark in der reinen Explosivkraft verbessern werden. Die kurze Trainingsdauer war hauptverantwortlich für diese Hypothese. Umso mehr vermochten die Ergebnisse zu erstaunen. In den reinen Explosivkraftwerten konnten sich alle Probanden während des Trainings höchst signifikant ($p < 0.001$) verbessern.

Zudem waren die Phänomene der Interferenz und der Cross-limb Interferenz deutlich zu erkennen. Die Ergebnisse verstärken die Annahme, dass neuronale Anpassungen bereits bei einer kurzen Trainingsdauer auftreten.

In den reinen Anpassungen des Timings vermochte sich während des Trainings lediglich die Gruppe D_Agon leicht zu verbessern ($p = 0.04$). Alle anderen Gruppen blieben sowohl während des Trainings, wie auch während des Posttrainings konstant auf demselben Leistungsniveau. Keine Gruppe unterschied sich im Verlauf des Trainings und Posttrainings voneinander und in keiner Gruppe konnte zwischen der letzten Serie des Trainings und der ersten Serie des Posttrainings Interferenz oder Cross-limb Interferenz beobachtet werden.

Diese Erkenntnis lässt auch die zweite und somit letzte Hypothese beantworten, welche nur teilweise angenommen werden kann. Grosse Leistungsverbesserungen konnten in der effektiven Explosivkraft beobachtet werden, wo hingegen in der Anpassung an das optimale Timing keine Leistungsverbesserung ausgemacht werden konnte.

4.5 Schlussfolgerung

Mit der Beantwortung der letzten Hypothese ist es zu diesem Zeitpunkt auch möglich, die Forschungsfrage vollumfänglich zu klären. Es kommt zur Cross-limb Interferenz, wenn zwischen zwei Sequenzen eines ballistischen Explosivkrafttrainings mit dem Handgelenkflexor, eine Genauigkeitsaufgabe mit dem nicht trainierten Handgelenkflexor durchgeführt wird. Die Leistungsabnahme ist in Kombination der Explosivkraft mit dem Timing und unter Beobachtung der reinen Explosivkraft ersichtlich. Keine Cross-limb Interferenz konnte jedoch in der Analyse der reinen Anpassung an das optimale Timing beobachtet werden. Es wird angenommen, dass die Zeitspanne von 200ms zwischen dem Messstartton und der eigentlichen Messung zu kurz gewählt wurde. Die Zeit schien zu nahe an der natürlichen Reaktionszeit der Probanden zu liegen, so dass nicht aktiv nach dem optimalen Zeitpunkt des Beginns der Krafteinwirkung gesucht werden musste. Es ist aber durchaus anzunehmen, dass Trainingsanpassungen und Cross-limb Interferenzeffekte auch im Timing zu beobachten wären, wenn die Zeitspanne zwischen dem Startton und dem eigentlichen Start der Messung vergrößert werden würde. Eine Wiederholung der Studie mit einer Zeitspanne zwischen dem Startton und dem Beginn der Messung von mindestens 400ms wäre ein interessanter Ansatz für eine weiterführende Forschungsarbeit.

Diese Arbeit konnte aufschlussreiche Ergebnisse aus der Erforschung eines noch wenig beschriebenen Phänomens gewinnen. Weitere Studien sind nötig, um die Cross-limb Interferenz in ihrer Funktionsweise besser verstehen zu können. Diese Studie vermag es, neue

Verhaltensdaten zu liefern, welche während eines Explosivkrafttrainings in Kombination mit einer Genauigkeitsaufgabe aufgetreten sind. Zudem konnten neue Thesen gebildet werden, welche es in Zukunft zu überprüfen gilt.

Literaturverzeichnis

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *J Mot Behav*, 3(2), 111-149.
- Adkins, D. L., Boychuk, J., Remple, M. S., & Kleim, J. A. (2006). Motor training induces experience-specific patterns of plasticity across motor cortex and spinal cord. *J Appl Physiol (1985)*, 101(6), 1776-1782. doi:10.1152/jappphysiol.00515.2006
- Barss, T. S., Pearcey, G. E., & Zehr, E. P. (2016). Cross-education of strength and skill: an old idea with applications in the aging nervous system. *Yale J Biol Med*, 89(1), 81-86.
- Batcho, C. S., Gagne, M., Bouyer, L. J., Roy, J. S., & Mercier, C. (2016). Impact of online visual feedback on motor acquisition and retention when learning to reach in a force field. *Neuroscience*, 337, 267-275. doi:10.1016/j.neuroscience.2016.09.020
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *NATURE*, 382(6588), 252-255. doi:10.1038/382252a0
- Carroll, T. J., Lee, M., Hsu, M., & Sayde, J. (2008). Unilateral practice of a ballistic movement causes bilateral increases in performance and corticospinal excitability. *J Appl Physiol (1985)*, 104(6), 1656-1664. doi:10.1152/jappphysiol.01351.2007
- Carroll, T. J., Riek, S., & Carson, R. G. (2001). Neural adaptations to resistance training: implications for movement control. *Sports Med*, 31(12), 829-840.
- Conner, J. M., Culbertson, A., Packowski, C., Chiba, A. A., & Tuszynski, M. H. (2003). Lesions of the Basal forebrain cholinergic system impair task acquisition and abolish cortical plasticity associated with motor skill learning. *Neuron*, 38(5), 819-829.
- Cook, T. W. (1933). Studies in cross education: I. Mirror tracing the star-shaped maze. *Journal of Experimental Psychology*, 16(1), 144-160.
- Criscimagna-Hemminger, S. E., Donchin, O., Gazzaniga, M. S., & Shadmehr, R. (2003). Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to nondominant arm. *J Neurophysiol*, 89(1), 168-176. doi:10.1152/jn.00622.2002
- De Zeeuw, C. I., & Yeo, C. H. (2005). Time and tide in cerebellar memory formation. *Curr Opin Neurobiol*, 15(6), 667-674. doi:10.1016/j.conb.2005.10.008
- Debarnot, U., Maley, L., Rossi, D. D., & Guillot, A. (2010). Motor interference does not impair the memory consolidation of imagined movements. *Brain Cogn*, 74(1), 52-57. doi:10.1016/j.bandc.2010.06.004
- Diogo, I., Walliczek, U., Taube, J., Franke, N., Teymoortash, A., Werner, J., & Guldner, C. (2016). Possibility of differentiation of cochlear electrodes in radiological

- measurements of the intracochlear and chorda-facial angle position. *Acta Otorhinolaryngol Ital*, 36(4), 310-316. doi:10.14639/0392-100x-878
- Dorfberger, S., Adi-Japha, E., & Karni, A. (2007). Reduced susceptibility to interference in the consolidation of motor memory before adolescence. *PLoS One*, 2(2), e240. doi:10.1371/journal.pone.0000240
- Enoka, R. M. (1988). Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Med*, 6(3), 146-168.
- Evetovich, T. K., Housh, T. J., Housh, D. J., Johnson, G. O., Smith, D. B., & Ebersole, K. T. (2001). The effect of concentric isokinetic strength training of the quadriceps femoris on electromyography and muscle strength in the trained and untrained limb. *J Strength Cond Res*, 15(4), 439-445.
- Farthing, J. P., Chilibeck, P. D., & Binsted, G. (2005). Cross-education of arm muscular strength is unidirectional in right-handed individuals. *Med Sci Sports Exerc*, 37(9), 1594-1600.
- Feld, G. B., Weis, P. P., & Born, J. (2016). The Limited Capacity of Sleep-Dependent Memory Consolidation. *Front Psychol*, 7, 1368. doi:10.3389/fpsyg.2016.01368
- Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). The neural basis of decision making. *Annu Rev Neurosci*, 30, 535-574. doi:10.1146/annurev.neuro.29.051605.113038
- Hermer-Vazquez, L., Hermer-Vazquez, R., Moxon, K. A., Kuo, K. H., Viau, V., Zhan, Y., & Chapin, J. K. (2004). Distinct temporal activity patterns in the rat M1 and red nucleus during skilled versus unskilled limb movement. *Behav Brain Res*, 150(1-2), 93-107. doi:10.1016/s0166-4328(03)00226-2
- Hinder, M. R., Schmidt, M. W., Garry, M. I., Carroll, T. J., & Summers, J. J. (2011). Absence of cross-limb transfer of performance gains following ballistic motor practice in older adults. *J Appl Physiol (1985)*, 110(1), 166-175. doi:10.1152/jappphysiol.00958.2010
- Jensen, J. L., Marstrand, P. C., & Nielsen, J. B. (2005). Motor skill training and strength training are associated with different plastic changes in the central nervous system. *J Appl Physiol (1985)*, 99(4), 1558-1568. doi:10.1152/jappphysiol.01408.2004
- Jones, T. A. (1999). Multiple synapse formation in the motor cortex opposite unilateral sensorimotor cortex lesions in adult rats. *J Comp Neurol*, 414(1), 57-66.
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessel, T. M. (2011). *Neurowissenschaften Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum.
- Kleim, J. A., Barbay, S., Cooper, N. R., Hogg, T. M., Reidel, C. N., Remple, M. S., & Nudo, R. J. (2002). Motor learning-dependent synaptogenesis is localized to functionally

- reorganized motor cortex. *Neurobiol Learn Mem*, 77(1), 63-77.
doi:10.1006/nlme.2000.4004
- Kleim, J. A., Bruneau, R., Calder, K., Pocock, D., VandenBerg, P. M., MacDonald, E., . . . Nader, K. (2003). Functional organization of adult motor cortex is dependent upon continued protein synthesis. *Neuron*, 40(1), 167-176.
- Kleim, J. A., Lussnig, E., Schwarz, E. R., Comery, T. A., & Greenough, W. T. (1996). Synaptogenesis and Fos expression in the motor cortex of the adult rat after motor skill learning. *J Neurosci*, 16(14), 4529-4535.
- Kluwe, R. H., Lüser, G., & Rösler, F. (2003). *Principles of Learning and Memory*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Lauber, B., Lundbye-Jensen, J., Keller, M., Gollhofer, A., Taube, W., & Leukel, C. (2013). Cross-limb interference during motor learning. *PLoS One*, 8(12), e81038.
doi:10.1371/journal.pone.0081038
- Laurent, P. A. (2008). The emergence of saliency and novelty responses from Reinforcement Learning principles. *Neural Netw*, 21(10), 1493-1499.
doi:10.1016/j.neunet.2008.09.004
- Lee, M., & Carroll, T. J. (2007). Cross education: possible mechanisms for the contralateral effects of unilateral resistance training. *Sports Med*, 37(1), 1-14.
- Lee, M., Gandevia, S. C., & Carroll, T. J. (2009). Unilateral strength training increases voluntary activation of the opposite untrained limb. *Clin Neurophysiol*, 120(4), 802-808. doi:10.1016/j.clinph.2009.01.002
- Lee, M., Hinder, M. R., Gandevia, S. C., & Carroll, T. J. (2010). The ipsilateral motor cortex contributes to cross-limb transfer of performance gains after ballistic motor practice. *J Physiol*, 588(Pt 1), 201-212. doi:10.1113/jphysiol.2009.183855
- Levey, A. B., & Martin, I. (1968). Shape of the conditioned eyelid response. *Psychol Rev*, 75(5), 398-408.
- Lewis, D., & Miles, G. H. (1956). Retroactive Interference in Performance on the Star Discrimeter as a Function of Amount of Interpolated Learning. *Perceptual and Motor Skills*, 6, 295-298.
- Lundbye-Jensen, J., Petersen, T. H., Rothwell, J. C., & Nielsen, J. B. (2011). Interference in ballistic motor learning: specificity and role of sensory error signals. *PLoS One*, 6(3), e17451. doi:10.1371/journal.pone.0017451

- Masters. (1992). Knowledge, (k)nerve and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *The British Journal of Psychology*, 83, 343-358.
- Masters, R. S., Poolton, J. M., & Maxwell, J. P. (2008). Stable implicit motor processes despite aerobic locomotor fatigue. *Conscious Cogn*, 17(1), 335-338.
doi:10.1016/j.concog.2007.03.009
- Maxwell, J. P., Masters, R. S., Kerr, E., & Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *Q J Exp Psychol A*, 54(4), 1049-1068. doi:10.1080/713756014
- Meinel, K., & Schnabel, G. (2007). *Bewegungslehre Sportmotorik - Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Mielke, R. (2001). *Psychologie des Lernens Eine Einführung*. Stuttgart: W.Kohlhammer.
- Morita, Y., Ogawa, K., & Uchida, S. (2016). Napping after complex motor learning enhances juggling performance. *Sleep Sci*, 9(2), 112-116. doi:10.1016/j.slsci.2016.04.002
- Most, S. B., Scholl, B. J., Clifford, E. R., & Simons, D. J. (2005). What you see is what you set: sustained inattention blindness and the capture of awareness. *Psychol Rev*, 112(1), 217-242. doi:10.1037/0033-295x.112.1.217
- Muellbacher, W., Ziemann, U., Boroojerdi, B., Cohen, L., & Hallett, M. (2001). Role of the human motor cortex in rapid motor learning. *Exp Brain Res*, 136(4), 431-438.
- Müller, G. E., & Pilzecker, A. (1900). Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Gedächtnis. *Z. Psychol. Suppl.*, 1, 1-300.
- Munn, J., Herbert, R. D., & Gandevia, S. C. (2004). Contralateral effects of unilateral resistance training: a meta-analysis. *J Appl Physiol (1985)*, 96(5), 1861-1866.
doi:10.1152/jappphysiol.00541.2003
- Munn, J., Herbert, R. D., Hancock, M. J., & Gandevia, S. C. (2005). Training with unilateral resistance exercise increases contralateral strength. *J Appl Physiol (1985)*, 99(5), 1880-1884. doi:10.1152/jappphysiol.00559.2005
- Pearce, A. J., Thickbroom, G. W., Byrnes, M. L., & Mastaglia, F. L. (2000). Functional reorganisation of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. *Exp Brain Res*, 130(2), 238-243.
- Perez, M. A., Tanaka, S., Wise, S. P., Sadato, N., Tanabe, H. C., Willingham, D. T., & Cohen, L. G. (2007). Neural substrates of intermanual transfer of a newly acquired motor skill. *Curr Biol*, 17(21), 1896-1902. doi:10.1016/j.cub.2007.09.058
- Roig, M., Ritterband-Rosenbaum, A., Lundbye-Jensen, J., & Nielsen, J. B. (2014). Aging increases the susceptibility to motor memory interference and reduces off-line gains in

- motor skill learning. *Neurobiol Aging*, 35(8), 1892-1900.
doi:10.1016/j.neurobiolaging.2014.02.022
- Schermer, F. J. (2006). *Lernen und Gedächtnis*. Stuttgart: W.Kohlhammer.
- Schreurs, B. G., McIntosh, A. R., Bahro, M., Herscovitch, P., Sunderland, T., & Molchan, S. E. (1997). Lateralization and behavioral correlation of changes in regional cerebral blood flow with classical conditioning of the human eyeblink response. *J Neurophysiol*, 77(4), 2153-2163.
- Scripture, E. W., Smith, T. L., & Brown, E. M. (1894). On the education of muscular control and power. *Stud Yale Psychol Lab*, 2, 114 - 119.
- Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci*, 17(1), 409-419.
- Spitzer, M. (2003). *Gehirnforschung und die Schule des Lebens*. Heidelberg: Spektrum.
- Stark-Inbar, A. D., Raza, M., Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2016). Individual differences in implicit motor learning: Task specificity in sensorimotor adaptation and sequence learning. *J Neurophysiol*, jn.01141.02015. doi:10.1152/jn.01141.2015
- Stockel, T., Carroll, T. J., Summers, J. J., & Hinder, M. R. (2016). Motor learning and cross-limb transfer rely upon distinct neural adaptation processes. *J Neurophysiol*, 116(2), 575-586. doi:10.1152/jn.00225.2016
- Taylor, H. G., & Heilman, K. M. (1980). Left-hemisphere motor dominance in righthanders. *Cortex*, 16(4), 587-603.
- Thompson, R. F., & Krupa, D. J. (1994). Organization of memory traces in the mammalian brain. *Annu Rev Neurosci*, 17, 519-549. doi:10.1146/annurev.ne.17.030194.002511
- VandenBerg, P., Bruneau, R., Remple, M., Soroka, N., Cooper, N., & Kleim, J. A. (2001). Strength vs skill: differential patterns of plasticity within the rat motor system. *Soc Neurosci Abstr*, 27.
- Wang, J., & Sainburg, R. L. (2004). Interlimb transfer of novel inertial dynamics is asymmetrical. *J Neurophysiol*, 92(1), 349-360. doi:10.1152/jn.00960.2003
- Wasserzieher, E. (1974). *Woher? Ableitendes Wörterbuch der deutschen Sprache*. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag.
- Watson, A. H. (2006). What can studying musicians tell us about motor control of the hand? *J Anat*, 208(4), 527-542. doi:10.1111/j.1469-7580.2006.00545.x
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nat Rev Neurosci*, 12(12), 739-751. doi:10.1038/nrn3112

- Yeo, C. H. (1991). Cerebellum and classical conditioning of motor responses. *Ann N Y Acad Sci*, 627, 292-304.

Dank

Ich möchte mich ganz herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben. Allen Probanden für die tolle Mitarbeit während der Testdurchführung; Vincent Aebischer für die super Zusammenarbeit bei der Entwicklung des Untersuchungsdesigns und für die motivierenden gemeinsamen Stunden in der Bibliothek; und natürlich meinen Betreuern Martin Keller und Jan Ruffieux für die kompetente Betreuung und ihre bedingungslose Hilfsbereitschaft während des gesamten Arbeitsprozesses.

Selbstverständlich danke ich auch meiner Freundin Seline Stäger und meinen guten Freunden Romeo Bütler, Mathieu Friz und Seluan Ajina, die mich immer wieder köstlich unterhalten.

Ein besonderes Dankeschön gilt meinen Eltern Adrian Heimgartner und Judith Heimgartner. Ihr habt es mir ermöglicht, diese unglaubliche Zeit als Student geniessen zu dürfen.

Persönliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Veröffentlichungen oder aus anderweitig fremden Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.“

Ort, Datum:

Unterschrift:

Urheberrechtserklärung

„Der Unterzeichnende anerkennt, dass die vorliegende Arbeit ein Bestandteil der Ausbildung, Einheit Bewegungs-und Sportwissenschaften der Universität Freiburg ist. Er überträgt deshalb sämtliche Urhebernutzungsrechte (dies beinhaltend insbesondere das Recht zur Veröffentlichung oder zu anderer kommerzieller oder unentgeltlicher Nutzung) an die Universität Freiburg.“

Die Universität darf dieses Recht nur im Einverständnis des Unterzeichnenden auf Dritte übertragen.

Finanzielle Ansprüche des Unterzeichnenden entstehen aus dieser Regelung keine.

Ort, Datum:

Unterschrift:
