



Fakultät für Medizin
Klinik für Orthopädie und Sportorthopädie

Erlernbarkeit haptischer Fertigkeiten an Simulatoren
am Beispiel einer isometrischen
Kraftapplikation

— Eine Studie über Methoden und Effektivität motorischen Lernens,
Feedbacklösungen und Langzeiterfolg —

Lukas Johannes Rief

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Medizin (Dr. med.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Prof. Dr. Ernst J. Rummeny

Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr. Rainer Burgkart
2. Prof. Dr. Andreas Imhoff

Die Dissertation wurde am 24.08.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Medizin am 28.03.2018 angenommen.

Danksagung

Zum Ende meiner Dissertation gilt mein herzlichster Dank Herrn Prof. Dr. med. Rainer Burgkart für die Ermöglichung der vorliegenden Arbeit, der Betreuung während der Erstellung und der Begutachtung derselben. Zudem danke ich meiner Familie für die Ermöglichung des Studiums und besonders Katharina für die Unterstützung und Hilfe.

Darüber hinaus danke ich den Versuchspersonen für ihr geduldiges Teilnehmen und Dr. Florian Güll für die Planung der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung	6
1 Einleitung.....	8
2 Theorie.....	11
2.1 Motorisches Lernen	11
2.1.1 Definitionen	11
2.1.2 Neuroanatomie.....	12
2.1.3 Prozedurales Gedächtnis.....	15
2.2 Feedback.....	16
2.2.1 The guidance hypothesis.....	17
2.2.2 Visuelles Feedback	19
2.2.3 Auditives Feedback.....	20
2.2.4 Multimodale Feedbackformen	22
2.3 Aufmerksamkeit und motorisches Lernen.....	22
2.4 Aktuelle Studien in der angewandten Simulatorforschung	24
2.5 Zusammenfassung und Fragestellung.....	25
3 Material und Methoden	27
3.1 Stichprobe	27
3.2 Material	27
3.2.1 Stimuli	27
3.2.1.1 Visuelles Feedback.....	27
3.2.1.2 Auditives Feedback.....	27
3.2.2 Apparatur.....	30
3.3 Setting und Ablauf	33
3.4 Studiendesign.....	35
3.5 Statistische Auswertung.....	35
3.6 Analyse der Ergebnisse.....	35
4 Ergebnisse.....	36
4.1 Ausschluss aus der Stichprobe.....	36
4.2 Beschreibung der Stichprobe	36

4.3	Ergebnisse der Testungen	37
4.3.1	Test auf Normalverteilung	37
4.3.2	Ergebnisse Frage 1: Genereller Lernerfolg.....	37
4.3.3	Ergebnisse Frage 2: Vorteil einer Feedbackform	40
4.3.4	Ergebnisse Frage 3: Analyse der Kurzzeiteffekte.....	42
4.3.5	Ergebnisse Frage 4: Analyse der Trainingszeiten nach Feedbackgruppen.....	46
4.3.5	Ergebnisse Frage 5: Halbjahres-Wiederholungstest	48
5	Diskussion	50
5.1	Diskussion der Ergebnisse	50
5.2	Kritik und Schwächen.....	57
5.3	Medizinische Anwendbarkeit	58
	Literaturverzeichnis.....	60

Abkürzungsverzeichnis

AF	absoluter Fehler
ConFB	concurrent Feedback
EEG	Elektroenzephalografie
EMG	Elektromyografie
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
KR	knowledge of result
LCD	Liquid Crystal Display
M	Mittelwert
n	Anzahl
N	Newton
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
SD	Standardabweichung
SMA	supplementärmotorisches Areal
VE	Vakuumentraktion
VR	virtual reality
ZNS	zentrales Nervensystem

Zusammenfassung

Haptische Fertigkeiten spielen im klinischen Alltag eine wichtige Rolle und sind ein bedeutender Teil des ärztlichen Handelns. Fertigkeiten, wie beispielsweise die Reposition eines luxierten Hüftgelenks oder der Zug an einer Saugglocke bei einer Geburt, können durch stetiges Üben verbessert werden. Es stellt sich die Frage, wie genau und mit welchen Hilfsmitteln diese Fertigkeiten erlernt und die Haptik memoriert werden kann.

Fertigkeiten, welchen eine isometrische Kraftapplikation zugrunde liegt, haben für gewöhnlich kein extrinsisches Feedback. Kräfte können quantifiziert und anhand von Simulatoren durch ein extrinsisches Feedback vermittelt werden. Die im Rahmen der Dissertation durchgeführte Studie an 37 Probanden untersucht die Erlernbarkeit einer isometrischen Kraftapplikation von 80 Newton (N) durch den einhändigen Zug an einem eigens angefertigten Simulator. An drei aufeinanderfolgenden Versuchstagen wurden die Probanden vor und nach einer Trainingseinheit am Simulator auf den Lernerfolg getestet. Ziel der Untersuchung war es, die definierte Kraft von 80 N möglichst genau zu erlernen und diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten ohne extrinsisches Feedback zu reproduzieren. Sowohl der kurzfristige (Test nach Training) als auch der langfristige Lernerfolg (Wiederholungstests) wurden untersucht.

Da extrinsisches Feedback auf verschiedenste Weisen dargeboten werden kann, wurden die Probanden in eine visuelle und eine auditive Feedbackgruppe aufgeteilt. Zudem erfolgte eine weitere Unterteilung in permanentes (=concurrent) oder terminales Feedback, sodass insgesamt 4 unterschiedliche Feedbackgruppen (Visuell_concurrent, Visuell_terminal, Auditiv_concurrent, Auditiv_terminal) entstanden, die hinsichtlich ihres Trainingserfolgs analysiert wurden.

Die Analyse der Trainingszeiten, als Maß für die Schwierigkeit einer jeden Feedbackform, und die Analyse einer Teilgruppe von 13 Probanden 6 Monate nach der Versuchsreihe wurden zur Unterstützung der Hauptthesen herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduktion hinsichtlich des absoluten Fehlers $|AF|$ zum Zielbereich von 80N sowie eine Minimierung der maximalen Abweichung zum Zielbereich über den Zeitraum von 3 Tagen über die Gesamtheit der Probanden.

Hinsichtlich der verschiedenen Feedbackformen zeigte sich in den Wiederholungstests ein signifikanter Vorteil der beiden auditiven Feedbackgruppen gegenüber den visuellen Feedbackgruppen (Visuell_concurrent, Visuell_terminal). Diese Ergebnisse sprechen für eine bessere Konsolidierung eines motorischen Programms für eine isometrische Kraftapplikation bei Training mit auditivem Feedback. Auch im Halbjahres-Wiederholungstest zeigt sich diese Tendenz.

Zudem konnte in der Analyse der Ergebnisse ein deutlicher Kurzzeiteffekt aller Feedbackgruppen mit signifikanten Lernerfolgen der Feedbackgruppen Auditiv_concurrent, Visuell_concurrent, Visuell_terminal und einer starken Tendenz der Feedbackgruppe Auditiv_terminal gezeigt werden.

Zusammenfassend zeigt die durchgeführte Studie, dass Simulatoren hilfreich im Erlernen einer isometrischen Kraftapplikation sind, wobei sich Vorteile auditiven Feedbacks gegenüber visuellen Feedbacks in der anschließenden Reproduktion der Kraft ohne Feedback zeigten.

1 Einleitung

Bei 16,2 Mio. Operationen in Deutschland im Jahr 2014 (Statistisches Bundesamt) werden von praktizierenden Ärzten sowie medizinischem Personal Wissen und praktische Fertigkeiten abverlangt, die durch ein Studium, eine Lehre und durch praktisches Lernen in der Ausbildung oder im fortlaufenden Berufsleben erlernt werden. Vor allem praktische Fertigkeiten stellen Studenten, junge Ärzte und medizinisches Personal vor eine große Herausforderung, da vor allem Übung und Erfahrung mit Erfolg und Sicherheit in der Ausführung dieser Fertigkeiten verbunden sind. Problematisch ist die direkte Ausführung einer Fertigkeit am Patienten ohne die Möglichkeit, diese zuvor geübt zu haben. In der traditionellen Lehre wurde über ein Mentoren-Modell gelehrt, wobei ein Großteil der praktischen Fertigkeiten direkt am Patienten oder im Operationssaal erworben wurde.

Diese Hürde bzw. das damit verbundene Risiko wurde in den vergangenen Jahren kleiner, als mit dem Einzug von Simulatoren in die medizinische Ausbildung praktische Fertigkeiten, der Umgang mit technischen Hilfsmitteln sowie allgemeine und spezielle Operationsmethoden vermittelt werden konnten.

In dieser Arbeit geht es um das Erlernen einer motorischen Fertigkeit, welche einer weiteren Schwierigkeit unterliegt. Fertigkeiten im medizinischen Alltag liegen meist dynamische Bewegungen zugrunde, die dem Ausführenden durch meist visuelles, aber auch akustisches oder taktiles Feedback eine Auskunft über Erfolg oder Misserfolg geben und gegebenenfalls zu einer Korrektur der Ausführung führen können. Wie beispielsweise das Legen einer peripheren Venenkanüle: das Füllen der Kanüle (visuell), der Widerstand im Gewebe (taktil) und eventuell das Schmerzempfinden des Patienten (akustisch) geben Feedback über eine gelungene Anlage der Verweilkanüle. Bei einer isometrischen Kraftapplikation, wie beispielsweise dem Zug an der Saugglocke bei der Entwicklung des Kindes, gibt es kein extrinsisches Feedback, das dem Arzt Auskunft über die Stärke der Kraftaufwendung geben kann.

Im Jahr 2014 wurden 40 160 aller Kinder mittels Vakuumextraktion entbunden, dies entspricht einem Anteil von 5,7% aller Entbindungen im Jahr 2014 in Deutschland (Statista, 2016). Die Indikation zu einer Vakuumextraktion ist eine kindliche Notsituation (z.B. Bradykardie), welche eine sofortige Entbindung erfordert. Zu leichtes Ziehen kann dabei die

Geburt noch weiter verzögern. Zu starkes Ziehen hinterlässt möglicherweise irreparable Schäden am Kind oder Geburtsverletzungen bei der Mutter. Ohne extrinsisches Feedback obliegt die Dosierung einer isometrischen Kraft der Einschätzung der ausführenden Person, welche durch persönliche Erfahrung angeeignet wurde.

In einer prospektiven Studie von Vacca (2006) am Royal Brisbane and Women's Hospital in Herston, Australien, wurde die Zugkraft an einer Vakuumentractionspumpe (OmniCup®) an 119 erstgebärenden Frauen untersucht, wobei eine vaginale operative Entbindung mittels Vakuumentraction durchgeführt wurde. Die zur Etablierung einer praktischen Guideline durchgeführte Studie lieferte Erkenntnisse über die tatsächliche Zugkraft am kindlichen Kopf sowie Erkenntnisse über das klinische Outcome des Kindes und der Mutter. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer Zugkraft von 11,5 kg, das entspricht 115 N, 80% der Vakuumentractionen erfolgreich durchgeführt werden können. Zudem sprechen die erhobenen Daten dafür, dass alle Vakuumentractionen mit einer Maximalkraft von 13,5 kg (135 N) erfolgreich beendet werden können, dies jedoch mit einem erhöhten Risiko einer maternalen Beckenbodenverletzung oder einer kindlichen Kopfverletzung einhergeht (Vacca, 2006). Diese Studie zeigt, dass eine richtig dosierte Kraft im klinischen Alltag von großer Bedeutung ist.

Um isometrische Kraft messbar und somit dosierbar zu machen, kann sie einem künstlichen, extrinsischen Feedback unterlegt werden, wie es an Simulatoren geschehen kann. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Studie mit 37 Probanden über einen Zeitraum von 3 Tagen untersucht, inwiefern es möglich ist, eine isometrische Kraft durch eine Simulation zu erlernen. Ziel der Untersuchung war es, eine isometrische Kraft von 80 N zu erlernen und diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu reproduzieren. Dabei wurde sowohl der kurzzeitige als auch der langfristige Lernerfolg beachtet.

Da extrinsisches Feedback auf verschiedene Weisen dargeboten werden kann, wurden die Probanden in eine visuelle und eine auditive Feedbackgruppe aufgeteilt, um eventuelle Unterschiede zwischen den Feedbackformen zu erörtern. Zudem kann sowohl visuelles als auch auditives Feedback in unterschiedlicher Weise dargeboten werden. Zum einen als permanente (=concurrent) Darbietung der aktuellen Kraftaufwendung, wie z.B. einem visuellen Balken, der die Kraftaufwendung über die gesamte Dauer der Messung widerspiegelt oder in Form eines Signals, sobald die Zielkraft erreicht ist (=terminal). Der Unterschied besteht im Fokus der Aufmerksamkeit und es wird untersucht, ob und welche

Feedbackformen am geeignetsten für den Lernerfolg erscheinen. Folgende Fragestellungen werden untersucht:

Frage 1:

Zeigt sich ein genereller Lernerfolg beim Erlernen einer isometrischen Kraft mittels Simulation über die Versuchstage?

Frage 2:

Zeigt sich eine bestimmte Feedbackform (visuell vs. auditiv, concurrent vs. terminal) vorteilhaft beim Erlernen einer isometrischen Kraft?

Frage 3:

Welche Kurzzeiteffekte beim Erlernen einer isometrischen Kraft zeigen sich und gibt es Unterschiede zwischen den in Fragestellung 2 genannten unterschiedlichen Feedbackformen?

Frage 4:

Gibt es Zusammenhänge zwischen den Trainingszeiten der einzelnen Feedbackformen und dem Lernerfolg?

Frage 5:

Zeigt sich nach 6 Monaten ein Langzeit-Lernerfolg und zeigt sich eine bestimmte Feedbackform vorteilhaft in der Konsolidierung des Erlernten?

2 Theorie

2.1 Motorisches Lernen

2.1.1 Definitionen

Verschiedene Fachrichtungen haben verschiedene Definitionen und Erklärungen zu motorischem Lernen.

Als eine „fachkundige, geschickte, schnelle und genaue Durchführung einer Bewegung, die nur nach längerem Training zu erwerben ist“, beschrieb Welford (Welford, 1968) eine Fertigkeit.

Als Voraussetzung für das Erlernen einer Fertigkeit fordert der Psychologe Pear (1927) die Geschicklichkeit eines Einzelnen, die wiederum von Leistungsfähigkeit (capacity) und Talent (ability) abhängig ist. Er bezeichnet die Fertigkeit als eine Integration von hochabgestimmten Leistungen. Durch eine Optimierung von Koordination und Kontrolle verschiedener Variablen werden motorische Fähigkeiten erworben (Fowler und Turvey, 1978). Bernstein (1967) bezeichnet Koordination als einen Vorgang, die vielzähligen und offenen räumlichen und zeitlichen Möglichkeiten einer Bewegung einzuschränken und damit kontrollieren zu können.

Nach erfolgreichem Lernen können die Bewegungen ohne Inanspruchnahme der Aufmerksamkeit mit Leichtigkeit, d.h. automatisiert, ausgeführt werden. Dieser Erwerb von Fertigkeiten zeigt, dass das menschliche Gehirn Neues erlernen kann und somit veränderbar, d.h. plastisch, ist. Schmidt (1976) hat die Hypothese formuliert, dass das motorische Lernen aus einer Reihe von Vorgängen besteht, die mit Übung oder Erfahrung zu permanenten Veränderungen im Verhalten führen. Dabei wird jeweils ein übergeordnetes, generalisiertes motorisches Programm etabliert, das situationsabhängig für unterschiedliche Variationen der Bewegung herangezogen werden kann.

Nach Fitts (1964) werden beim motorischen Lernen drei Phasen unterschieden (siehe Tabelle 1). Phase eins beinhaltet die Erfassung der Kriterien der motorischen Aufgabe, in Phase zwei wird die beste Strategie festgelegt und der Bewegungsablauf optimiert, um zuletzt in Phase drei die erlernte motorische Aufgabe automatisiert wiederzugeben.

Tabelle 1: Lernstadien nach Fitts (1964).

Lernstadium	Merkmale	Aufmerksamkeit
Kognitiv (verbal)	Bewegungen sind langsam, unbeständig und ineffizient. Erhebliche kognitive Aktivität erforderlich.	Bewegung wird weitgehend bewusst kontrolliert
Assoziativ	Bewegungen sind flüssiger, sicherer und effizienter. Weniger kognitive Aktivität erforderlich.	Einige Bewegungsanteile werden bewusst kontrolliert, andere sind bereits automatisiert.
Autonom (motorisch)	Bewegungen sind genau, beständig und effizient. Weniger oder keine kognitive Aktivität erforderlich.	Bewegungsablauf ist weitgehend automatisiert.

2.1.2 Neuroanatomie

Der Motorcortex, auch motorische bzw. somatomotorische Rinde, ist ein histologisch abgrenzbarer Bereich der Großhirnrinde (Neocortex) und das funktionelle System, von dem aus willkürliche Bewegungen gesteuert und aus einfachen Bewegungsmustern komplexe Abfolgen zusammengestellt werden. Er bildet die übergeordnete Steuereinheit des Pyramidalen Systems und liegt in den hinteren (posterioren) Zonen des Frontallappens (Trepel, 2015).

Die übergeordnete Steuereinheit für die Ausführung einer Bewegung ist der Motorcortex. Er lässt sich histologisch der Großhirnrinde zuordnen und liegt im hinteren Bereich des Frontallappens. Als funktionelles System erhält er Informationen aus verschiedenen Bereichen des Gehirns, um Bewegungen zielgerichtet und koordiniert auszuführen. Dabei spielen die Basalganglien eine Rolle in der Steuerung des Muskeltonus; für die koordinative Eingliederung der benötigten Kraft und für die Genauigkeit der ausgeführten Bewegung ist das Kleinhirn zuständig (Trepel, 2015).

Den motorischen Zentren des ZNS obliegen dabei die Einleitung und Durchführung von Bewegungen, sind aber von sowohl kortikalen als auch subkortikalen Strukturen abhängig, die in parallel ablaufenden Systemen Informationen auswerten und die Bewegung beeinflussen. Dabei spielt sowohl die Haltung als auch das durch die Bewegung ausgelöste Ungleichgewicht eine Rolle, um eine Bewegung korrekt auszuführen. Man unterscheidet hierbei, obwohl funktionell eng miteinander verbunden, die Stütz- oder Haltemotorik von der Zielmotorik. Die Stützmotorik und die Koordination der Zielmotorik werden überwiegend von Strukturen des Hirnstamms und Kleinhirns kontrolliert, wobei für die Zielbewegung höhere Zentren erforderlich sind (Trepel, 2015).

Nach Hikosaka lassen sich verschiedene Ebenen motorischer Funktionen unterscheiden (Hikosaka, 2002). Die erste Ebene führt angeborene Bewegungen aus, die zweite Ebene generiert hochautomatisierte Bewegungen, die durch längere Übung erworben wurden. Die dritte Ebene ist für neue, nicht gelernte Bewegungen mit bewusster Aufmerksamkeit oder bewusst ausgeführten Bewegungen zuständig.

Mithilfe von Untersuchungen mittels PET, fMRT, EEG, Tiefenelektroden und transcranieller Magnetstimulation lassen sich Erkenntnisse über neuroanatomische Korrelate des motorischen Lernens erkennen. Dabei zeigt sich, dass korrespondierend zwischen verschiedenen Phasen und Ebenen des motorischen Lernens auch verschiedene Hirnareale aktiviert werden:

Rostral des primärmotorischen Areals finden sich verschiedene funktionelle Zonen, die als prämotorischer Kortex zusammengefasst werden können. Besonders interessant ist dabei das supplementärmotorische Areal (SMA), welches am motorischen Lernen und der Feedbacküberwachung sowie der Selektion, Vorbereitung, Initiation und Ausführung einer Bewegung beteiligt ist (Hikosaka et al., 1999). Das SMA konnte mit dem Bereitschaftspotential in Verbindung gebracht werden, welches frühzeitig der Aktivierung des primärmotorischen Areals vorangeht (Richter et al., 1997) und mit der motorischen Planung in Verbindung gebracht wird. Das SMA kann nochmals in das PräSMA und SMA proper unterteilt werden (Rizzolatti et al., 1996). In den Anfangsstadien der Planung und des motorischen Lernens scheint das PräSMA bei der Selektion und Präparation eines motorischen Programms involviert zu sein (Nakamura et al. 1998, Lee et al., 1999). Auch komplexe Bewegungen sowie intern getriggerte Bewegungen werden diesem Areal zugeschrieben (Boecker, 1998; Deiber et al., 1999). Im späteren Fortschritt des Lernens sowie

während der Durchführung einer Bewegung ist dann das SMA proper an der Initiation und gemeinsam mit dem primärmotorischen Kortex an der Ausführung des motorischen Programms beteiligt (Lee et al., 1999).

Für das Zusammenspiel von visuellen Reizen und einer körperzentrierten Koordination ist der posteriore parietale Cortex von Bedeutung (Seitz et al., 1997).

Während der Bewegungsdurchführung ist, wie zu erwarten, der primärmotorische Cortex stark aktiviert, in der Bewegungsplanung zeigt sich nur sehr wenig Aktivierung (Richter et al., 1997).

In einer frühen Phase des motorischen Lernens zeigt sich ein schneller Lernerfolg. In einer späten Phase, die mit einer Konsolidierung des Erlernten einhergeht, hält der Lernerfolg über mehrere Stunden (mindestens 6-8 h) an (Karni et al., 1998). Nach Karni (1998) entspricht diese Konsolidierungsphase der Zeit, die für neuronale Prozesse benötigt wird, kortikale Veränderungen mit sich bringt und die langfristig für eine Struktur und Verhaltensänderung sorgen. In dieser Zeit vollzieht sich auch ein „shift“ der Aktivierung vom präfrontalen motorischen Cortex zum prämotorischen Cortex, posterior parietalen Cortex und cerebellären Abschnitten des Cortex (Shadmehr und Holcomb, 1997). Vermutlich ist dieser shift für die langfristige Stabilität eines motorischen Programms verantwortlich.

Rioul-Pedotti et al. (2000) konnten an Ratten zeigen, dass die langfristige Potenzierung die neuronale Basis für motorisches Lernen darstellt. Beim Menschen konnte nachgewiesen werden, dass es nach vier Wochen täglichen Trainings zu einer Verbreiterung des Handareals im primärmotorischen Kortex kam (Karni et al., 1997), die auf einer Langzeitpotenzierung und einer Zunahme der Synapsen beruht (Kleim et al., 2002).

Auch die Basalganglien spielen eine entscheidende Rolle beim Erlernen einer motorischen Bewegung. Dabei sind sie in sogenannte basalganglien-thalamocorticale Schleifen eingliedert, die die Basalganglien mit dem motorischen Cortex, dem oculomotorischen Cortex, dem präfrontalen Cortex und dem limbischen System verbinden (Alexander und Crutcher, 1990). Mindestens vier verschiedene Schleifen konnten dabei identifiziert werden. Beispielsweise werden visomotorische Aufgaben über die präfrontale Schleife schneller erlernt als über die motorische Schleife. Sobald eine sequentielle Bewegung erlernt ist, kann sie demgegenüber aber schneller und verlässlicher über die motorische Schleife ausgeführt werden (Nakahara et al., 2001). Für die Automatisierung der Bewegung spielt die schrittweise

Neuordnung im Striatum eine Rolle, die zur Einschränkung der Freiheitsgrade führt (Graybiel, 1998). Zudem scheint die Zerteilung der Informationen durch die Basalganglien in sogenannte „chunks of information“ ein Mechanismus zu sein, der es ermöglicht, die Fülle an Informationen adäquat zu verarbeiten (Miller, 1956).

Das Cerebellum hat während des motorischen Lernens eine wichtige Funktion bei der Einschätzung der Zeitdauer und der Geschwindigkeit einer Bewegung. Trotzdem sind die Ergebnisse zur cerebellären Aktivierung in den Phasen des motorischen Lernens widersprüchlich. Vermutlich ist es hauptsächlich so lange aktiv, bis die Möglichkeiten einer zu planenden Bewegung soweit eingeschränkt sind, dass es keiner Überwachung mehr bedarf und somit automatisiert ablaufen kann. Es ist daher anzunehmen, dass es in frühen Stadien des Lernens stark involviert ist, aber nicht für eine Speicherung eines Bewegungsprogramms verantwortlich ist. Falls jedoch erneut vermehrt Feedback bei einer bereits automatisierten Bewegung benutzt wird, wird es erneut aktiviert. Ein großer Unterschied lässt sich jedoch zwischen Basalganglien und Cerebellum im Hinblick auf motorisches Lernen erkennen. Das Cerebellum verarbeitet im Gegensatz zu den Basalganglien sensorische Informationen, um das Ergebnis der Bewegung zu kontrollieren (Jueptner und Weiller, 1998).

2.1.3 Prozedurales Gedächtnis

Nach heutiger Auffassung in der Neuropsychologie wird beim Erlernen, aber auch beim Ausführen motorischer Fertigkeiten das prozedurale Gedächtnis von dem deklarativen Gedächtnis unterschieden. Das prozedurale Gedächtnis speichert automatisierte Bewegungsabläufe, das deklarative Gedächtnis hingegen ist für das Erlernen von Zahlen, Fakten, Ereignissen und abstrakten Begriffen zuständig (Squire, 1982). Gleichmaßen kann auch in ein implizites und ein explizites Gedächtnis unterschieden werden (Tulving, 1991). Das implizite Gedächtnis memoriert dabei unbewusste Fertigkeiten, wie beispielsweise den aufrechten Gang oder das Zähneputzen, das explizite Gedächtnis memoriert beispielsweise geschichtliche Daten oder Namen und erlaubt uns diese wiederzugeben. Diese Unterscheidung basiert auf klinischen Beobachtungen bei lokalen Hirnschäden im Frontobasalthirn und im Hippocampus, welche zwar eine amnestische Störung zur Folge haben, jedoch die motorischen Fähigkeiten nicht beeinträchtigen (Damasio et al., 1985). Von Bartus et al. (1982) und Graff-Radford et al. (1990) werden amnestische Störungen bei

erhaltener Motorik auch bei Läsionen im Zwischenhirn, im Nucleus basalis Meynert und im mediodorsalen Thalamus beschrieben.

Den größten Teil der motorischen Fertigkeiten erwirbt der Mensch in den ersten vier Lebensjahren (Lederman et al., 1987). Dabei ließen sich Grundprinzipien definieren, welche aus verhaltenspsychologischen, aber auch tierexperimentellen Studien ermittelt werden konnten. Zum einen werden motorische Fertigkeiten durch Übung erworben, während einer erneuten Bewegungsausführung kann diese erlernte Fertigkeit aus dem prozeduralen Gedächtnis abgerufen werden. Da dieser Erwerb nur unter der Ausführung einer Bewegung stattfinden kann, sind der primäre motorische Kortex und prämotorische Areale involviert (Squire et al., 1986). Subkortikale Strukturen wie das Kleinhirn sind von besonderer Bedeutung, wie tierexperimentelle Studien zum vestibulookulären Reflex und dem Lidschlussreflex zeigen konnten (Lisberger et al., 1988; Thompson et al., 1986). Das prozedurale Gedächtnis ist dabei unabhängig von Hippocampusstrukturen und jeweils definiert für eine Aufgabe (Eichenbaum et al., 1992). Zudem umfasst das Erlernen einer Fertigkeit auch eine Erkennungsphase, in welcher erkannt werden muss, was und wie etwas erlernt wird (Brooks et al., 1990). Als abgeschlossen kann das Erlernen einer Fertigkeit bezeichnet werden, wenn die Bewegung ohne gerichtete Aufmerksamkeit und mit hoher Geschwindigkeit ausgeführt werden kann (Kihlstorm et al., 1987).

2.2 Feedback

Über periphere Organe, wie Muskelspindel oder Kapselrezeptoren, sowie über Hautrezeptoren, das Sehen und Hören können Informationen an den Cortex geleitet und zur Kontrolle der Bewegung analysiert werden. Adams beschrieb dieses Kontrollprinzip als „closed-loop“ (Adams, 1971), wobei dieser Feedbackregelkreis die tatsächliche mit der geplanten Bewegung permanent vergleicht und bei Bedarf korrigiert. Bei neuen oder ungelerten Bewegungen ist dieser Regelkreis hochaktiv, die Bewegungen noch langsam und nicht automatisiert.

Das Ziel heutiger Forschung ist die Verbesserung des motorischen Lernens durch eine Optimierung des Feedbacks. Es ist beispielsweise ein Unterschied, ob eine Bewegung durch einen Trainer vorgeführt oder ob der Lernende von dem Trainer durch die Bewegung geführt wird und ob technische Hilfsmittel wie Töne, Displays oder Simulatoren verwendet werden.

Zudem spielt es eine Rolle, ob Instruktionen vor der Bewegung gegeben werden oder die Instruktion zeitgleich während einer Bewegung stattfindet. Feedback kann während einer Bewegung (concurrent) oder nach bzw. am Ende einer Bewegung (terminal) gegeben werden.

Extrinsisches Feedback ist definiert als eine von einer externen Quelle ausgehende Information, die nicht ohne diese erzeugt werden kann (Schmidt & Wrisberg, 2008; Utley & Astill, 2008). Feedback hat zum Ziel, einer Person von einer individuellen zu einer erwünschten Bewegung zu verhelfen. Instruktionen dienen einer Hervorhebung von Teilaspekten einer Bewegung oder dazu, die Aufmerksamkeit auf einen Teilaspekt zu richten (Schmidt & Wrisberg, 2008; Wulf & Shea, 2002). Bei intrinsischem Feedback werden sensorische Informationen während jeder Bewegung an das Gehirn weitergeleitet. Dabei ist die taktile Sensorik der Haut (wie Druck und Vibration) genau wie die Propriozeption (die Stellung der Gelenke und der Extremitäten mit Hilfe von Sensoren in den Muskeln und Sehnen) involviert (O'Malley & Gupta, 2008).

Wulf und Shea (2002) machten einen Unterschied zwischen schwierigen und leichten motorischen Aufgaben. Dabei beschrieben sie Bewegungen als einfach, wenn diese sich innerhalb einer Trainingssession erlernen lassen, sie nur einen Freiheitsgrad besitzen und künstlich erscheinen. Eine Bewegung ist demnach schwierig, wenn sie mehrere Trainings erfordert, mehrere Freiheitsgrade besitzt und einen annähernd realistischen Bezug hat.

2.2.1 The guidance hypothesis

Concurrent Feedback kann in der Aneignungsphase von Nutzen sein, es zeigte sich jedoch, dass es nachteilig bei der späteren Reproduktion der Aufgabe sein kann. Die guidance hypothesis besagt, dass permanentes Feedback während des Erlernens einer Bewegung zu einer Abhängigkeit von dieser Feedbackform führt (Salmoni, 1984; Schmidt, 1991; Schmidt, Young, Swinnen & Shapiro, 1989). Dabei kann es passieren, dass das intrinsische Feedback wie die Propriozeption ignoriert wird. Diverse Studien über die Erlernbarkeit einer einfachen motorischen Aufgabe mit entweder concurrentem oder terminalem Feedback unterstützen diese Theorie (Schmidt & Wulf, 1997; Van der Linden, Cauraugh & Green, 1993; Winstein et al., 1996). Unterstützt wird die guidance hypothesis von der specificity-of-learning hypothesis, die besagt, dass für das Lernen immer die optimalste afferente Information herangezogen wird und diese dabei andere Informationsquellen überschattet (Proteau, 1992). Die optimale

Informationsquelle sollte auch für das Feedback bei motorischem Lernen herangezogen werden. In diversen Studien konnte diese Hypothese unterstützt werden (Proteau, 2005; Proteau & Isabelle, 2002; Robin, Toussaint, Blandin & Proteau, 2005; Bernier et al, 2005; Blandin, Toussaint & Shea, 2008).

Eine interessante Studie in Hinblick auf eine isometrische Kraft wurde 2009 von Ranganathan und Newell durchgeführt (Ranganathan und Newell, 2009). Auch hier zeigte sich eine Adaption an das concurrente Feedback. Bei einem später durchgeführten Wiederholungstest unterlagen sie den Gruppen mit terminalem Feedback in der Trainingsphase. Die Autoren untersuchten den Einfluss verschiedener Feedbackformen auf Koordinationsstrategien, indem die Probanden erlernen sollten, mit zwei Fingern eine definierte Kraft von 10 N zu produzieren. Dabei unterteilten sie die Probanden zunächst in zwei Feedbackgruppen: eine Gruppe erhielt als Feedback ein „knowledge of result“ (KR), das heißt das Ergebnis jeder Kraftapplikation wurde nach jedem Versuch mitgeteilt; die zweite Gruppe bekam concurrentes Feedback (ConFB) in Form eines visuell sichtbar gemachten Balkens. Die zwei Feedbackgruppen wurden jeweils nochmal unterteilt: ConFB, ConFB mit KR, KR 100% und KR 50% (Total n=24). Diese Studie ergab, dass die ConFB-Gruppen während des Trainings weniger Fehler machten, dafür im Wiederholungstest (nach 2 min und 24 h) die größte Fehlerquote hatten. Die Autoren vermuten eine permanente Strategieänderung der ConFB-Gruppe in der Trainingsphase mit jeweils dem gleichen Ziel (10 N) als Ursache hinter dem schlechteren Abschneiden gegenüber den KR Gruppen, die zwar eine Strategie mit einer höheren Fehlerquote anwendeten, diese dafür konstant angewendet wurde.

Ähnliche Studien wurden zuvor von Van der Linden et al. (Van der Linden, Cauraugh, & Greene, 1993) durchgeführt, die auch zu dem Ergebnis kamen, dass KR-Gruppen bessere Ergebnisse in Wiederholungstests gegenüber ConFB Gruppen erzielten.

Alle oben erwähnten Studien unterstützen die guidance hypothesis.

Lavery (1962) konnte zeigen, dass Gruppen, die schon während der Trainingsphase über einen späteren Wiederholungstest informiert waren, bessere Ergebnisse in den Wiederholungstests erzielten als Gruppen, die darüber nicht informiert waren (Lavery, 1962).

Damit schnell eine zielgerichtete und korrekt ausgeführte Bewegung entstehen kann, wird diese durch permanente (z.B. visuelle) Informationen kontrolliert. Im Gegensatz dazu würde eine sich langsam entwickelnde Bewegung ohne concurrentes Feedback zu einer motorischen

Kontrolle führen, die unabhängig von äußeren Informationen ist (Kovacs, Boyle, Grutmatcher & Shea, 2010).

Hier muss jedoch wieder ein Unterschied zwischen schwierigen und einfachen Bewegungen gemacht werden. Je komplexer die Bewegung ist, desto eher kann man von einem concurrenten Feedback profitieren. So kann ein externer Aufmerksamkeitsfokus förderlich für die Erlernbarkeit einer Bewegung sein, da Automatismen in die Bewegungskontrolle einfließen (Wulf, 2007).

Concurrentes Feedback wird deshalb als ein effektives Instrument in der frühen Lernphase angesehen (Liebermann et al., 2002). Um eine dauerhafte interne Bewegungsrepräsentation zu gewährleisten, sollten auch Bewegungen ohne Feedback durchgeführt werden (Crowell & Davis, 2011; Kovacs & Shea, 2011). Mit zunehmendem Können kann also von concurrentem oder hochfrequentem Feedback abgesehen und zu einem niederfrequenten Feedback übergegangen werden (Wulf und Shea, 2002; Crowell und Davis, 2011; Kovacs & Shea 2011).

Studien zeigten zudem eine bessere Erlernbarkeit, wenn der Zeitpunkt des Feedbacks selbst bestimmt wird und nicht vorbestimmt ist (Janelle, Kim & Singer, 1995; Chiviawsky & Wulf, 2002, 2005). Der Grund dafür besteht wohl in der erhöhten Motivation bei selbstbestimmtem Feedback nach gelungenen Versuchen (Chiviawsky & Wulf, 2007).

2.2.2 Visuelles Feedback

Die natürlicherweise am häufigsten verwendete Feedbackform ist das visuelle Feedback, da sie auch im Alltag als sehr dominant im Vergleich zu auditiven oder haptischen Feedbackformen erscheint. Dass visuelles Feedback gegenüber auditivem Feedback präzisere räumliche Informationen vermitteln kann, wurde bereits früh in diversen Studien postuliert (Freides, 1974; Welch & Warren, 1980). Gemessen am spinalen Informationsfluss dominiert das visuelle Feedback die anderen Feedbackformen (Nesbitt, 2003). Auch hier muss zwischen einfachen und komplexen Bewegungen unterschieden werden. Untersuchungen von Schmidt und Wulf (1997) zeigten, dass eine einfache Bewegung schneller durch visuelles Feedback aquiriert werden kann, in einem zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführten Wiederholungstest unterlag die visuelle Gruppe jedoch der Kontrollgruppe (no-feedback).

Auch Untersuchungen mit einer isometrischen Kraftapplikation führten zu diesem Ergebnis (Ranganathan & Newell, 2009; Van der Linden et al., 1993). Beispielsweise bestand die Aufgabe in der Untersuchung von Ranganathan & Newell in einer leichten Kraftapplikation von 10 N mit beiden Zeigefingern auf einer Messvorrichtung. Nach einer Übungsphase wurde 24h später ein Wiederholungstest ohne Feedback durchgeführt. Dabei zeigte die Gruppe, welche permanentes visuelles Feedback in der Lernphase zu Verfügung hatte, die schlechtesten Ergebnisse im Wiederholungstest ohne Feedback. Die Vergleichsgruppe, die in der Übungsphase lediglich am Ende jeder Kraftapplikation ein Ergebnis präsentiert bekam, zeigte bessere Ergebnisse im Wiederholungstest. Eine Erklärung dazu liefert Park, welcher eine Abhängigkeit von einem extrinsischen Feedback in der Lernphase als Hindernis für die Ausbildung der „intrinsic error detection and correction capabilities“ sieht (Park et al., 2000). Diese Erkenntnisse können wiederum mit der guidance hypothesis erklärt werden. Eine interessante Studie von Robin zeigte, dass ein schlechtes visuelles Feedback (schlechter Kontrast auf dem Bildschirm) dazu führte, dass ein besseres Ergebnis im Wiederholungstest im Vergleich zu einer Gruppe mit optimalem visuellen Feedback und einer Gruppe ohne Feedback erzielt wurde (Robin et al., 2005). Ein Grund hierfür könnte sein, dass das schlechtere visuelle Feedback zwar benutzt wurde, um die Übung korrekt auszuführen, nicht jedoch die optimale afferente Informationsquelle war und somit ein intrinsisches Feedback zur Entwicklung eines motorischen Programms herangezogen wurde.

Verglichen mit einfachen Bewegungen scheint es, als ob komplexe Bewegungen von permanentem visuellem Feedback profitieren. Vor allem in der frühen Trainingsphase kann ein permanentes visuelles Feedback vor einer kognitiven Überladung schützen (Wulf & Shea, 2002) und zur Entwicklung eines ersten motorischen Programms beisteuern (Todorov et al., 1997).

2.2.3 Auditives Feedback

Im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung im Alltag spielt die auditive Wahrnehmung eine untergeordnete Rolle, die Möglichkeiten und wahre Bedeutung werden jedoch allgemein unterschätzt. Ein Hauptunterschied zwischen visuellem und auditivem Feedback ist der Aufmerksamkeitsfokus. Bei auditivem Feedback wird ein sehr viel geringerer Aufmerksamkeitsfokus benötigt (Secoli, Milot, Rosati & Reinkensmeyer, 2011). Die hohe

Anzahl an Möglichkeiten ein auditives Feedback zu geben, zeigt die Komplexität der Interpretationsmöglichkeiten, die das Gehör bietet. So kann das Gehör im dreidimensionalen Raum Informationen verarbeiten, Frequenzen unterscheiden und Sonifikationsmuster erkennen. Verglichen mit dem Sehsinn, welcher als Transmitter Rhodopsin, eine chemische Substanz, verbraucht und regeneriert, kann das Gehör 20 Signale pro Sekunde unterscheiden und ist dahingehend sehr viel genauer (Hellbrück & Ellermeier, 2004). Das Potential, welches unser Gehör birgt, wird jedoch nur zu einem geringen Teil ausgeschöpft. Verwandte Säuger wie Fledermäuse haben ein dem Menschen anatomisch ähnliches Ohr und können sich trotzdem im dreidimensionalen Raum über akustische Signale orientieren (Griffin, 1958).

Es wurde zudem gezeigt, dass auditives Feedback helfen kann, den Fokus auf die Aufgabe zu halten (Secoli et al., 2011) oder die Aufmerksamkeit auf bestimmte Aspekte einer Bewegung lenken kann (Schaffert et al., 2011).

Es muss auch hier zwischen terminalem und kontinuierlichem Feedback unterschieden werden. Terminales auditives Feedback kann beispielweise ein Ton am erreichten Zielpunkt oder ein Warnton bei nicht korrekt ausgeführten Bewegungen sein.

Im Zusammenhang mit kontinuierlichem auditiven Feedback wird häufig der Begriff Sonifikation verwendet, d.h. eine Bewegungs- oder Kraftänderung resultiert in einer Veränderung der Amplitude oder Frequenz des auditiven Feedbacks.

Es wird vermutet, dass eine Co-Aktivierung von auditiven und motorischen Systemen stattfindet, die auch aktiv ist, wenn nur eines der beiden Systeme aktiviert wird, im Sinne einer audio-motorischen Kopplung (Schmitz et al., 2013; Brown und Palmer, 2012). Diese Co-Aktivierung ist besonders ausgeprägt, wenn die Verbindung zwischen Sonifikation und Bewegung gut gelernt wurde (Zatorre et al., 2007).

In einer komplexen Lotsenaufgabe wurden visuelle, akustische und vibrotaktile Hinweissignale auf deren unterstützenden Effekt untersucht (Weber, 2010). Dabei zeigte sich auditives Feedback den anderen Feedbackformen überlegen. Die Autoren sprechen von einer dualen Kodierung der Informationen mit deutlich besserem Situationsbewusstsein.

2.2.4 Multimodale Feedbackformen

Multimodale Feedbackformen, wie eine Kombination aus visuellem und auditivem Feedback, können beim motorischen Lernen förderlich sein; hauptsächlich bei komplexen motorischen Aufgaben. Die Information sollte dann in einer verständlichen Weise dargeboten werden, um eine Überflutung von Informationen zu vermeiden (Guadagnoli & Lee, 2004).

Es wird vermutet, dass multimodales Feedback Vorteile gegenüber unimodalem Feedback hat, da Informationen besser verarbeitet werden können, wenn verschiedene Modalitäten angeboten werden und jeder Mensch andere kognitive Kanäle zur Verarbeitung dieser benutzt (Burke et al., 2006; Wickens, 2002). Zudem gibt es Studien, die suggerieren, dass multimodales Feedback die Wahrnehmung verbessert (Seitz und Dinse, 2007).

Sigrist und Kollegen (2015) verglichen bei einer komplexen Bewegung visuelles Feedback mit visuell-auditivem Feedback und visuell-vibrotaktilen Feedback. Die Ergebnisse zeigen einen Vorteil der kombinierten Feedbackgruppe visuell-auditiv gegenüber den anderen Feedbackformen.

Demgegenüber kann eine zusätzliche Feedbackmodalität zu einer kognitiven Überladung führen, was den Lernprozess stört oder von intrinsischem Feedback abhält (Sigrist et al., 2013). In dieser Arbeit wurde auf multimodales Feedback verzichtet.

2.3 Aufmerksamkeit und motorisches Lernen

Häufig wird beim anfänglichen Erlernen motorischer Fertigkeiten ein Fokus auf die Bewegungsausführung gelegt. Dies entspricht auch den drei Lernphasen (kognitiv/assoziativ/autonom) nach Fitts und Posner (1967), bei denen die erste Lernphase (kognitiv/verbal) mit einer weitgehend bewussten Kontrolle der Bewegung einhergeht und diese langsam, unbeständig und ineffizient ausgeführt wird (siehe Tabelle 1). Je fortgeschrittener das Lernstadium ist, desto weniger Aufmerksamkeit muss auf die Planung und Ausführung der motorischen Fertigkeit gerichtet werden. Dazu lassen sich Experimente durchführen, die neben der motorischen Fertigkeit auch eine kognitive Aufgabe beinhalten, welche parallel durchgeführt wird. Leavitt (1979) sowie Smith und Chamberlin (1992) konnten bei Sportlern (Eishockey/Fußball) zeigen, dass erfahrene Sportler den unerfahrenen

Sportlern in dieser Transferaufgabe überlegen waren, da sie ihre Aufmerksamkeit nicht auf die Ausführung der motorischen Fertigkeit richten mussten und diese weitgehend automatisch abläuft.

Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass auch in den frühen Lernphasen eine auf die Fertigkeit bezogene Aufmerksamkeit von Nachteil sein kann. Der Sportpsychologe Robert Singer vertrat die Meinung, Anfänger würden schneller automatisierte Bewegungen lernen, indem man sie von der Bewegung ablenke (Singer, 1993). Er bezog sich dabei auf Untersuchungen, wonach Könnler weniger über die Handlungsdetails nachdachten, während sie eine Fertigkeit ausführten (Gallwey, 1982; Garfield & Bennett, 1985). Richard Masters vertrat die Meinung, implizit gelernte Fertigkeiten, d.h. ohne dass die Bewegungen bewusst werden, würden schneller automatisiert und könnten unter Stressbedingungen besser ausgeführt werden (Masters, 1992). Auch wenn Bewegungen bereits erlernt sind, können sie in Stresssituationen nicht immer korrekt und sicher ausgeführt werden. Masters spricht von einer „Hypothese der bewussten Verarbeitung“ (Masters, 2000). Nach Pijpers, Oudejans und Bakker (2005) entspricht dies einem temporären Rückfall in frühere Lernstadien.

Eine Studie zur Körperstabilität zeigte, dass eine bewusste Kontrolle der Körperstabilität zu einer größeren Schwankung der Körperachse führte (Vuillerme & Nafati, 2005). Gabriele Wulf konnte in diversen Studien zeigen, dass ein expliziter Aufmerksamkeitsfokus, der auf dem Bewegungseffekt liegt, vorteilig gegenüber einem impliziten Aufmerksamkeitsfokus ist, der die Aufmerksamkeit auf die Bewegungsausführung richtet (Wulf, Höß & Prinz, 1998; Totsika & Wulf, 2003). Besonders aussagekräftig sind dabei Wiederholungstests, die zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden und den Langzeiteffekt des motorischen Lernens überprüfen. Auch bezogen auf den Aufmerksamkeitsfokus bei visuellem Feedback gibt es Unterschiede, ob der Fokus auf dem Feedback (explizit) oder der motorischen Aufgabe (implizit) liegt. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein expliziter Aufmerksamkeitsfokus auch in Wiederholungstests mit Entzug des visuellen Feedbacks vorteilhaft für das Lernen der motorischen Fertigkeit ist (Shea & Wulf, 1999). Dies deutet darauf hin, dass Feedback einen externen Aufmerksamkeitsfokus induziert, eine bewusste Kontrolle der Bewegung verhindert und somit das motorische Lernen begünstigen kann. Hodges und Franks (2001) bestätigten diese Theorie. Diese Erkenntnisse sind vor allem für motorisches Lernen an Simulatoren von großer Bedeutung (Wulf, 2009). Die aus den Ergebnissen formulierte Constrained-Action-Hypothese von Wulf und Kollegen besagt folgendes: ein interner Fokus auf die Bewegung stellt einen bewussten Eingriff in die

Kontrollprozesse dar und ist hinderlich für das Lernen und Ausführen einer automatisierten Bewegung. Ein externer Fokus dagegen, d.h. ein Fokus auf den Bewegungseffekt, ist förderlich, da nicht in automatisierte Kontrollvorgänge eingegriffen wird (McNevin, Shea & Wulf, 2003).

Im Hinblick auf eine effiziente und ökonomische Bewegung untersuchten Vance et al. (2004) die EMG-Aktivität von Bizeps-Curl-Bewegungen an Bizeps und Trizeps unter jeweils einem externen und internen Aufmerksamkeitsfokus. Dabei wurde unter einem externen Aufmerksamkeitsfokus eine geringere EMG-Aktivität gemessen, was für eine effizientere Nutzung von motorischen Einheiten während der (jeweils identischen) Bewegungsausführung spricht.

2.4 Aktuelle Studien in der angewandten Simulatorforschung

Viele der bisherigen Studien zu motorischem Lernen und Lernen von Fertigkeiten im medizinischen Bereich basieren auf Untersuchungen an Simulatoren hauptsächlich im Bereich der minimal invasiven Chirurgie. Häufig werden dabei messbare Parameter wie die Zeit bis zum Beenden einer chirurgischen Aufgabe oder die Fehlerquote im Testsetting herangezogen und zwischen einer Testgruppe am Simulator und einer Kontrollgruppe verglichen. In einer 2002 durchgeführten Studie zur Performance an einem virtual-reality (VR) Simulator zeigten sich signifikante Verbesserungen der Trainingsgruppe am Simulator gegenüber der Kontrollgruppe (Wilhelm et al., 2002). Es zeigte sich jedoch auch, dass es keinen Unterschied zwischen traditionellen Skill-Trainern (Box Training) und VR Simulatoren gibt (Botden et al., 2008). Zudem wurde gezeigt, dass sich Fertigkeiten, die am Simulator erlernt wurden, auch in einer realistischen Umgebung anwenden lassen und zu Verbesserungen führen (Verdaasdonk et al., 2008). Ein aktuelles Review von Dehabadi aus 68 relevanten Artikeln zum Nutzen von Simulatoren bezogen auf laparoskopische Nähfertigkeiten kommt zu dem Ergebnis, dass sich das Lernen an Simulatoren als sinnvolle und effektive Methode zur Aneignung von laparoskopischen Fertigkeiten erweist. Auch hier wird von einer positiven Auswirkung auf die Fähigkeiten im Operationsraum berichtet (Dehabadi et al., 2014).

2.5 Zusammenfassung und Fragestellung

Frage 1:

In einer prospektiven Studie am Royal Brisbane and Women's Hospital in Herston, Australien (Vacca, 2006), wurde die Zugkraft an einer Vakuumentractionspumpe (OmniCup®) an 119 Erstgebärenden untersucht, wobei eine vaginale operative Entbindung mittels Vakuumentraktion (VE) durchgeführt wurde. Die zur Etablierung einer praktischen Guideline durchgeführte Studie liefert Erkenntnisse über die tatsächliche Zugkraft am kindlichen Kopf sowie Erkenntnisse über das klinische Outcome des Kindes und der Mutter. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer Zugkraft von 11,5 kg, das entspricht 115 N, 80% der VEs erfolgreich durchgeführt werden können. Zudem sprechen die erhobenen Daten dafür, dass alle VEs mit einer Maximalkraft von 13,5 kg (135 N) erfolgreich beendet werden können, dies jedoch mit einem erhöhten Risiko einer maternalen Beckenbodenverletzung oder einer kindlichen Kopfverletzung einhergeht (Vacca, 2006). Diese Studie zeigt, dass richtig dosierte Kraft im klinischen Alltag von großer Bedeutung ist und führt zur ersten Fragestellung dieser Arbeit:

Zeigt sich ein genereller Lernerfolg beim Erlernen einer isometrischen Kraft mittels Simulation über die Versuchstage?

Frage 2:

Im Alltag werden Bewegungen hauptsächlich über ein visuelles Feedback kontrolliert. Eine isometrische Kraft erzeugt jedoch weder visuelles noch auditives Feedback, weshalb in dieser Arbeit ein extrinsisches Feedback durch den Simulator erzeugt wird. Eine Studie mittels EEG zur Evaluation von Hirnaktivitäten bei visuellem, auditivem und vibrotakilem Feedback zeigt sehr deutlich, dass unser Gehirn unterschiedliche Feedbackmodalitäten auf unterschiedliche Weise verarbeitet (Lopez-Larraz, 2011). Dies führt zu der zweiten Fragestellung:

Zeigt sich eine bestimmte Feedbackform (visuell oder auditiv, concurrent oder terminal) vorteilhaft beim Erlernen einer isometrischen Kraft?

Frage 3:

Wie bereits in o.g. Abschnitt erwähnt, sprechen Karni et al. von einer Konsolidierung des motorischen Lernerfolgs nach 6-8 Stunden, welche für neuronale Prozesse benötigt wird und kortikale Veränderungen mit sich bringt, um eine langfristige Stabilität eines motorischen Programms zu gewährleisten (Karni et al., 1998). Dies ist in Fragestellung 1 von Bedeutung. Karni spricht jedoch auch von einer frühen Phase des motorischen Lernens, in der sich ein schneller Lernerfolg zeigt. Dies führt zur dritten Fragestellung dieser Arbeit:

Welche Kurzzeiteffekte beim Erlernen einer isometrischen Kraft zeigen sich und gibt es dabei Unterschiede zwischen den in Fragestellung 2 genannten unterschiedlichen Feedbackformen?

Frage 4:

Im Laufe der Versuche zeigte sich ein subjektiver Unterschied zwischen den Trainingszeiten der unterschiedlichen Feedbackformen. Die Analyse der Trainingszeiten bestätigt diese Einschätzung. Möglicherweise kann die Trainingszeit als Schwierigkeitsparameter eingestuft werden, welcher Effekte auf den Lernerfolg haben kann.

Gibt es Zusammenhänge zwischen den Trainingszeiten der einzelnen Feedbackformen und dem Lernerfolg?

Frage 5:

Ein halbes Jahr nach der Versuchsreihe konnten einige Probanden für einen erneuten Wiederholungstest rekrutiert werden. Zeigt sich ein Langzeit-Lernerfolg bzw. zeigt sich eine bestimmte Feedbackform vorteilhaft in der Konsolidierung des Erlernenen?

3 Material und Methoden

Im Folgenden soll ein Überblick über die Stichprobe, die Apparatur und das Versuchsmaterial, den Versuchsablauf sowie das Untersuchungsdesign gegeben werden. Einen Übergang zu den Ergebnissen stellen der Datenaufbereitungsteil sowie die Beschreibung durchgeführter Analysen dar.

3.1 Stichprobe

Die Stichprobe der vorliegenden Studie besteht aus 40 sowohl männlichen als auch weiblichen Versuchspersonen ($M = 26,89$ Jahre; $SD = 9,96$), die an der Technischen Universität München sowie deren Umfeld rekrutiert wurden. Die Probanden wurden vor Ort über den Ablauf und die Ziele der Studie informiert. Für die Teilnahme an der Untersuchung, die in etwa 20 Minuten pro Versuchstag in Anspruch nahm und der Freiwilligkeit unterlag, erhielten sie eine kleine Aufwandsentschädigung.

3.2 Material

3.2.1 Stimuli

Die Stimuli der Aufgabe bestanden aus vier verschiedenen Feedback-Arten. Unterschieden wurde in der vorliegenden Studie sowohl zwischen visuellen und auditiven Stimuli als auch zusätzlich zwischen concurrent und terminal Feedback.

3.2.1.1 Visuelles Feedback:

Visuell_concurrent:

In der zweiten visuellen Bedingung Visuell_concurrent wurde ein Balken auf dem Bildschirm gezeigt, der die Kraft permanent visualisiert und in welchem der Zielbereich durch ein rotes Feld markiert wurde (siehe Abbildung 2). Das rote Feld hatte in der Mitte einen roten Strich, welcher die Kraft von 80 N markierte. Zusätzlich gab es einen Farbumschlag des Kraftbalkens von blau ($<76N$ sowie $>84N$) auf rot (80 Newton, ± 4 Newton Toleranz) im

Zielbereich. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde den Probanden bei dieser Bedingung zudem ein schriftlicher Hinweis in Form des Kommandos „Bitte ziehen“ gegeben, wenn sich die Kraft unterhalb des Zielbereichs befand. Innerhalb des Zielbereichs wurde dieses Kommando durch die Zahlen 1 und 2 ersetzt, welche die Sekunden im Zielbereich signalisierten. Befand sich die Versuchsperson im Zielbereich, musste diese Kraft für 2 Sekunden gehalten werden, was durch die Darstellung der Zahlen 1 und 2 signalisiert wurde.

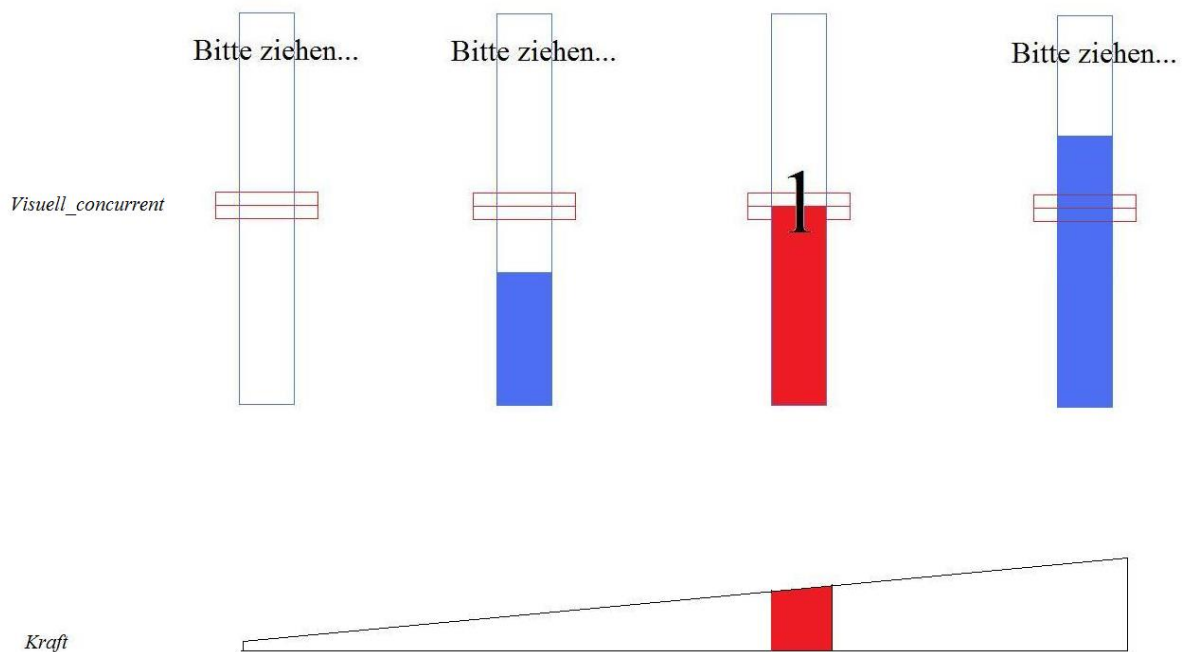


Abbildung 1: Darstellung des visuellen Feedbacks für die Feedbackgruppe Visuell_concurrent.

Visuell_terminal:

Das visuelle Feedback wurde auf einem Bildschirm dargeboten. In der Bedingung *Visuell_terminal* erfolgte bei Erreichen des Zielbereichs (80 Newton, ± 4 Newton Toleranz) ein Farbumschlag von blau auf rot in der Mitte des Bildschirms (Durchmesser ca. 2 cm). Überschritt die Kraft den Zielbereich, erfolgte ein erneuter Farbumschlag von rot auf blau (siehe Abbildung 2).

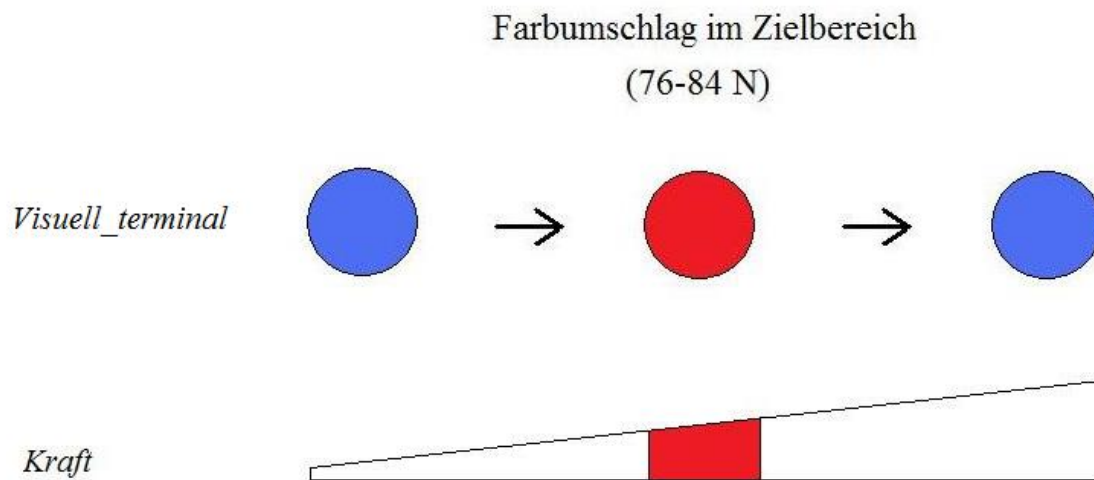


Abbildung 2: Darstellung des visuellen Feedbacks für die Feedbackgruppe Visuell_terminal.

3.2.1.2 Auditives Feedback:

Das auditive Feedback wurde über die Lautsprecher des Computers dargeboten.

Auditiv_concurrent:

Die Probanden der *Auditiv_concurrent*-Bedingung wurden mit einem variablen Piepton geführt, der in immer kürzerem Abstand dargeboten wurde, sobald sich die Versuchsperson dem Zielbereich von unten (<76 N) bzw. von oben (>84 N) näherte, und im Zielbereich in einem durchgehenden Ton endete (siehe Abbildung 3).

Auditiv_terminal:

Auditiv_terminal bedeutet hierbei, dass bei Erreichen des Zielbereiches (80 Newton, ± 4 Newton Toleranz) ein durchgehender Ton erklang. Außerhalb des Zielbereichs gab es kein akustisches oder visuelles Feedback (siehe Abbildung 3).

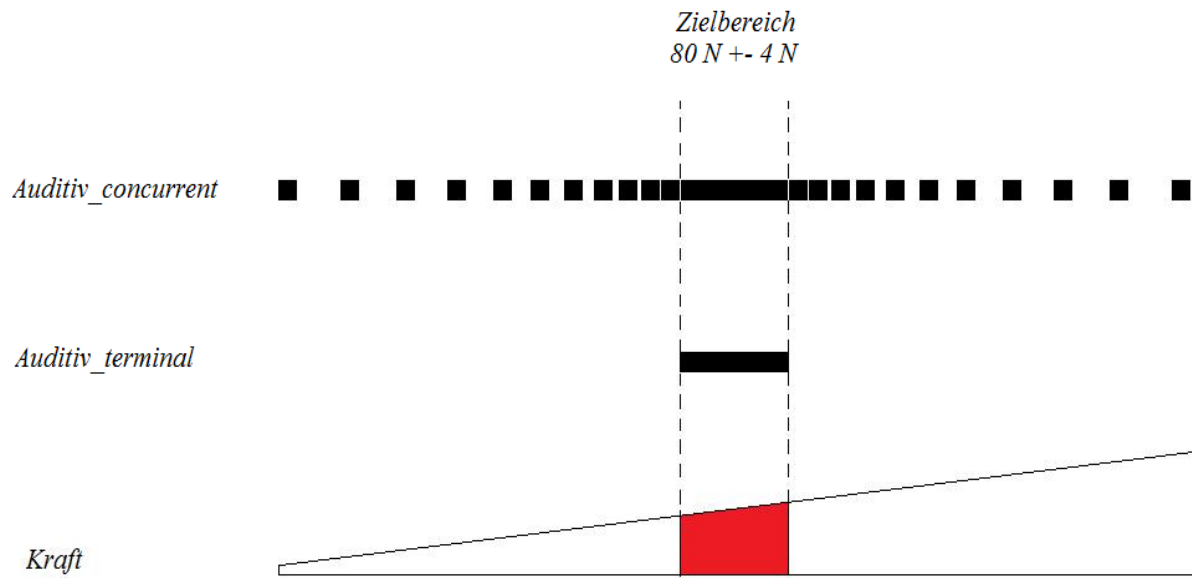


Abbildung 3: Darstellung des auditiven Feedbacks für die Feedbackgruppen *Auditiv_concurrent* (oben) und *Auditiv_terminal* (unten).

3.2.2 Apparatur



Bild 1: Versuchssimulator mit Proband

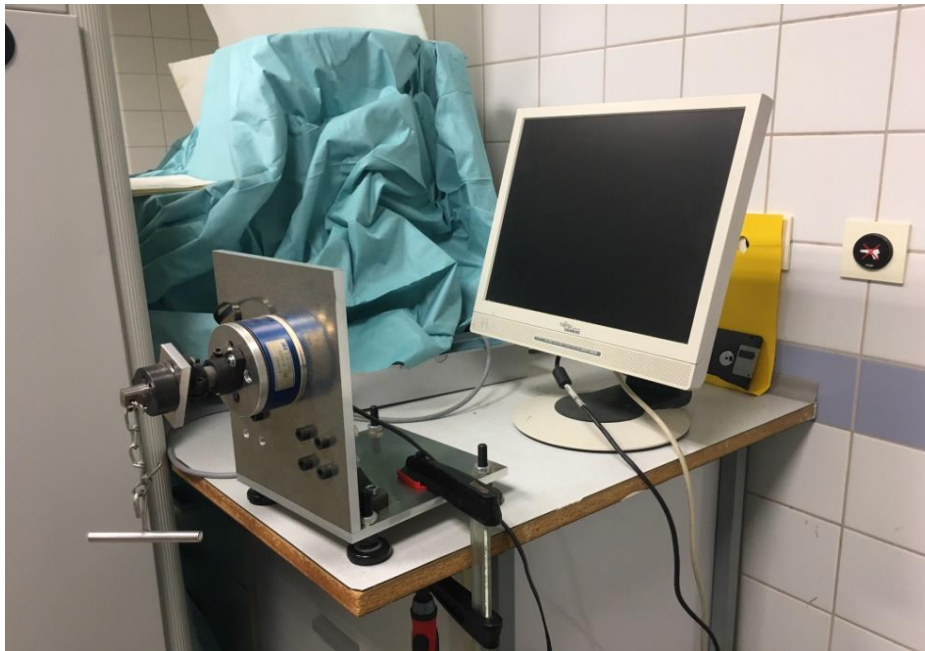


Bild 2: Versuchssimulator mit Bildschirm

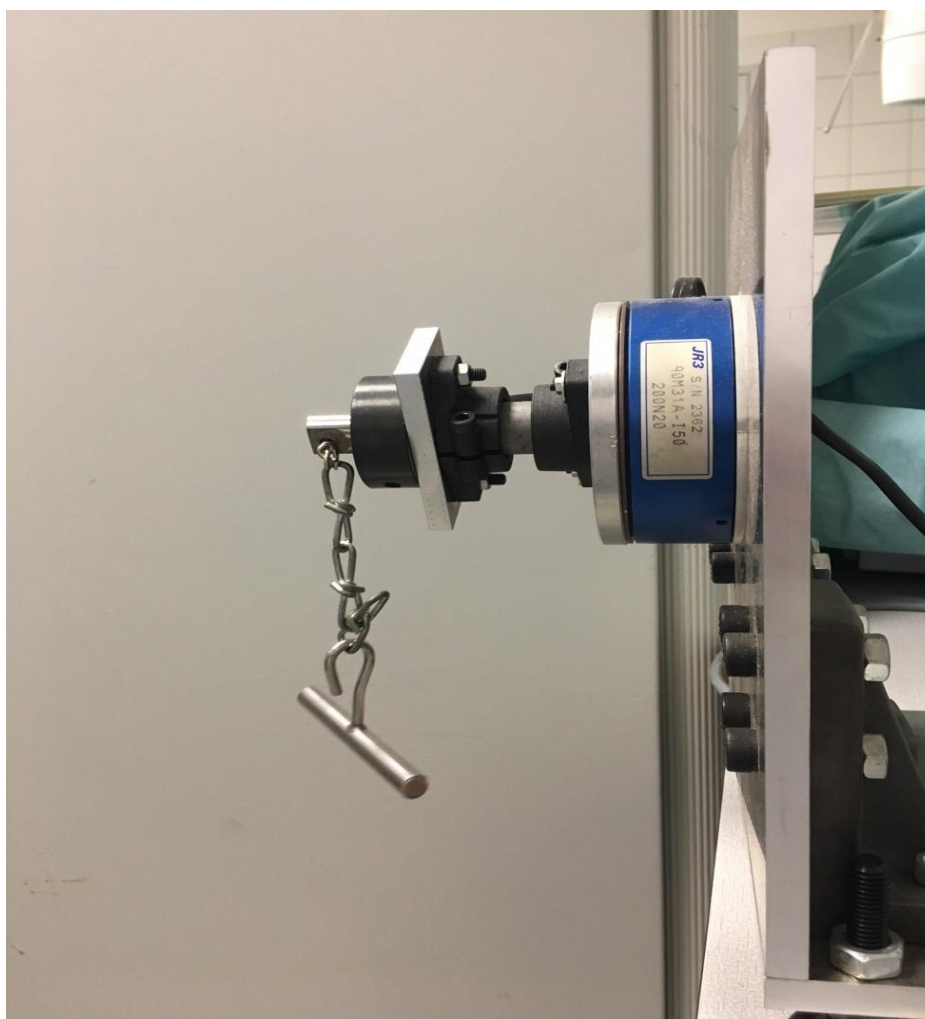


Bild 3: Versuchssimulator Seitenansicht

Die Messung der verwendeten Kraft erfolgte mittels eines dafür gebauten Versuchssimulators (Bild 1 bis 3), der mit Hilfe einer Zwinne an einem Tisch fixiert werden kann. Der Simulator selbst ist eine eigens dafür konzipierte Präzisionsmaßapparatur, bestehend aus einer Halterung mit integriertem Sechs-Achsen Kraftsensor (*JR3 Sensor der Firma JR3, Inc.*) und einer frontal angebrachten Kette, an deren Ende sich zur besseren Handhabung ein T-Griff befindet (siehe Abbildung 4 und Bild 3). Zur Untersuchung wurde ein 15.4-Zoll-LCD-Bildschirm eines Computers mit einer Auflösung von 1440 x 900 Pixel verwendet (siehe Abbildung 5). Sowohl in der Bedingung *Visuell_concurrent* als auch in der Bedingung *Visuell_terminal* war dieser Bildschirm signalgebend für die Teilnehmer. In den beiden akustischen Bedingungen hatte der Bildschirm keine Bedeutung, lediglich der Ton wurde über den Computer abgespielt. Die Teilnehmer standen in einer Distanz von ca. 1 m zum Bildschirm mit dem Griff des Simulators in einer Hand; zur besseren Stabilität und zur Reduktion der beteiligten Muskelgruppen wurden die Probanden aufgefordert, die andere Hand am Simulator selbst abzustützen, um eine Gegenkraft zu erzeugen.

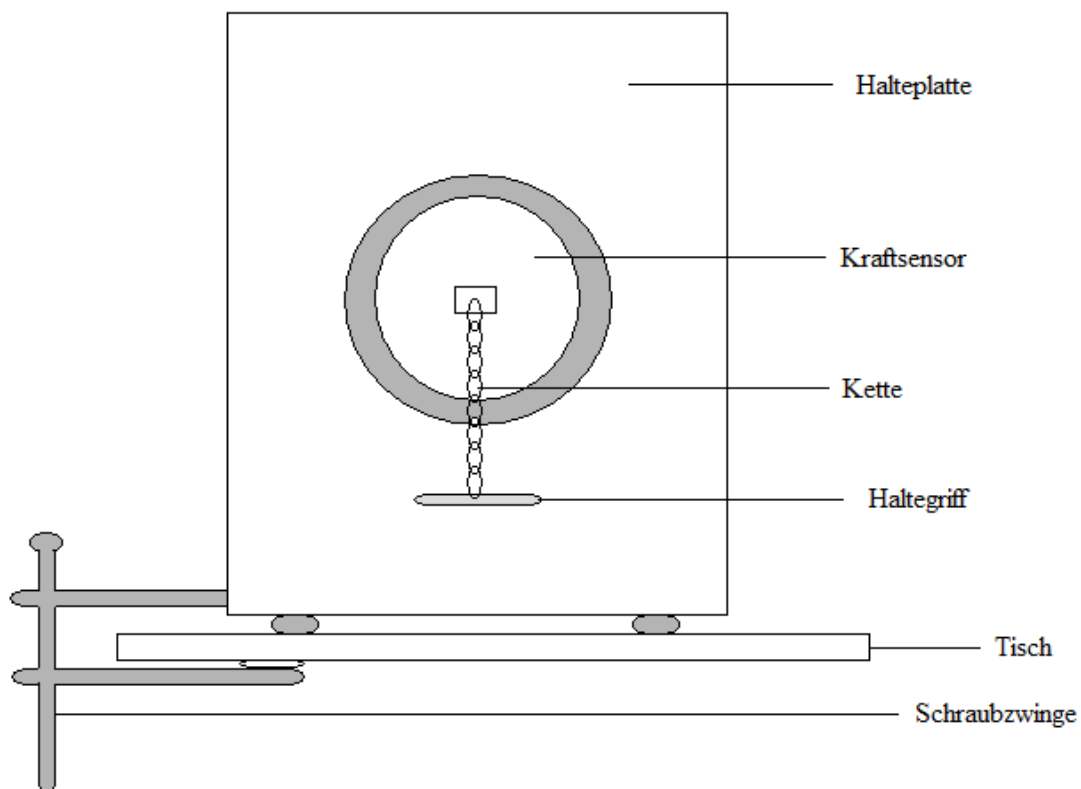


Abbildung 4: Darstellung der Versuchsausrüstung.

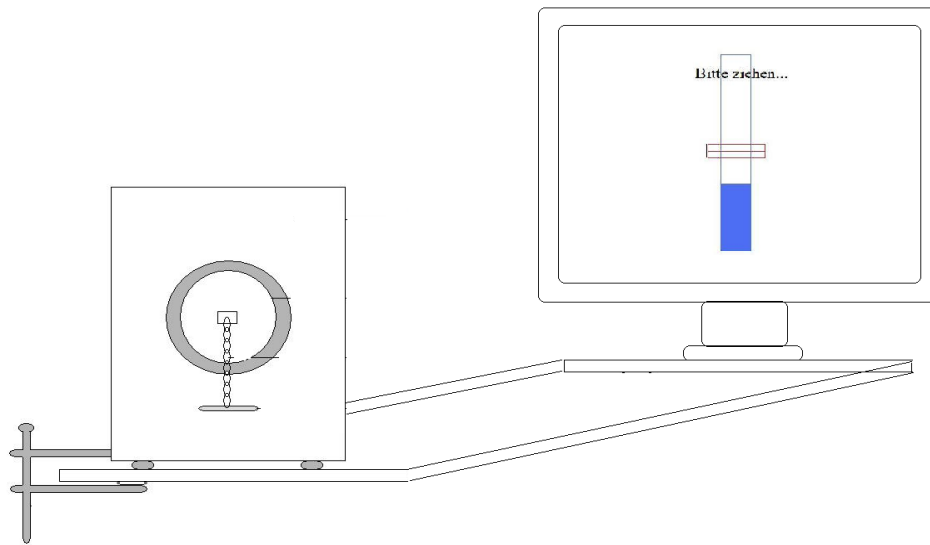


Abbildung 5: Darstellung der Versuchsanordnung mit Bildschirm.

3.3 Setting und Ablauf

Vor Beginn der Testung fand eine randomisierte Zuordnung der Probanden zu einer der vier Versuchsgruppen per Losverfahren statt. Die Testung der zugeordneten Probanden fand an zuvor vereinbarten Terminen jeweils an drei aufeinanderfolgenden Tagen statt (siehe Abbildung 6).

Versuchstag 1:

Nach der Begrüßung am ersten Versuchstag (Tag 1) wurden die Teilnehmer vom Versuchsleiter über die Ziele, die Dauer und den Ablauf der Studie unterrichtet. Sie bestätigten dies mit einer Einverständnis- und einer Datenschutzerklärung. In den Instruktionen wurden sie darüber informiert, dass die Aufgabe darin besteht, zunächst dreimal ungeübt mit einer Kraft von möglichst genau 80 Newton an dem bereitgestellten Simulator zu ziehen und mit Hilfe eines verbalen Hinweises ihrerseits („Jetzt“) die Messung zu starten, woraufhin die gewählte Kraft für 2 Sekunden gehalten werden musste (Einschätzung). Als Hinweis wurde den Probanden lediglich gesagt, dass 80 Newton in etwa dem Gewicht von 8 Kilogramm entsprechen.

Im Anschluss an das dreimalige Ziehen ohne Feedback erfolgte eine einzelne Ziehung, in der die Teilnehmer mit Hilfe des zugestellten Feedbacks (Visuell vs. Auditiv, Concurrent vs. Terminal) eine Vorstellung vom gewünschten Zielbereich (80 N) bekamen (1x Feedback).

Nach Durchlaufen des einmaligen Feedbacks kam ein weiteres Mal eine dreimalige Messung der Kraft ohne Feedbacks (Test nach 1x Feedback).

Abgeschlossen wurde der erste Versuchstag mit einer Übungsphase mit Feedback (15 Trainingsziehungen) und einem erneuten Test (Test nach Training). Dabei wurden die Probanden instruiert, sich die Kraft für einen anschließenden Test (Test nach Training) und für den Wiederholungstest des Folgetags möglichst genau zu verinnerlichen.

Versuchstag 2:

Der zweite Versuchstag begann wie schon der erste Tag mit einem dreimaligen Zug am Simulator ohne Feedback, um das tags zuvor erlernte Wissen und den Übungseffekt zu messen (Wiederholungstest). Nach einer Trainingsphase (15 Ziehungen) mit dem der Feedbackgruppe entsprechenden Feedback erfolgte wiederum eine dreifache Testmessung der Kraft (Test nach Training).

Versuchstag 3:

Der dritte und letzte Tag der Testung glich dem zweiten zuvor beschriebenen. Die Trainingsphase wurde jedoch auf drei Trainingsziehungen verkürzt, da keine Messung am Folgetag mehr erfolgte.

Alle Testungen wurden vom Versuchsleiter beaufsichtigt, der auch zur Aufzeichnung der Messung den Computer bediente.

Tag 1	Einschätzung	1x Feedback	Test	Training mit Feedback	Test
Tag 2	Wiederholungstest			Training mit Feedback	Test
Tag 3	Wiederholungstest			Training mit Feedback	Test

Abbildung 6: Schematische Darstellung des Ablaufs des Experiments.

Halbjahres-Wiederholungstest:

Sechs Monate nach Abschluss der Versuchsreihe wurden alle Teilnehmer erneut kontaktiert und zu einem Halbjahres-Wiederholungstest eingeladen. 13 Testpersonen konnten dazu gewonnen werden. Jede Testperson blieb weiterhin ihrer Testgruppe zugeordnet. Die Testung entsprach einem Wiederholungstest (drei Ziehungen ohne Feedback).

3.4 Studiendesign

Die vorliegende Studie bestand aus einem 7 (*Kraft*) x 4 (*Feedback-Gruppe*) Versuchsdesign. Der Within-Subject-Faktor *Kraft* variierte auf den Stufen „Tag 1 Schätzen“, „Tag 1 Test nach 1x Feedback“, „Tag 1 Test nach Training“, „Tag 2 Wiederholungstest“, „Tag 2 Test nach Training“, „Tag 3 Wiederholungstest“ und „Tag 3 Test nach Training“, der Between-Subjects-Faktor *Feedback-Gruppe* entsprach den vier untersuchten Vergleichsgruppen (*siehe 3.2.1*). Als abhängige Variable diente die gemessene Kraft (erfasst in Newton).

3.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit SPSS für Windows, Version 22.0 (IBM SPSS Statistics). Die Normalverteilung und die Varianzhomogenität wurden mit Hilfe des *Kolmogorov-Smirnov-Test* getestet, die Mittelwertdifferenzen wurden mittels gemischter ANOVA-Modelle analysiert. Signifikante Haupteffekte bei mehr als zwei Stufen wurden mithilfe von einzelnen paarweisen *t*-Tests post hoc untersucht. Für die Mittelwertvergleiche weiterer Variablen wurden *t*-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt. Das Signifikanzniveau war bei allen Analyseverfahren einheitlich auf $\alpha=0.05$ (zweiseitig) festgelegt.

3.6 Analyse der Ergebnisse

Für die Analyse der Kraftwerte wurde ein Mittelwert einzelner Kraftmesspunkte in einem Abstand von 16ms über einen Zeitraum von 2 Sekunden ermittelt. Jede Test-Messung erfolgte in dreifacher Ausführung. Es wurde jeweils der Betrag der Differenz zum Zielwert als Messgröße herangezogen und über die drei Messungen gemittelt. Schlussendlich ergab sich für jede Test-Messung eine absolute Abweichung (= absoluter Fehler |AF|) in Newton zu der Zielkraft von 80 N.

4 Ergebnisse

4.1 Ausschluss aus der Stichprobe

Ausreißer, die außerhalb der 2. Standardabweichung und somit nicht im Intervall von 97.5% lagen, wurden aus der Studie entfernt. Insgesamt betraf dies drei Testpersonen, die aus der weiteren statistischen Berechnung ausgeschlossen wurden. Bei einer initialen Teilnehmerzahl von 40 Probanden ergab dies eine in der statistischen Auswertung berücksichtigte Anzahl von $N=37$ Probanden. Außerdem wurden Messungen, die aufgrund eines technischen Fehlers bei der Messung nicht aufgezeichnet wurden, nicht in den weiteren Berechnungen berücksichtigt.

4.2 Beschreibung der Stichprobe

Insgesamt wurden 37 Testpersonen in die statistische Auswertung eingeschlossen. Die Probanden hatten einen Altersdurchschnitt von $M = 26,89$ Jahren ($SD = 9,96$ Jahre). Bei der zugewiesenen Verteilung der Probanden zu den jeweiligen Feedbackgruppen wurde auf die gleichmäßige Verteilung von männlichen ($n = 24$) und weiblichen ($n = 13$) Probanden geachtet (siehe Tabelle 2). Auch die Einteilung in die vier verschiedenen Feedbackgruppen erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Es wurde darauf geachtet, dass die Größe der Gruppen homogen verteilt war. Da drei Testpersonen aus der Messung ausgeschlossen werden mussten (siehe 4.1), ergaben sich folgende Gruppengrößen: Visuell_concurrent $n = 10$, visuell_terminal $n = 9$, auditiv_concurrent $n = 10$, auditiv_terminal $n = 8$.

Tabelle 2: Geschlechterverteilung der Stichprobe.

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozent	Kumulative Prozente
Gültig	Männlich	24	64,9	64,9	64,9
	Weiblich	13	35,1	35,1	35,1
	Gesamtsumme	37	100,0	100,0	100,0

4.3 Ergebnisse der Testungen

Im Nachfolgenden sollen die verschiedenen Ergebnisse der einzelnen Testungen getrennt voneinander aufgeführt werden.

4.3.1 Test auf Normalverteilung

Beim Test auf Normalverteilung der Zahlenreihen wurden die absoluten Werte der Testpersonen zum jeweiligen Testzeitpunkt herangezogen. Alle Zahlenreihen erreichen eine Signifikanz von $p > 0,05$ (siehe Tabelle 3). Somit ist von einer Normalverteilung auszugehen.

Tabelle 3: Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe

		Tag 1 Schätzen	Tag 2 Wiederholungstest	Tag 3 Wiederholungstest
H		34	36	37
Parameter der	Mittelwert	92,18	96,53	89,94
Normalverteilung ^{a,b}	Standardabweichung	31,32	21,22	15,57
Extremste Differenzen	Absolut	,090	,077	,095
	Positiv	,073	,077	,089
	Negativ	-,090	-,050	-,095
Teststatistik		,090	,077	,095
Asymp. Sig. (2-seitig)		,200 ^{c,d}	,200 ^{c,d}	,200 ^{c,d}

- a. Die Testverteilung ist normal.
- b. Aus Daten berechnet.
- c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.
- d. Dies ist eine Untergrenze der tatsächlichen Signifikanz.

4.3.2 Ergebnisse Frage 1: Lernerfolg unabhängig von einer Feedbackmethode

Frage 1: Zeigt sich ein Lernerfolg über die Gesamtheit der Probanden beim Erlernen einer isometrischen Kraft mittels Simulation über die Versuchstage?

Zur Beantwortung dieser Frage werden folgende Testmessungen verglichen: Die Schätzung an Tag 1, die als Ausgangspunkt der isometrischen Krafteinschätzung dient, wurde mit dem

Wiederholungstest des Folgetags verglichen. Zudem wurde der Wiederholungstest an Tag 2 mit dem Wiederholungstest an Tag 3 verglichen (siehe Abbildung 7).

Tag 1	Schätzung	1x Feedback	Test	Training	Test
Tag 2	Wiederholungstest			Training	Test
Tag 3	Wiederholungstest			Training	Test

Abbildung 7: Versuchsablauf mit Hervorhebung der für die Frage 1 relevanten Messpunkte.

Tabelle 4 zeigt den Betrag der mittleren Differenz der Probanden in Newton zum vorgegebenen Zielbereich von $80\text{N} \pm 4\text{N}$. Das Ergebnis ist eine nicht-signifikante Verbesserung ($p = 0.203$) von der Schätzung an Tag 1 zum Wiederholungstest an Tag 2 von 28.69N ($\text{SD} = 18.20\text{N}$) auf 23.27N ($\text{SD} = 14.22\text{N}$), was einer absoluten Differenz von 5.42N entspricht.

Der Vergleich zwischen dem Wiederholungstest an Tag 2 und dem Wiederholungstest an Tag 3 zeigt eine signifikante Annäherung ($p = 0.021$) der Abweichung zum Zielbereich von 23.27N ($\text{SD} = 14.22\text{N}$) auf 15.81N ($\text{SD} = 9.77\text{N}$).

Tabelle 4: Darstellung der Bandbreite des |AF|.

	Tag 1 Einschätzung	Tag 2 Wiederholungstest	Tag 3 Wiederholungstest
Mittelwert	28,69	23,27	15,81
H	34	36	37
Standardabweichung	18,20	14,22	9,77
Minimum	3,33	3,00	3,00
Maximum	69,00	53,33	43,67

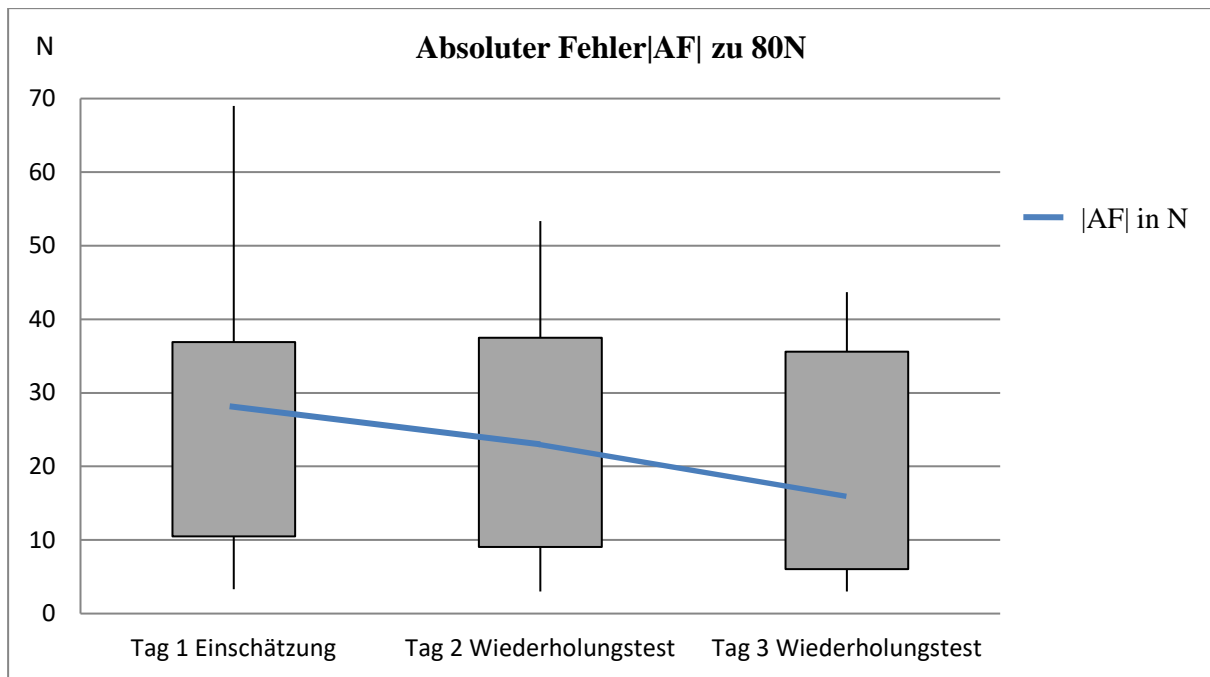


Abbildung 8: Darstellung des absoluten Fehlers $|AF|$ zum Zielbereich von $80N$ ($N=37$) an den jeweiligen Testtagen und Messpunkten aus Tabelle 4.

Zudem lässt sich der Lernerfolg auch anhand einer Reduktion der maximalen Zielabweichung interpretieren.

Das Maximum, d.h. die maximale Abweichung zum Zielpunkt von $80N$, verringert sich über die drei Versuchstage (Tag 1 = $69.00N$; Tag 2 = $53.33N$; Tag 3 = $43.67N$). Hierbei ist zu bemerken, dass drei Testpersonen, die nicht innerhalb des 97.5%-Konfidenzintervalls lagen, aus statistischen Gründen, die die Normalverteilung betreffen, entfernt wurden. Dies betraf zwei Messungen an Tag 1 ($104.67N$ und $187.00N$) und eine Messung an Tag 3 ($48.67N$).

Das Minimum liegt auf einem konstanten Level um $3N$ zum Zielbereich. Dabei ist anzumerken, dass während des Trainings der Zielbereich $\pm 4 N$ um den Zielwert lag. Somit liegt das Minimum an allen Messzeitpunkten innerhalb des trainierten Zielbereichs.

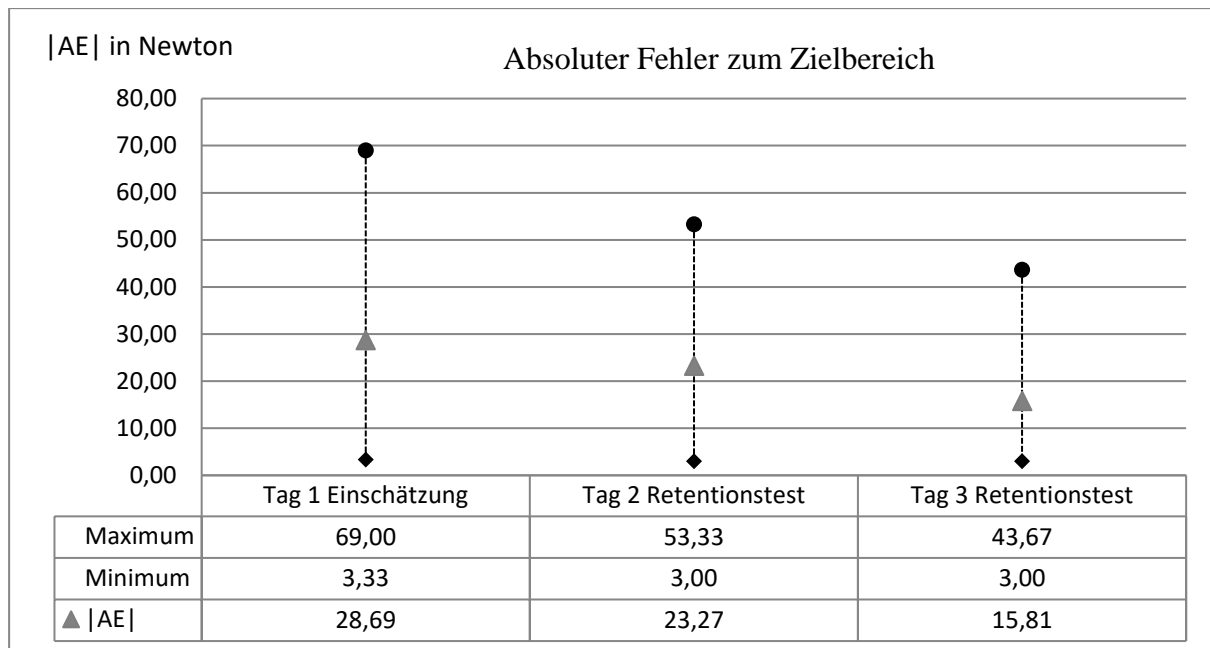


Abbildung 9: Darstellung des absoluten Fehlers |AF| (Pfeil) zum Zielbereich von 80N (N=37) an den jeweiligen Testtagen und Messpunkten (siehe Tabelle 4) sowie der mittleren Maxima und Minima.

4.3.3 Ergebnisse Frage 2: Vorteil einer Feedbackform

Zeigt sich eine bestimmte Feedbackform (visuell oder auditiv, concurrent oder terminal) vorteilhaft beim Erlernen einer isometrischen Kraft?

Zu den Messzeitpunkten an Tag 1 (Schätzung) und dem Wiederholungstest an Tag 3 gab es keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Feedbackgruppen. Dies zeigt sich besonders an Tag 1 als wichtig, um zu zeigen, dass man über alle Feedbackgruppen von einem ähnlichen Ausgangsniveau und damit einem homogenen Können zu Beginn der Testungen ausgehen kann.

Im Wiederholungstest an Tag 2 zeigen sich Unterschiede zwischen den Feedbackgruppen. Ein signifikanter Unterschied ($p = 0.029$) besteht zwischen den Feedbackgruppen Auditiv_concurrent und Auditiv_terminal mit Mittelwerten von 13.30N (SD = 7.51N) und 32.67N (SD = 16.53N). Die Feedbackgruppe Auditiv_concurrent verbesserte sich dabei von 31.27N an Tag 1 auf 13.30N an Tag 2. Alle anderen Gruppen erzielten nur geringfügig bessere Ergebnisse (Visuell_concurrent: 27.71N auf 26.13N; Visuell_terminal: 24.30N auf

23.85N) oder verschlechterten sich sogar geringfügig (Auditiv_terminal: 31.76N auf 32.67N); (siehe Abbildung 10). Somit lässt sich ein signifikanter Trainingseffekt von Tag 1 zu Tag 2 lediglich für die Feedbackgruppe Auditiv_concurrent verzeichnen ($p = 0.050$).

An Tag 3 verbesserten sich alle Feedbackgruppen im Vergleich zu Tag 2 (siehe Abbildung 10). Keine der Gruppen erreicht jedoch das Signifikanzniveau. Auch die scheinbar deutliche Verbesserung der Feedbackgruppe Auditiv_terminal ist geringfügig nicht signifikant ($p = 0.051$).

Vergleicht man die Schätztestung an Tag 1 mit dem Wiederholungstest an Tag 3, ist eine deutliche Verbesserung aller Feedbackgruppen zu erkennen. Signifikant verbessern sich jedoch nur beide Gruppen mit auditivem Feedback (Auditiv_concurrent: $p = 0.006$; Auditiv_terminal: $p = 0.033$).

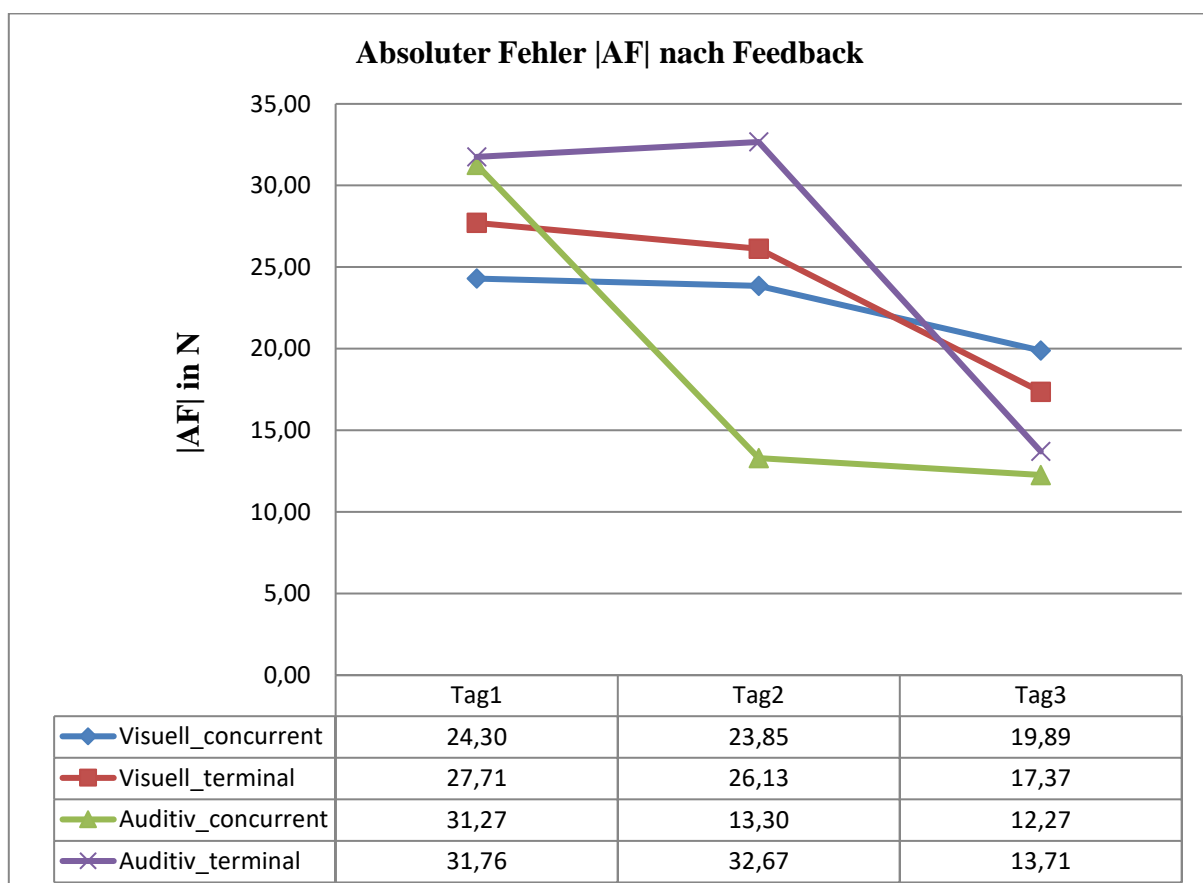


Abbildung 10: Darstellung des absoluten Fehlers |AF| nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N ($N = 37$) an den jeweiligen Testtagen und Messpunkten.

4.3.4. Ergebnisse Frage 3: Analyse der Kurzzeiteffekte

Frage 3: Welche Kurzzeiteffekte beim Erlernen einer isometrischen Kraft zeigen sich und gibt es dabei Unterschiede zwischen den in Fragestellung 2 genannten Feedbackformen?

Zunächst wird untersucht, welchen Effekt ein einmaliges Feedback auf die Leistungen des Probanden hat. Dazu wird die Schätzung an Tag 1 mit einer Testung unmittelbar nach dem einmaligen Feedback verglichen.

Tag 1	Schätzung	1x Feedback	Test	Training	Test
--------------	------------------	-------------	-------------	----------	------

Abbildung 11: Versuchsablauf mit Hervorhebung der für die Frage 2 relevanten Messpunkte.

Hierbei kommt es zu einer Verbesserung der Leistung in allen Feedbackgruppen. Signifikant verbesserte sich die Feedbackgruppe Auditiv_terminal ($p = 0.035$).

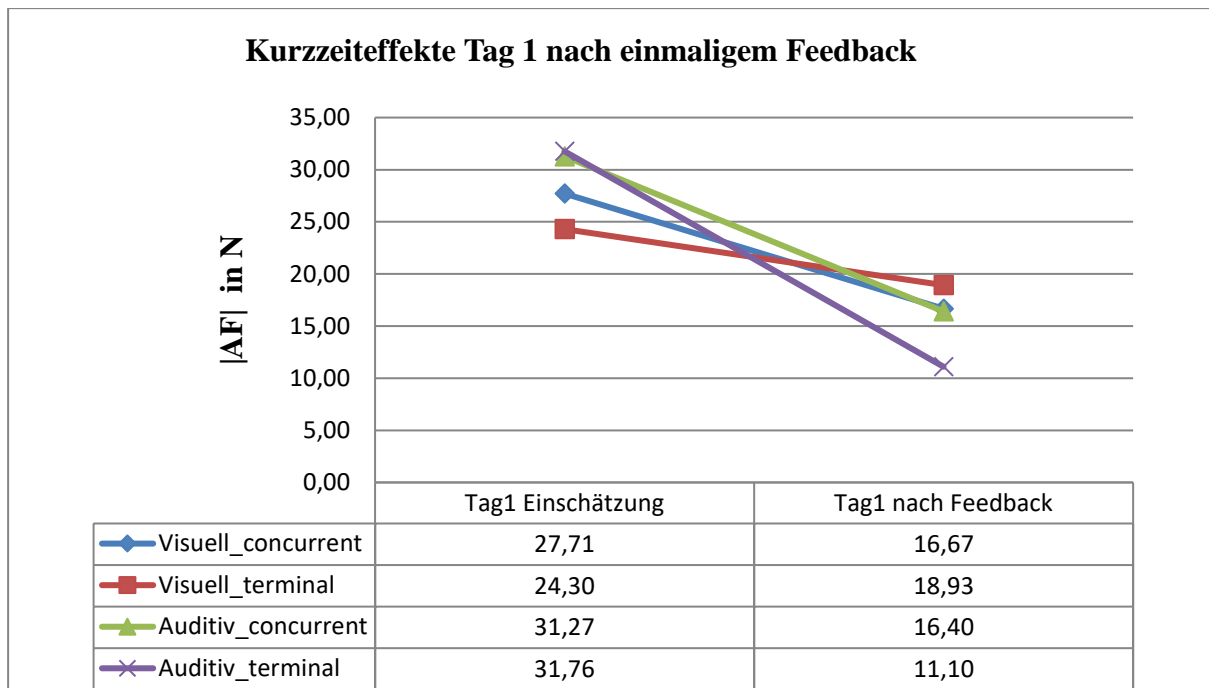


Abbildung 12: Darstellung des absoluten Fehlers $|AF|$ nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N ($N = 37$) vor und nach einmaligem Feedback (siehe Abbildung 11).

Desweiteren wird untersucht, welchen unmittelbaren Effekt ein Training auf die Leistungen des Probanden hat. Dazu wird die Schätzung an Tag 1 mit der Testung nach dem Training an Tag 1 untersucht.

Tag 1	Schätzung	1x Feedback	Test	Training	Test
-------	-----------	-------------	------	----------	------

Nach Training an Tag 1 verbesserten sich die Feedbackgruppen *Visuell_concurrent* ($p = 0.037$), *Visuell_terminal* ($p = 0.024$) und *Auditiv_concurrent* ($p = 0.022$) signifikant. Zu einer nicht signifikanten Verbesserung kam es bei der Feedbackgruppe *Auditiv_terminal* ($p = 0.065$).

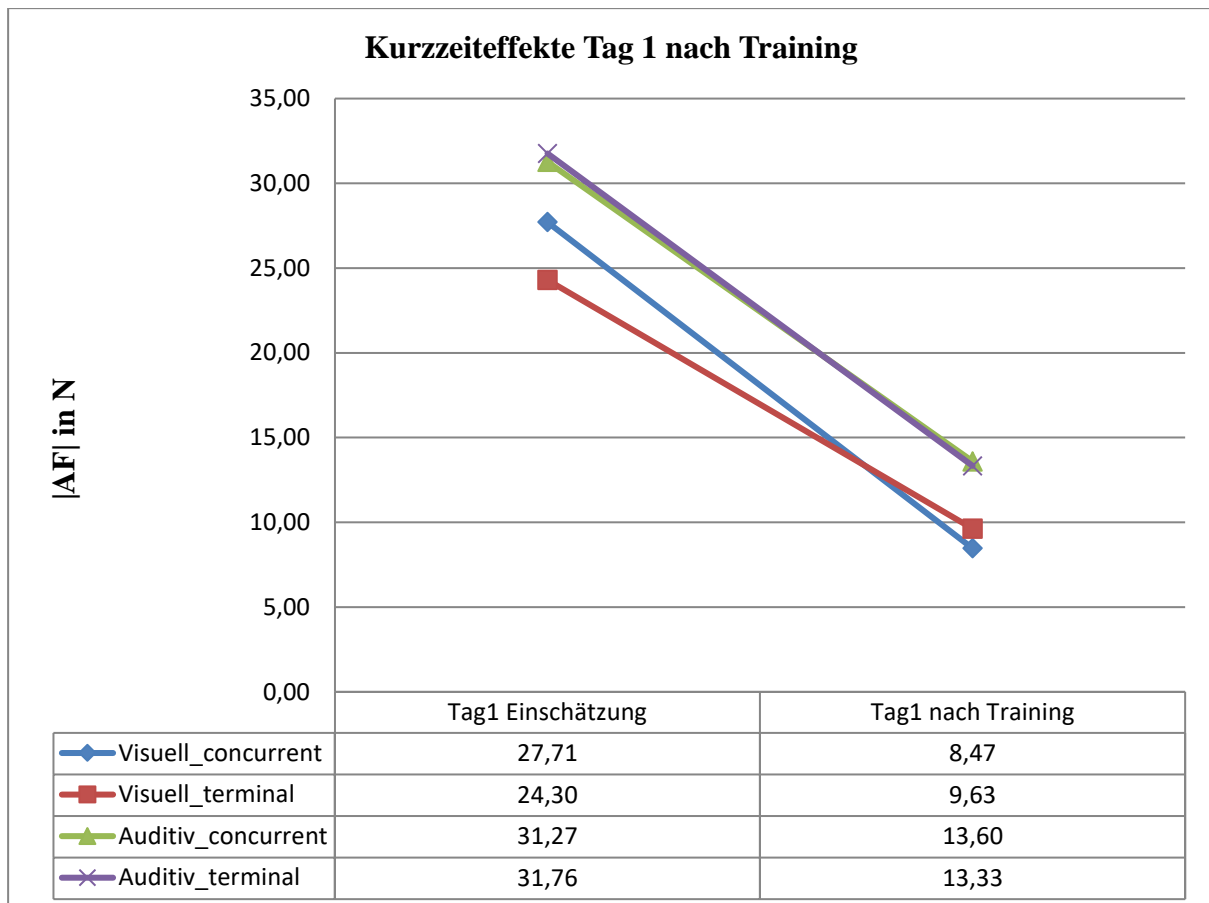


Abbildung 13: Darstellung des absoluten Fehlers |AF| nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N (N = 37) vor und nach dem Training.

Tag 2	Wiederholungstest	Training	Test
-------	-------------------	----------	------

Am zweiten Testtag lieferten alle Feedbackgruppen bessere Ergebnisse nach dem Training als vor dem Training. Wiederum ist die Verbesserung deutlich. Das Signifikanzniveau wird von den Feedbackgruppen *Visuell_concurrent* ($p = 0.013$), *Visuell_terminal* ($p = 0.020$) und *Auditiv_concurrent* ($p = 0.031$) erreicht. Die Feedbackgruppe *Auditiv_terminal* verfehlt das Signifikanzniveau knapp ($p = 0.058$).

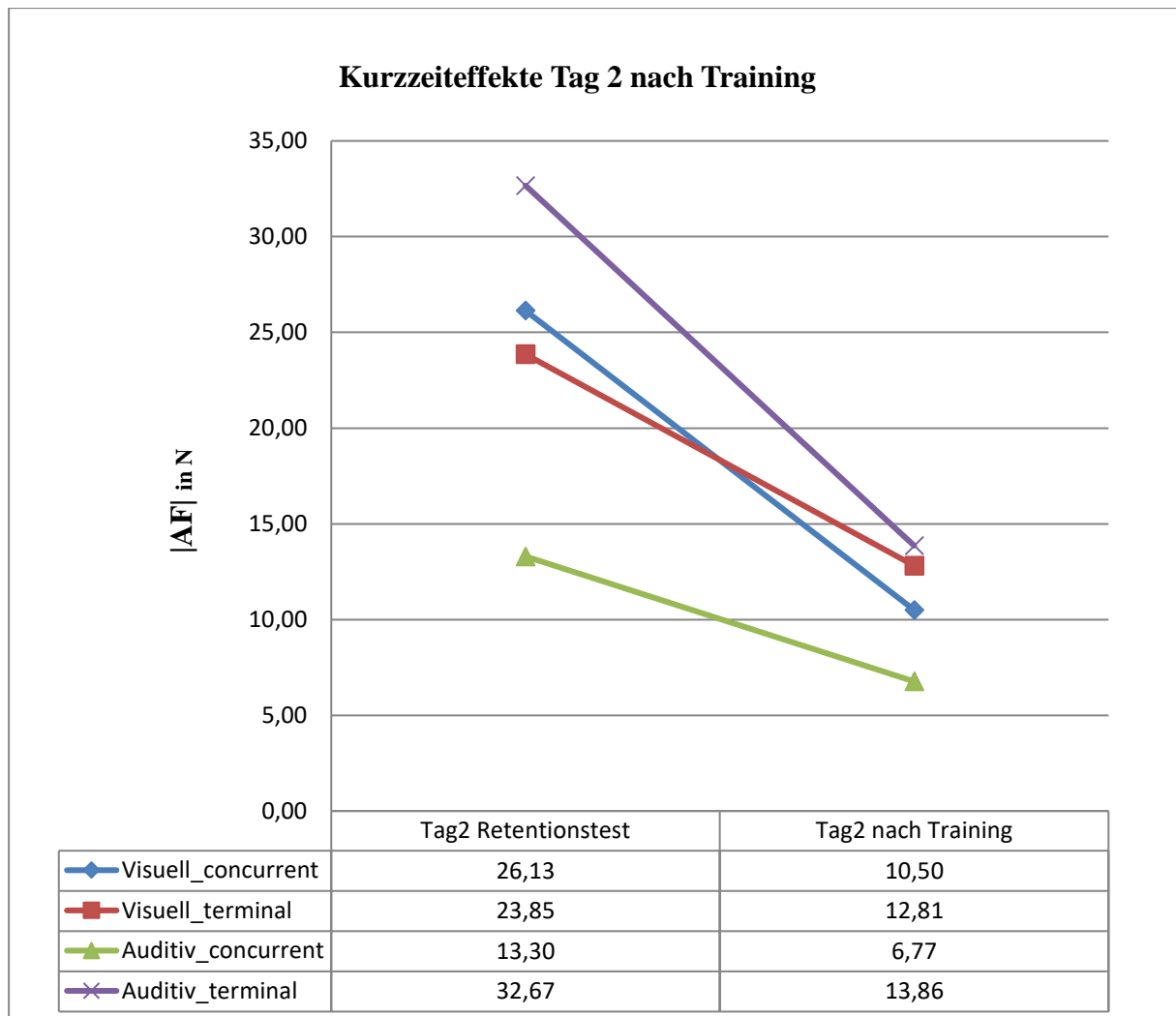


Abbildung 14: Darstellung des absoluten Fehlers $|AF|$ nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N ($N = 37$) vor und nach Training an Tag 2.

Tag 3	Wiederholungstest	Training	Test
-------	-------------------	----------	------

Am dritten Testtag verbessern sich wiederum alle Feedbackgruppen nach absolviertem Training. Es erreicht jedoch keine Gruppe das Signifikanzniveau. *Visuell_concurrent* ($p = 0.117$); *Visuell_terminal* ($p = 0.068$); *Auditiv_concurrent* ($p = 0.067$) und *Auditiv_terminal* ($p = 0.097$).

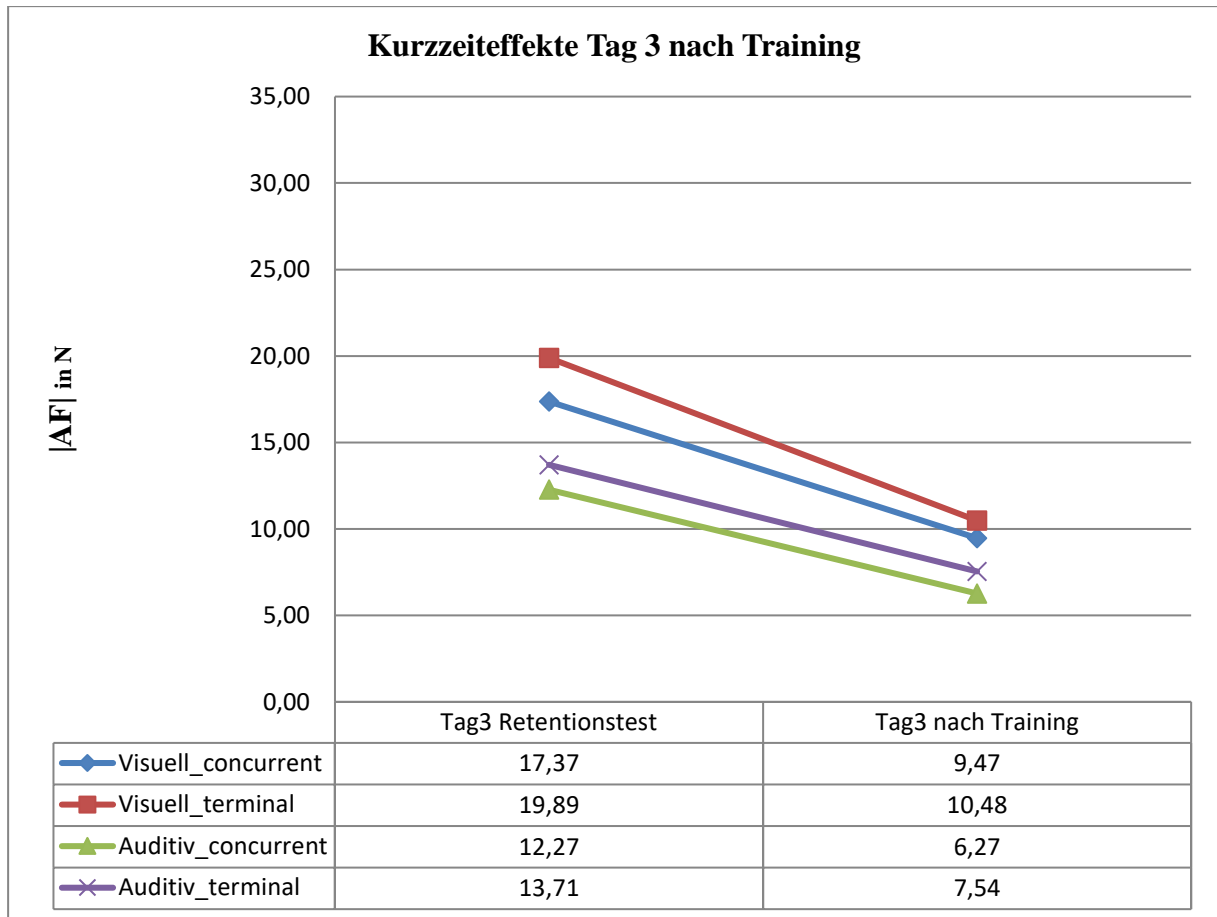


Abbildung 15: Darstellung des absoluten Fehlers $|AF|$ nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N ($N = 37$) vor und nach Training an Tag 3.

4.3.5 Ergebnisse Frage 4: Analyse der Trainingszeiten nach Feedbackgruppen

Gibt es Zusammenhänge zwischen den Trainingszeiten der einzelnen Feedbackformen und dem Lernerfolg?

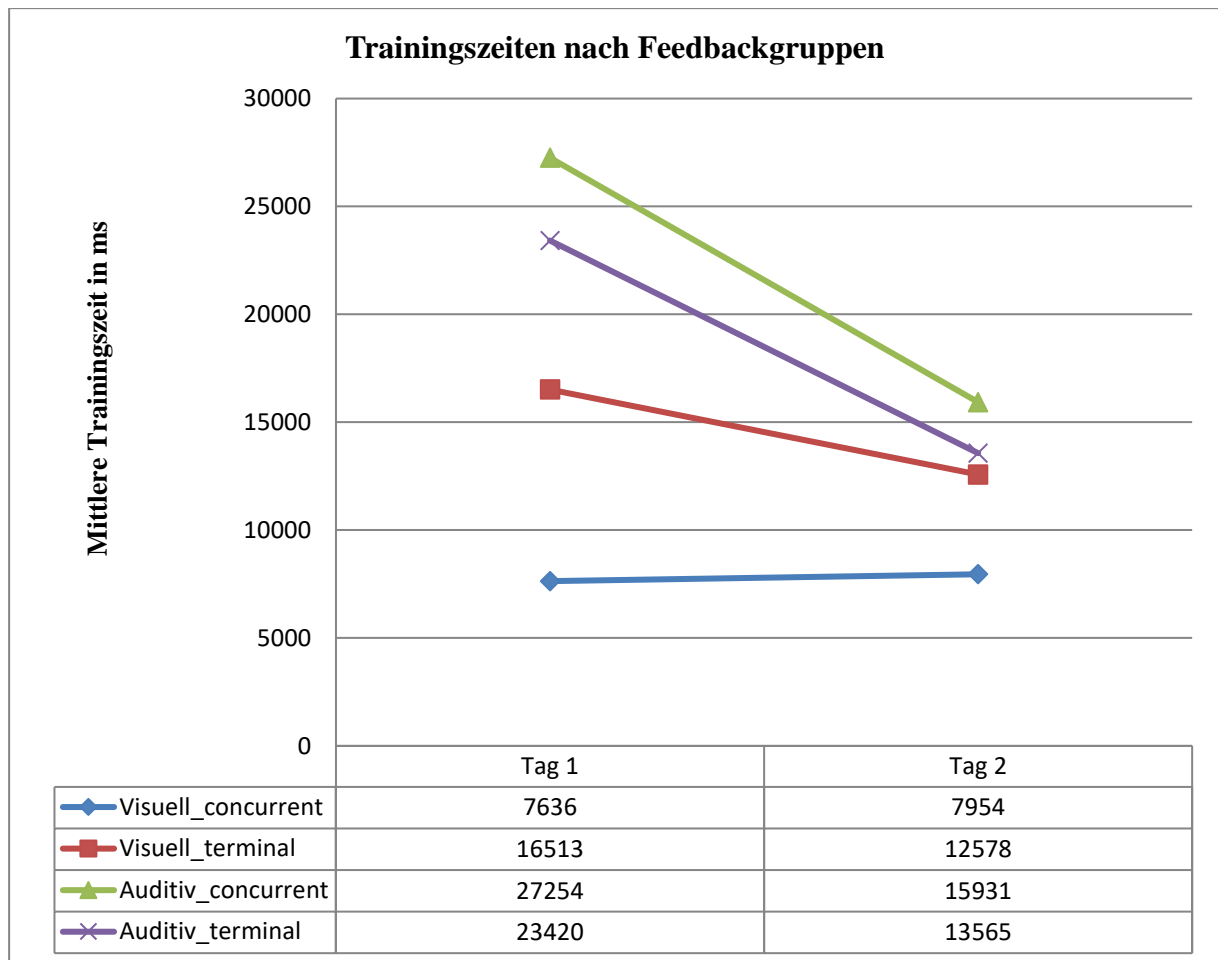


Abbildung 16: Mittlere Trainingszeit an Tag 1 und Tag 2 nach Feedbackgruppe.

Die Zeiten der Trainingsziehungen, d.h. von Beginn der Messung bis Abschluss der Trainingsziehung, wurden gemessen. Bei der Analyse der Trainingszeiten wurden die Einzelzeiten jeder Testperson über den Trainingstag gemittelt. Messungen, die nicht innerhalb des 97.5% Intervalls lagen, wurden aus der statistischen Analyse entfernt (Tag 1: $n = 36$, Tag 2 $n = 37$). Die Analyse nach Feedbackgruppen ergab deutlich geringere Trainingszeiten für die Feedbackgruppe *Visuell_concurrent*. Signifikant geringere Trainingszeiten erzielt die Gruppe *Visuell_concurrent* ($M = 7636$ ms) an Tag 1 gegenüber den Gruppen *Auditiv_terminal* ($M = 23420$ ms; $p = 0.008$) und *Auditiv_concurrent* ($M = 27253$ ms; $p = 0.001$). Zwischen den Gruppen *Visuell_concurrent* ($M = 7636$ ms) und *Visuell_terminal* ($M = 16513$ ms) besteht ein nicht-signifikanter Unterschied ($p = 0.344$).

Die Trainingszeiten an Tag 2 folgen dieser Tendenz: zwischen der Feedbackgruppe *Visuell_concurrent* ($M = 7954$ ms) zeigt sich ein signifikanter Unterschied zu

Auditiv_concurrent ($M = 15931$ ms; $p = 0.001$) und *Auditiv_terminal* ($M = 12578$ ms; $p = 0.014$). Zwischen den Gruppen *Visuell_concurrent* ($M = 7954$ ms) und *Visuell_terminal* ($M = 12578$ ms) besteht ein nicht-signifikanter Unterschied ($p = 0.073$).

Abzugrenzen von den Trainingseinheiten der Vortage ist die Trainingseinheit an Tag 3 insofern, dass anstatt 15 Trainingseinheiten an diesem Tag lediglich 3 Trainingseinheiten durchgeführt wurden. Vergleiche zu den Vortagen sind für die Analyse der Trainingszeiten daher nicht geeignet.

4.3.6 Ergebnisse Frage 5: Halbjahres-Wiederholungstest

Zeigt sich ein Langzeit-Lernerfolg bzw. zeigt sich eine bestimmte Feedbackform vorteilhaft in der Konsolidierung des Erlernten?

Sechs Monate nach dem ursprünglichen Test wurden 13 Testpersonen für einen Wiederholungstest gewonnen, um ein Langzeitergebnis zu evaluieren. Der Versuchsablauf entsprach einem Wiederholungstest der ursprünglichen Testreihe (drei Ziehungen ohne Feedback über die vier verschiedenen Feedbackgruppen). Es wurde ein Mittelwert des absoluten Fehlers $|AF|$ von 22.65N ermittelt ($SD = 19.58$, $n=13$; siehe Tabelle 5). Der maximale $|AF|$ einer Testperson betrug 58.52N. Die Testgruppe *Visuell_concurrent* zeigte im Wiederholungstest einen Mittelwert von $M = 43.85N$, $SD = 19.10$ bei 3 Probanden. Die Testgruppe *Visuell_terminal* kam zu einem Mittelwert von $M = 24.90N$, $SD = 28.03$ bei 3 Probanden. Die Testgruppe *Auditiv_concurrent* zeigte die geringste Abweichung zum Mittelwert von $M = 11.31N$, $SD = 3.40$ bei $n=3$. Die Testgruppe *Auditiv_terminal* zeigte eine mittlere Abweichung vom Mittelwert $M = 13.57N$, $SD = 7.97$ bei $n=4$.

Tabelle 5: Ergebnisse des Halbjahres-Wiederholungstest.

Feedback	Mittelwert	H	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Visuell_concurrent	43,85	3	19,10	22,25	58,52
Visuell_terminal	24,90	3	28,03	4,02	56,76
Auditiv_concurrent	11,31	3	3,41	8,73	15,17
Auditiv_terminal	13,57	4	7,97	8,20	25,41
Gesamtsumme	22,65	13	19,57	4,02	58,52

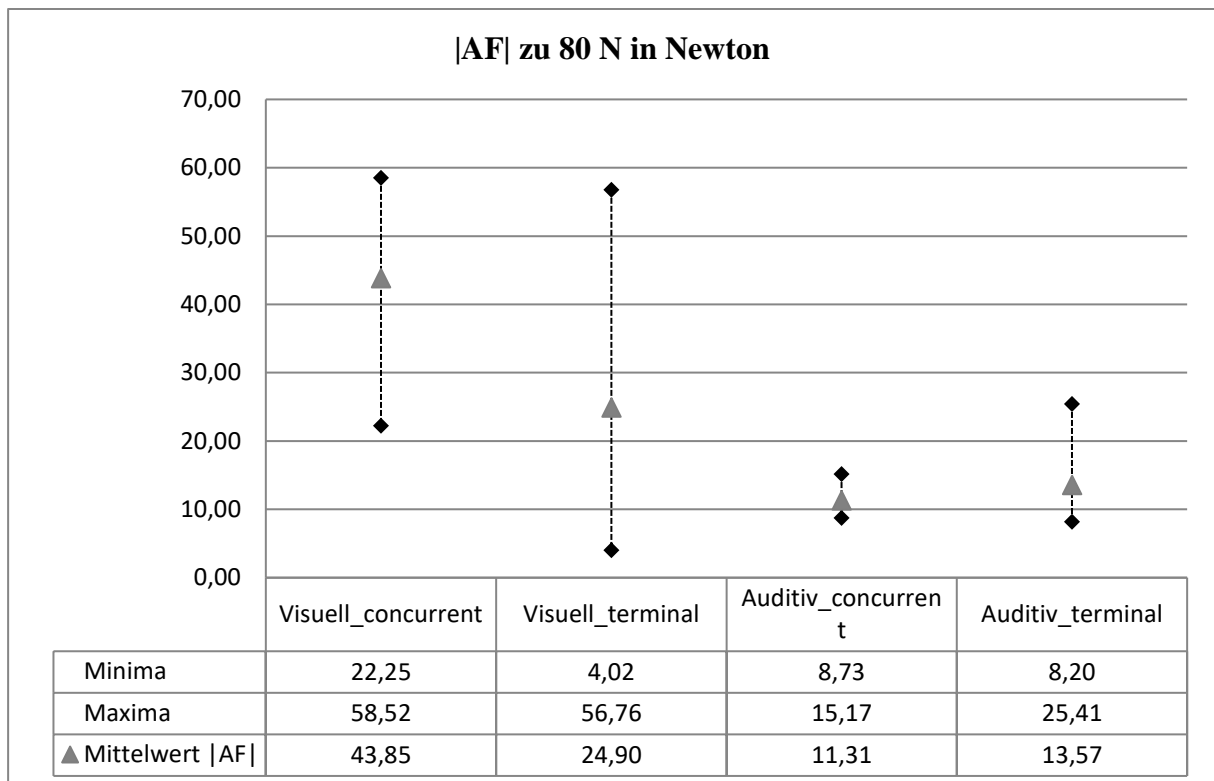


Abbildung 17: Darstellung des absoluten Fehlers |AF| (Dreieck) sowie der Maxima und Minima nach Feedbackgruppe zum Zielbereich von 80N (n=13) im Halbjahres-Wiederholungstest.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war zu untersuchen, wie sich haptische Fähigkeiten an Simulatoren erlernen lassen. Speziell die isometrische Kraftapplikation als wichtiger Teil im praktisch-klinischen Alltag wurde im Hinblick auf geeignete Trainingsmethoden an Simulatoren untersucht. Ähnliche Studien zu motorischem Lernen einer isometrischen Kraft (Park et al., 2000; Proteau, 1992; Schmidt & Wulf, 1997; Van der Linden et al., 1993) konzentrierten sich vorwiegend auf den Unterschied zwischen konkurrentem Feedback und terminalem Feedback. Im Hinblick auf das Erlernen einer Fertigkeit für den klinischen Alltag sind jedoch auch der Aspekt des schnellen Lernens sowie ein Kurzzeiterneffekt relevant.

Frage 1: Genereller Lernerfolg

Das erste Experiment dieser Studie untersuchte den generellen Lerneffekt über alle Studienteilnehmer auch im Hinblick auf die Reduktion der maximalen Abweichung vom Zielwert. Hier konnte gezeigt werden, dass im Mittel eine signifikante Reduktion des absoluten Fehlers $|AF|$ von Tag 1 zu Tag 3 von 28.69N (SD = 18.20N) auf 15.81N (SD = 9.77N) erreicht wurde. Nach Karni et al. (1998) ist davon auszugehen, dass eine Konsolidierung des Erlernen erfolgte. Diese Zeit (6-8 h), auch Konsolidierungsphase genannt, wird zum einen benötigt, um langfristige kortikale Veränderungen zu etablieren, zum anderen, damit ein „shift“ der Aktivierung vom präfrontalen motorischen Cortex zum prämotorischen Cortex, posterior parietalen Cortex und cerebellären Abschnitten des Cortex erfolgt (Shadmehr und Holcomb, 1997). Zudem werden gravierende Ausreißer minimiert. Die maximale Abweichung eines Probanden zum Zielpunkt von 80N verringerte sich über die drei Testtage (Tag 1 = 69.00N; Tag 2 = 53.33N; Tag 3 = 43.67N). Drei Probanden, die nicht innerhalb des 97.5%-Konfidenzintervalls lagen, wurden aus statistischen Gründen nicht in die Auswertung aufgenommen. Betrachtet man diese Werte, so wird deutlich, dass zwei Probanden beim Schätzen deutlich vom Zielwert von 80N entfernt lagen ($|AF| = 104.67N$ und $|AF| = 187.00N$). Diese enorme Abweichung vom Zielwert wurde von keinem Probanden wiederholt. Im Wiederholungstest zeigte sich an Tag 2 eine maximale Abweichung eines

Probanden von 53.33N; an Tag 3 von 48.67N – eine Messung, die ebenfalls aus der statistischen Auswertung genommen wurde.

Für medizinische-haptische Fertigkeiten spielt diese Erkenntnis eine wichtige Rolle. Fehleinschätzungen, die nur durch ein extrinsisches Feedback quantifiziert werden können, können durch Simulation und ein künstlich unterlegtes extrinsisches Feedback minimiert werden. Wie zu Anfang dieser Arbeit angesprochen, erlebt medizinisches Personal immer wieder Situationen, die haptische Fertigkeiten erfordern. Wie diese Arbeit zeigt, ist es möglich, in relativ kurzer Zeit eine isometrische Kraft zu erlernen, die im klinischen Alltag Verwendung findet und ohne Simulation nicht evaluiert werden kann, da kein objektives extrinsisches Feedback vorhanden ist.

Frage 2: Vorteil einer Feedbackform

Die Untersuchung der vier Feedbackformen hatte zum Ziel, die bestmögliche Feedbackform zum Erlernen der isometrischen Kraft zu ermitteln. Dabei kam diese Studie zu dem Ergebnis, dass sich die Feedbackgruppen *Auditiv_concurrent* und *Auditiv_terminal* signifikant über die Trainingstage verbesserten. Eine Erklärung dafür könnte die unterschiedliche Verarbeitung der extrinsischen Reize sein. Ein sehr viel geringerer Aufmerksamkeitsfokus bei auditivem Feedback gegenüber visuellem Feedback (Secoli, Milot, Rosati & Reinkensmeyer, 2011) könnte eine Erklärung bieten. In Verbindung mit der *guidance hypothesis*, die besagt, dass permanentes Feedback während des Erlernens einer Bewegung zu einer Abhängigkeit von dieser Feedbackform führt (Salmoni, 1984; Schmidt, 1991; Schmidt, Young, Swinnen & Shapiro, 1989), kann man suggerieren, dass der geringere Aufmerksamkeitsfokus bei auditivem Feedback zu einer geringeren Abhängigkeit von einem extrinsischen Feedback führt und somit auch weniger der *guidance hypothesis* unterliegt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Sigrist et al. (2015) bei komplexen Bewegungen. Letztendlich kann anhand dieser Studie vermutet werden, dass auditives Feedback zu besseren Ergebnissen in den Wiederholungstests führt und somit vorteilhaft bei der Erlernung einer isometrischen Kraftapplikation ist.

Die *specificity-of-learning hypothesis* besagt, dass für das Lernen immer die optimalste afferente Information herangezogen wird und diese dabei andere Informationsquellen überschattet (Proteau, 1992). Betrachtet man die Ergebnisse der Trainingszeiten, so wird deutlich, dass die Gruppen des auditiven Feedbacks längere Trainingszeiten benötigten als die

Gruppen des visuellen Feedbacks (siehe Abbildung 16). Daraus kann man schließen, dass visuelles Feedback eine zeiteffizientere extrinsische Informationsquelle für Bewegungen darstellt als auditives Feedback und somit andere afferente Informationsquellen überschattet, die für das Lernen von Bewegungen förderlich sein könnten. Auch schlechter Kontrast auf dem Bildschirm (bei visuellem Feedback) führt zu besseren Ergebnissen im Wiederholungstest gegenüber einer Gruppe mit optimalem visuellen Feedback (Robin et al., 2005). Robin und Kollegen erklärten das schlechtere visuelle Feedback als nicht optimale afferente Informationsquelle, das dazu führt, intrinsisches Feedback für die Entwicklung eines motorischen Programms zu verwenden (Robin et al., 2005). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Kovacs, Boyle, Grutmatcher & Shea (2010), die permanentes (visuelles) Feedback, womit Bewegungen schnell und zielgerichtet ausgeführt werden können, als nachteilig gegenüber sich langsam entwickelnden Bewegungen ohne permanentes Feedback ansehen, da diese nicht abhängig von äußeren Reizen sind und somit langfristig zu einem unabhängigen intrinsischen Bewegungsprogramm führen (Kovacs, Boyle, Grutmatcher & Shea, 2010). Auch gemessen am spinalen Informationsfluss dominiert das visuelle Feedback gegenüber auditivem oder haptischem Feedback (Nesbitt, 2003). Rein bezogen auf das visuelle Feedback können sich zusammenfassend die Vorteile der Feedbackgruppe Visuell_terminal gegenüber Visuell_concurrent dadurch erklären, dass die Gruppe Visuell_terminal weniger der guidance hypothesis unterliegt, was zu besseren Ergebnissen im Wiederholungstest führt.

Untersuchungen von Schmidt und Wulf zeigten, dass einfache Bewegungen schneller als komplexe Bewegungen durch permanentes visuelles Feedback erlernt wurden, in Wiederholungstests diesen jedoch unterlagen (Schmidt und Wulf, 1997). Bezogen auf das visuelle Feedback entspricht dies auch den Ergebnissen dieser Studie. Den Ergebnissen des auditiven Feedbacks nach müsste das auditive Feedback als schwieriger empfunden worden sein und das permanente auditive Feedback (Auditiv_concurrent) als schwieriger gegenüber der Gruppe Auditiv_terminal, um der Theorie von Schmidt und Wulf zu entsprechen (Schmidt und Wulf, 1997). Betrachtet man die Trainingszeiten (Abbildung 16) scheint dies auch zuzutreffen, wenn man die Trainingszeiten als objektives Maß für die Schwierigkeit heranzieht. Dies kann man mit der Theorie von Wulf vergleichen (Wulf, 2007), die besagt, dass je komplexer eine Bewegung ist, desto mehr profitiert sie von permanentem Feedback, wobei die Komplexität einer Bewegung auch maßgeblich durch die Freiheitsgrade der Bewegung definiert wird. Bezogen auf diese Studie und auf die isometrische Kraft sprechen

die Ergebnisse dafür, dass je schwieriger oder je zeitintensiver eine Feedbackmodalität in der Trainingsphase ist, desto besser sind die Ergebnisse im Wiederholungstest.

Bezogen auf den guidance effect ist es fraglich, warum bei den auditiven Gruppen das konkurrenente Feedback bei den Wiederholungstests besser abschneidet, da dieses Feedback eher einen leitenden Charakter als das zielbereichsorientierte auditive Feedback hat. Eine Antwort könnten Untersuchungen von Wulf & Shea (2002) sowie Todorov et al. (1997) geben, die postulieren, dass im Gegensatz zu einfachen Bewegungen, komplexe Bewegungen von permanentem Feedback profitieren und zur Entwicklung eines motorischen Programms beisteuern (Wulf & Shea, 2002; Todorov et al., 1997). Auch wenn diese Studien mit visuellem Feedback arbeiteten, sind sie eventuell auch auf auditives Feedback anzuwenden, wenn man, wie zuvor erläutert, von einer höheren Schwierigkeit des auditiven Feedbacks ausgeht. Zusammenfassend, und bezogen auf diese Arbeit, kann man visuelles Feedback als eine einfachere Aufgabe gegenüber auditivem Feedback, bei einer insgesamt einfachen Bewegung, darstellen.

Bezogen auf die Aufmerksamkeit während des motorischen Lernens gibt es Vertreter der Meinung, dass auch in der frühen Lernphase eine Ablenkung von der fertigungsbezogenen Aufmerksamkeit von Vorteil sein kann, da Automatismen schneller greifen und unter Stresssituationen besser ausgeführt werden (Masters, 1992). Masters spricht von einer Hypothese der bewussten Verarbeitung (Masters, 2000). Der explizite Aufmerksamkeitsfokus beim Lernen an Simulatoren mit bewegungsbezogenem Feedback ist somit von Vorteil und auch im klinischen Alltag von Bedeutung, da auch in Stressbedingungen optimale haptische Leistungen gefordert werden. So konnten diverse Studien von Wulf (1998; 1999, 2003) zeigen, dass ein expliziter Aufmerksamkeitsfokus, d.h. Aufmerksamkeit auf den Bewegungseffekt, vorteilig gegenüber einem impliziten Aufmerksamkeitsfokus ist, bei dem die Aufmerksamkeit auf der Bewegungsausführung liegt. Beim gezielten Wurf eines Balles ist beispielsweise die Aufmerksamkeit entweder auf das Landen des Balles im Ziel (Bewegungseffekt) oder auf die Bewegungsausführung gerichtet (Wulf, Höß und Prinz, 1998; Shea und Wulf, 1999; Totsika und Wulf, 2003). In ihrem Buch „Aufmerksamkeit und motorisches Lernen“ (Wulf, 2009) spricht sie von einer großen Bedeutung dieser Kenntnisse für das Lernen an Simulatoren. Ihre Constrained-Action-Hypothese besagt: ein interner Fokus auf die Bewegung stellt einen bewussten Eingriff in die Kontrollprozesse dar und ist hinderlich für das Lernen und Ausführen einer automatisierten Bewegung. Ein externer Fokus dagegen, d.h. ein Fokus auf den Bewegungseffekt, ist förderlich. Diese Theorie steht jedoch

der guidance hypothesis gegenüber, die Gegenteiliges behauptet. Es gilt dies genauer zu betrachten. Der Aufmerksamkeitsfokus bei visuellem Feedback unterscheidet sich darin, ob der Fokus auf dem Feedback (explizit) oder der motorischen Aufgabe (implizit) liegt. Dabei kann dasselbe extrinsische Feedback wiedergegeben werden, der instruierte Fokus aber ein anderer sein. In dieser Arbeit wurde dazu keine Instruktion gegeben. Es kann jedoch vermutet werden, dass bei konkurrentem Feedback (Visuell_concurrent, Auditiv_concurrent) der Fokus eher explizit, bei zielbereichsorientiertem Feedback (Visuell_terminal, Auditiv_terminal) eher implizit liegt. Nach Wulfs Theorie müssten demnach die Gruppen Visuell_concurrent und Auditiv_concurrent besser abschneiden als Visuell_terminal und Auditiv_terminal. Wie die Ergebnisse aber zeigen, ist die Gruppe Visuell_concurrent bei den Wiederholungstests die schlechteste (vereinbar mit der guidance hypothesis) und Auditiv_concurrent die beste Feedbackgruppe (vereinbar mit der Constrained-Action-Hypothese von Wulf). Angesichts der Tatsache, dass in den Studien, die diese Hypothesen aufstellten, visuelle Feedbackformen verwendet wurden, gilt es diese bei auditivem Feedback zu überdenken, was die Ergebnisse dieser Studie zeigen.

Frage 3: Kurzzeiteffekt

Nach Fitts (1964) ist eine Bewegung gelernt, wenn auf lange Sicht ein motorisches Programm etabliert ist und Automatismen greifen. Die isometrische Kraftapplikation ist als eine Sonderform der Bewegung anzusehen, da sie wie eine Bewegung dynamische Prozesse (z.B. Muskelanspannung) enthält, jedoch im Gegensatz zu einer Bewegung keine metrischen Änderungen hervorruft. Im klinischen Alltag kann jedoch auch die kurzzeitige Reproduktion einer Bewegung oder Kraft von wichtigem Nutzen sein. So ist es denkbar, dass vor neuen, selten ausgeführten oder besonders schwierigen medizinischen Eingriffen an Simulatoren trainiert wird, um sich kurzfristig mit der Bewegung oder der Kraft vertraut zu machen und sie in optimaler Weise zu reproduzieren.

Unter Frage 3 wird dieser Kurzzeiteffekt auf seine Effektivität untersucht. Wie zuvor beschrieben, erhielten die Testpersonen ein einmaliges Feedback, nachdem sie die Kraft von 80N schätzten (Tag 1 Schätzen). Direkt im Anschluss wurden die Testpersonen erneut ohne Feedback getestet (Test nach 1x Feedback). Die Fragestellung hinter diesem Versuch war, welchen Effekt das einmalige Feedback bei einer zuvor unbekanntem Kraft hatte. Abbildung 12 verdeutlicht, dass einmaliges Feedback zu einer durchschnittlichen Reduktion des $|AF|$, d.h. der absoluten Abweichung vom Zielbereich, um ca. 45% führte. Bezogen auf den

klinischen Alltag kann eine zuvor unbekannte Kraft mit nur einer einzigen Übung an einem Simulator mit extrinsischem Feedback reproduziert werden, vorausgesetzt die Anwendung findet unmittelbar nach der Übung statt. Das motorische Kurzzeitgedächtnis kann durch Adams closed-loop-Theorie (Adams, 1971) beschrieben werden, wobei dieser Feedbackregelkreis die tatsächliche mit der geplanten Bewegung permanent vergleicht und bei Bedarf korrigiert. Bei neuen oder ungelernten Bewegungen ist dieser Regelkreis hochaktiv und somit die Bewegungen noch langsam und nicht automatisiert. Im Falle einer isometrischen Kraftapplikation aus dem Kurzzeitgedächtnis werden wohl diese Regelkreise auch bei der Reproduktion eine bedeutende Rolle spielen, da das motorische Programm noch nicht etabliert und automatisiert ist. Dieser Versuch hat eine anwendungsorientierte Auslegung, da er sich auf diverse klinische Fertigkeiten anwenden lässt. Speziell unerfahrene Personen ohne ein etabliertes automatisiertes motorisches Programm, welche eine isometrische Kraft anwenden sollen, können von einer simulierten Kraftapplikation mit extrinsischem Feedback im klinischen Alltag profitieren und somit Risiken minimieren.

Abbildung 13 zeigt den Vergleich des |AF| zwischen Tag 1 „Einschätzung“ und Tag 1 „nach Training“. Das Schaubild verdeutlicht, dass durch Training eine weitere Reduktion des |AF| um ca. 29% im Vergleich zu einmaligem Feedback erreicht wurde. Bezogen auf die Anwendbarkeit zeigen diese Ergebnisse, dass sowohl ein einmaliges Feedback als auch ein Training im klinischen Alltag dazu führen könnten, Fertigkeiten kurzfristig zu erlernen und auf eine sehr viel effektivere Weise am Patienten anzuwenden. Dass motorische Fertigkeiten, die kurzfristig erlernt wurden, bei ausreichend Training auch zu einer langfristigen Etablierung eines motorischen Programms führen, wurde bereits in o.g. Abschnitt beschrieben. Die weitere Reduktion des |AF| nach Training an Tag 2 und Tag 3 im Vergleich zu den Wiederholungstests des jeweiligen Tages sowie die stetige Verbesserung im Vergleich zu den Vortagen, zeigt sich auch in der signifikanten Steigerung der Fertigkeiten zwischen Tag 1 „nach Training“ und Tag 3 „nach Training“ ($M = 11.31N$, $M = 8.40N$, $SD 8.50N$, $p = 0.036$). Die stetige Verbesserung hinsichtlich des |AF| nach den Trainingseinheiten in absoluten Zahlen zeigt auch, dass es zu einer Etablierung eines motorischen Programms kommt, welches stetig angepasst und verbessert werden kann. Auch ohne eine Signifikanz an Tag 3 zwischen den Testzyklen vor und nach dem Training zu erreichen, zeigt sich eine Verbesserung in absoluten Zahlen.

Frage 4: Analyse der Trainingszeiten

Eine Analyse der Trainingszeiten der jeweiligen Feedbackgruppen kann als objektives Maß für den Schwierigkeitsgrad der Feedbackform herangezogen werden. Betrachtet man die Ergebnisse der Trainingszeiten, wird der Vorteil in der Handhabung eines visuellen Feedbacks deutlich. Sowohl an Tag 1 als auch an Tag 2 zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den zwei auditiven Feedbackgruppen (Auditiv_concurrent und Auditiv_terminal) und der Gruppe Visuell_concurrent. Diese Ergebnisse korrelieren mit Nesbitts Ergebnissen zum spinalen Informationsfluss, wonach das visuelle Feedback gegenüber auditivem oder haptischem Feedback dominiert (Nesbitt, 2003). Nach der Theorie von Nakahara werden visomotorische Aufgaben über die präfrontale Schleife schneller erlernt als über die motorische Schleife. Sobald eine sequentielle Bewegung erlernt ist, kann sie demgegenüber aber schneller und verlässlicher über die motorische Schleife ausgeführt werden (Nakahara et al., 2001). Zu diskutieren ist, ob ein schnelleres Lernen über die visomotorische Schleife auch Vorteile in der Konsolidierung einer motorischen Aufgabe bzw. eines motorischen Programms im Vergleich zu auditivem Feedback hat. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen das Gegenteil, wie unter der Diskussion zu Frage 1 zu lesen ist.

Vergleicht man die Kurzzeiteffekte, so zeigt sich an Tag 1 ein Vorteil der zwei visuellen Gruppen nach dem Training im Vergleich zu den auditiven Gruppen. Die visuellen Gruppen bleiben auf diesem Niveau um ca. $10N |AF|$ zum Zielbereich über die weiteren Trainingstage (siehe Abbildungen 13-15, Tag 1-3/Kurzzeiteffekte), die auditiven Gruppen verbessern sich konstant und sind an Tag 3 nach der Trainingseinheit in absoluten Zahlen besser als die visuellen Gruppen (siehe Abbildung 15, Tag 3/Kurzzeiteffekte). Dies könnte für einen Vorteil der visuellen Gruppe in der schnellen Konsolidierung einer Kraft sprechen, im langfristigen Verlauf zeigt sich jedoch das auditive Feedback vorteilig, auch im Hinblick auf die Kurzzeiteffekte. Dies könnte für die bessere Konsolidierung des motorischen Programms im Langzeitgedächtnis sprechen, an welche die Trainingseinheiten anknüpfen können. Somit könnte das Ausgangsniveau höher sein und die Trainingseinheiten der weiteren Feinabstimmung dienen.

Entgegen der Hypothese von Proteau (1992), die besagt, dass immer die optimale afferente Informationsquelle verwendet wird, zeigt die Zeitanalyse in Verbindung mit den Ergebnissen, dass „optimal“ nicht linear mit einer geringeren Trainingsschnelligkeit korreliert. Entscheidend ist das Ergebnis der Wiederholungstests. So, wie es wahrscheinlich bei Robin et

al. (2005) schwieriger war, eine Bewegung mit schlechterem Kontrast auf dem Bildschirm in der Trainingsphase durchzuführen und dafür naheliegender auch mehr Zeit verwendet wurde, zeigt sich in den Wiederholungstests ein besseres Ergebnis. Die Untersuchungen dieser Studie könnten ein Hinweis darauf sein, dass die Trainingszeit als ein weiterer Parameter in zukünftigen Studien nicht unbeachtet bleiben darf und in der Analyse der optimalen Feedbackform hilfreich sein kann.

Frage 5: Halbjahres-Wiederholungstest

Sechs Monate nach der dreitägigen Test- und Trainingsphase wurden die Probanden erneut zu einem Wiederholungstest aufgerufen. 13 Probanden konnten dafür gewonnen werden. Trotz der relativ kleinen Fallzahl wurden die Ergebnisse analysiert.

Signifikanzen bei dieser geringen Fallzahl sind nicht zu ermitteln, jedoch ist eine Tendenz zu erkennen. Die auditiven Gruppen haben im Gegensatz zu den visuellen Gruppen keine deutlichen Ausreißer und bewegen sich in einem nahen Spektrum um den Zielwert. In der Testgruppe Auditiv_concurrent zeigt sich eine maximale Abweichung zum Zielwert von 15.17N (M = 11.31N); in der Testgruppe Auditiv_terminal von 25.41N (M = 13.57N). Dagegen gibt es sowohl in der Testgruppe Visuell_concurrent (M = 43.85N) als auch in der Testgruppe Visuell_terminal (M = 24.9N) maximale Abweichungen zum Zielwert von 58.52N und 56.76N. Dies könnte für einen Vorteil des auditiven Feedbacks gegenüber dem visuellen Feedback in der langfristigen Konsolidierung eines motorischen Programms während der vor einem halben Jahr durchgeführten Test- und Trainingsphase sprechen.

5.2 Kritik und Schwächen

40 Testpersonen auf vier Feedbackgruppen sind eine sehr kleine Fallzahl, um definitive Aussagen zu Vorteilen einer Feedbackform gegenüber einer anderen Feedbackform zu machen. Unglücklicherweise gab es aus technischen Gründen Fehlmessungen, die auch nicht wiederholt werden konnten, da anschließendes Feedback die Aussagen der Wiederholungstests (Tag 2, Tag 3) bzw. des Schätzens (Tag 1) verfälschen. Diese Messwerte wurden als ungültig gewertet und aus der statistischen Berechnung ausgeschlossen. Wie in der Analyse beschrieben, wurden zudem Ausreißer aus Gründen der Normalverteilung aus der

statistischen Wertung genommen. Die dadurch bedingten kleineren Fallzahlen erschweren definitive Vorhersagen. Die Fallzahlen sind aber vergleichbar, bzw. übertreffen die Fallzahlen von vergleichbaren, in Fachjournalen bisher publizierten Studien.

5.3 Medizinische Anwendbarkeit

Der Nutzen dieser Arbeit bezieht sich auf haptische Fertigkeiten im klinischen Alltag. Die Ergebnisse der Schätzung zu Beginn der Studie verdeutlichen, wie sehr die subjektive Einschätzung einer Kraft von Person zu Person variiert. Die zuvor schon erwähnte australische Studie (Vacca, 2006) zu Kräften bei der vaginal-operativen Entbindung und damit verbundenen Geburtsverletzungen unterstreicht die Wichtigkeit im klinischen Alltag. Medizinische Anwendungen, die Zug- oder Druckkräfte beinhalten, stellen beispielsweise in der Orthopädie die Repositionsmanöver nach Luxation dar. Zu starke Kräfte verursachen iatrogene Schäden, zu schwache Kräfte erfordern sekundäre Maßnahmen wie eine Reposition unter Narkose. Ein weiteres Beispiel ist die Kürettage des Uterus. Dabei wird die Gebärmutter manuell ausgetastet, und es erfordert ein Zusammenspiel von ausreichender Kraftaufwendung zur Gewinnung von Gewebeproben bzw. der Entfernung von Gewebe und nicht zu hoher Kraftaufwendung, welche mit der Gefahr einer Perforation des Uterus mit Konsequenzen wie Blutungen und Organschäden einhergehen kann. Als Beispiel kann auch eine Anwendung in der ösophagogastrroduodenalen Endoskopie dienen. Die als „Bougierung“ bezeichnete Dehnung einer Engstelle, z.B. einer gastroösophagealen Anastomose, erfordert einen wohldosierten Druck auf den Bougierungsstab, um die gewünschte Dehnung der Engstelle, meist Narbengewebe, zu erreichen, ohne jedoch schwerwiegende Gewebsverletzungen mit Komplikationen, wie z.B. Blutungen, zu verursachen.

Tabelle 6: Beispielhafte Anwendung haptischer Fertigkeiten in ausgewählten Fachbereichen.

Anästhesie	Intubation, Legen eines Periduralkatheters, Legen einer arteriellen/venösen Verweilkanüle, Legen eines zentralen Venenkatheters
Chirurgie	Bougierung von angeborenen oder erworbenen Engstellen (z.B. Ösophagus, Magenausgang, Enddarm), Einführen der Trokare bei laparoskopischen Operationen
Gynäkologie und Geburtshilfe	Vakuumentzug bei der vaginal-operativen Geburt, Kristeller-Hilfe, Bougierung der Zervix bei transzervikalen Eingriffen (z.B. Hysteroskopie), Kürettage der Gebärmutter, Einführen der Trokare bei laparoskopischen Operationen
Orthopädie und Unfallchirurgie	Reposition von luxierten Gelenken wie Schulter oder Hüfte, Dosierung der Kraft beim Einbringen eines Knochennagels, angemessene Dosierung der Kraft bei der körperlichen Untersuchung
Kardiologie	Einbringen einer Katheterschleuse, kardiopulmonale Reanimation, präkordialer Faustschlag
Urologie	Bougierung der Harnröhre bei der Harnröhrenstriktur

Diese Arbeit konnte zeigen, dass durch Training an Simulatoren Anwendungen trainiert werden können, die es erlauben, Zug- oder Druckkräfte sehr viel genauer zu dosieren – sowohl kurzfristig, was die unmittelbare Anwendung sehr präzise macht, als auch langfristig, was zu einer haptischen Fertigkeit führt, die dann unabhängig von kurzfristigem Feedback ausgeführt werden kann.

Literaturverzeichnis

Adams, J. A. (1971). A closed - loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior* 3, 2, 111-149.

Alexander, G. E., Crutcher, M. D. (1990). Functional architecture of basal ganglia circuits: neural substrates of parallel processing. *Trends Neurosci.* 13, 7, 266-71.

Bartus, R. T., Dean III, R. L., Beer, B., Lippa, A.S. (1982). The cholinergic hypothesis of geriatric memory dysfunction. *Science* 217, 408-417.

Bernier, P. M., Chua, R., Franks, I. M. (2005). Is proprioception calibrated during visually guided movements? *Experimental Brain Research*, 167(2), 292–296.

Bernstein, N. (1967). *The Co - ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, NY.

Blandin, Y., Toussaint, L., & Shea, C. H. (2008). Specificity of practice: Interaction between concurrent sensory information and terminal feedback. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(4), 994–1000.

Boecker, H., Dagher, A., Ceballos-Baumann, A. O., Passingham, R. E., Samuel, M., Friston, K. J., Poline, J.P., Dettmers, C., Conrad, B., Brooks, D. J. (1998). The role of human rostral SMA and the basal ganglia in motor sequence control: Investigatios with H215O PET. *J. Neurophysiol.* 79, 1070-1080.

Botden, S. M., et al. (2008). The importance of haptic feedback in laparoscopic suturing training and the additive value of virtual reality simulation. *Surg Endosc* 22(5): 1214-1222.

Brooks, V. B. (1990). Limbic assistance in task-related use of motor skill. In: Eccles, J. C., Creutzfeld, O. D. (eds) *The principles of design and operation of the brain. Exp Brain Res*,

Series 21, 343-368.

Burke J.L., Prewett M.S., Gray A.A., Yang L., Stilson F.R.B., Coovert M.D., Elliot L.R., Redden E. (2006). Comparing the effects of Exp Brain Res (2015) 233:909–925 923 *visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: a meta-analysis*. In: *Proceedings of the 8th international conference on multimodal interfaces, New York, NY, USA*, pp 108–117.

Chiviawosky, S., & Wulf, G. (2005). Self-controlled feedback is effective if it is based on the learner's performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 76(1), 42–48.

Chiviawosky, S., & Wulf, G. (2007). Feedback after good trials enhances learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 78, 40–47.

Chiviawosky, S., Wulf, G. (2002). Self-controlled feedback: Does it enhance learning because performers get feedback when they need it? *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73(4), 408–415.

Crowell, H. P., & Davis, I. S. (2011). Gait retraining to reduce lower extremity loading in runners. *Clinical Biomechanics*, 26(2), 78–83.

Damasio, A. R., Eslinger, P. J., Damasio, H., van Hoesen, G. W., Cornell, S. (1985). Multimodal amnesic syndrome following bilateral temporal and basal forebrain damage. *Arch Neurol* 42, 252-259.

Damasio, A. R., Graff-Radford, N. R., Eslinger, P. J., Damasio, H., Kassell, N. (1985). Amnesia following basal forebrain lesions. *Arch Neurol* 42, 263-271

Dehabadi, M., et al. (2014). The use of simulation in the acquisition of laparoscopic suturing skills. *Int J Surg* 12(4): 258-268.

Deiber, M., Ibanez, V., Honda, M., Sadato, N., Raman, R., Hallet, M. (1999). Mesial motor areas in self-initiated versus externally triggered movements examined with fMRI: Effect of

movement type and rate. *J. Neurophysiol.* 81, 3065-3077.

Eichenbaum, H., Otto, T., Cohen, N. J. (1992) The hippocampus - what does it do? *Behav Neurol Biol* 57, 2-36.

Fitts, P. M. (1964) *Perceptual-motor skills learning*. Welto AW (ed) Categories of Human Learning. Academic Press, New York.

Fowler, C.A., Turvey M.T. (1978) Skill acquisition: An event approach with special reference to searching of the optimum of a function of several variables. *Information processing in motor control and learning*. Stelmach GE (Ed.) Academic Press, NY.

Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: cross-modal functions information complexity memory and deficit. *Psychol Bull* 81(5):284–310.

Gallwey W. T. (1982). *The inner game of tennis*. New York: Bantam Books.

Garfield, C. A., Bennett, H. A. (1985). *Peak performance: Mental training techniques of the world's greatest athletes*. Los Angeles: Tarcher.

Graff-Radford, N. R., Tranel, D., van Hoesen, G. W., Brandt, J. P. (1990) Diencephalic amnesia. *Brain* 113, 1-25.

Graybiel, A. M. (1998) The basal ganglia and chunking of action repertoires. *Neurobiol. Learn. Mem.* 70, 119-36.

Griffin, D. R. (1958). Listening in the dark: the acoustic orientation of bats and men.

Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge point: A framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 212–224.

Hellbrück, J., & Ellermeier, W. (2004). *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie*.

Hogrefe Verlag.

Heuer, H., Hegele, M. (2008). Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice. *Experimental Brain Research*, 185(1), 101–110.

Hikosaka, O. (2002) A new approach to the functional systems of the brain. *Epilepsia*, 43, Suppl 9, 9-15.

Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M. K., Sakai, K., Lu, X., Nakamura, K., Miyachi, S., Doya, K. (1999) Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends Neuroscience* 22, 10, 464-71.

Hodges, N. J., Franks, I. M. (2001). Learning a coordination skill: Interactive effects of instruction and feedback. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 72, 132-142.

Janelle, C. M., Kim, J., & Singer, R. N. (1995). Subject-controlled performance feedback and learning of a closed motor skill. *Perceptual and Motor Skills*, 81(2), 627–634.

Jueptner, M., Weiller, C. (1998) A review of differences between basal ganglia and cerebellar control of movements as revealed by functional imaging studies. *Brain* 121, 1437-49.

Jueptner, M., Weiller, C. (1998). A review of differences between basal ganglia and cerebellar control of movements as revealed by functional imaging studies. *Brain* 121 (Pt 8): 1437-1449.

Karni, A., Bertini, G. (1997) Learning perceptual skills: behavioral probes into adult cortical plasticity. *Curr. Opin. Neurobiol.* 7, 530-5.

Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M., Turner, R., Ungerleider, L. G. (1998) The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95, 861-8.

- Kihlstrom, J. F. (1987) The cognitive unconscious. *Science* 237, 1445-237.
- Kleim, J. A., Cooper, N. R., VandenBerg, P. M. (2002) Exercise induces angiogenesis but does not alter movement representations within rat motor cortex. *Brain Res.* 26, 934 (1) 1-6.
- Kovacs, A. J., Boyle, J., Grutmatcher, N., Shea, C. H. (2010). Coding of on-line and pre-planned movement sequences. *Acta Psychologica*, 133(2), 119–126.
- Kovacs, A. J., Shea, C. H. (2011). The learning of 90° continuous relative phase with and without lissajous feedback: External and internally generated bimanual coordination. *Acta Psychologica*, 136(3), 311–320.
- Lavery, J. J. (1962). Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. *Canadian Journal of Psychology*, 16, 300–311.
- Lavery, J. J., & Suddon, F. H. (1962). Retention of simple motor skills as a function of the number of trials by which KR is delayed. *Perceptual Motor Skills*, 15, 231–237.
- Leavitt, J. L. (1979). Cognitive demands of skating and stickhandling in ice hockey. *Canadian Journal of Applied Sports Science*, 4, 46-55.
- Lederman, S. J., Klatzky, R. L. (1987) Hand movements: a window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology* 19, 342-368.
- Lee, K. M., Chang, K. H., Roh, J. K. (1999) Subregions within the supplementary motor area activated at different stages of movement preparation and execution. *Neuroimage* 9, 1, 117-23.
- Liebermann, D.G., Katz, L., Hughes, M. D., Bartlett,R.M., McClements, J., Franks, I.M. (2002). Advances in the application of information technology to sport performance. *Journal of Sports Sciences*, 20(10), 755–769.

- Lisberger, S. G. (1988) The neural basis for learning of simple motor skills. *Science* 242, 728-735.
- Lopez-Larraz, E., et al. (2011). EEG single-trial classification of visual, auditive and vibratory feedback potentials in Brain-Computer Interfaces. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2011*: 4231-4234.
- Masters, R. S. W. (1992). Knowledge, knerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British Journal of Psychology*, 83, 343-358.
- Masters, R. S. W. (2000). Theoretical aspects of implicit learning in sport. *International Learning of Sport Psychology*, 31, 530-541.
- McNevin, N. H., Shea, C. H., Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research*, 67, 22-29.
- Miller, G. A. (1956) The magic number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychol. Rev.* 63, 81-97.
- Nakahara, H., Doya, K., Hikosaka, O. (2001) Parallel cortico-basal ganglia mechanisms for acquisition and execution of visuomotor sequences - a computational approach. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13 (5) 626-47.
- Nakamura, K., Sakai, K., Hikosaka, O. (1998) Neuronal activity in medial frontal cortex during learning of sequential procedures. *Journal of Neurophysiology*. 80, 2671-2687.
- Nesbitt, K. (2003). *Designing multi-sensory displays for abstract data*. PhD thesis, School of Information Technologies, University of Sydney, Australia.
- O'Malley, M. K., & Gupta, A. (2008). *Haptic interfaces* (pp. 25–74). Morgan-Kaufman Publisher.

Park, J. H., Shea, C. H., Wright, D. L. (2000). Reduced-frequency concurrent and terminal feedback: A test of the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 32(3), 287–296.

Pear, T. H. (1927). Skill. *Journal of Personnel Research*, 5, 478-489.

Pijpers, J.J., Oudejans, R.R., Bakker, F.C. (2005). Anxiety-induced changes in movement behavior during the execution of a complex wholebody task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 421-445.

Proteau, L. (1992). *Vision and motor control, volume 85, chapter 4: On the specificity of learning and the role of visual information for movement control* (pp. 67–103). Amsterdam: North-Holland.

Proteau, L. (2005). Visual afferent information dominates other sources of afferent information during mixed practice of a video-aiming task. *Experimental Brain Research*, 161, 441–456.

Proteau, L., & Isabelle, G. (2002). On the role of visual afferent information for the control of aiming movements toward targets of different sizes. *Journal of Motor Behavior*, 34(4), 367–384.

Ranganathan, R., Newell, K. M. (2009). Influence of augmented feedback on coordination strategies. *Journal of Motor Behavior*, 41(4), 317–330.

Richter, W., Andersen, P. M., Georgopoulos, A.P., Kim, S.G. (1997) Sequential activity in human motor areas during a delayed cued finger movement task studied by time resolved fMRI. *Neuroreport* 8, 1257-1261.

Rioul-Pedotti, M. S., Friedman, D., Donoghue, J. P. (2000) Learning-induced LTP in neocortex. *Science* 290, 5491, 533-6.

Rizzolatti, G., Luppino, G., Matelli, M. (1996) The classic SMA is formed by two independent areas, *Advance in Neurology, Vol. 70: Supplementary sensorimotor area*.

Luders HO (Ed.) pp.45-56, Lippincott-Raven, Philadelphia.

Robin, C., Toussaint, L., Blandin, Y., & Proteau, L. (2005). Specificity of learning in a video-aiming task: Modifying the salience of dynamic visual cues. *Journal of Motor Behavior*, 37(5), 367–376.

Salmoni, S. (1984). Knowledge of results and motor learning. A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95(3), 355–386.

Schaffert, N., Mattes, K., Effenberg, A.O. (2011). An investigation of online acoustic information for elite rowers in on-water training conditions. *J Hum Sport Exerc* 6(2):392–405.

Schmidt, R. A. (1991). Frequent augmented feedback can degrade learning: Evidence and interpretations. *Tutorials in Motor Neuroscience*, 62, 59–75.

Schmidt, R. A., & Wulf, G. (1997). Continuous concurrent feedback degrades skill learning: Implications for training and simulation. *Human Factors*, 39(4), 509–525.

Schmidt, R. A., Young, D. E., Swinnen, S., & Shapiro, D. C. (1989). Summary knowledge of results for skill acquisition: Support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 15(2), 352–359.

Schmidt, R.A. (1976) Control processes in motor skills. *Exercise Sport Sci Rev* 4, 229-261.

Schmitz, G., Mohammadi, B., Hammer, A., Heldmann, M., Samii, A., Munte, T., Effenberg, A. (2013). Observation of sonified movements engages a basal ganglia frontocortical network. *BMC Neurosci* 14(1):1–11.

Schmidt, R., Wrisberg, C. (2008) *Motor learning and performance: A situation-based learning approach*. Human Kinetics Publishers.

Secoli, R., Milot, M., Rosati, G., & Reinkensmeyer, D. (2011). Effect of visual distraction and auditory feedback on patient effort during robot-assisted movement training after stroke.

Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 8(1), 1–10.

Seitz, A. R., Dinse, H. R. (2007) A common framework for perceptual learning. *Curr Opin Neurobiol* 17(2):148–153.

Seitz, R. J., Canavan, A. G., Yaguez, L., Herzog, H., Tellmann, L., Knorr, U., Huang, Y., Homberg, V. (1997) Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *Eur. J. Neurosci.* 9, 2, 378-89.

Shadmehr, R., Holcomb, H. H. (1997). Neural correlates of motor memory consolidation. *Science.* 277, 5327, 821-5.

Shea, C. H., Wulf, G. (1999). Enhancing motor learning through external-focus instructions and feedback. *Human Movement Science*, 18, 553-571.

Sigrist, R., Rauter, G., Marchal-Crespo, L., Riener, R., Wolf, P. (2015). Sonification and haptic feedback in addition to visual feedback enhances complex motor task learning. *Experimental Brain Research, Volume 233, Issue 3*, pp 909-925.

Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., Wolf, P. (2013). Augmented visual auditory haptic and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychon Bull Rev* 20: 21–53.

Singer, R. N., Lidor, R., Cauraugh, J. H., (1993). To be aware or not aware: what to think about while learning and performing a motor skill. *Sport Psychologist*, 7, 19-30.

Smith, M. D., Chamberlin, C. J. (1992). Effect of adding cognitively demanding tasks on soccer skill performance." *Percept Mot Skills* 75(3 Pt 1): 955-961.

Squire, L. R. (1986). "Mechanisms of memory." *Science* 232 (4758): 1612-1619.

Sulzenbruck, S., & Heuer, H. (2011). Type of visual feedback during practice influences the precision of the acquired internal model of a complex visuo-motor transformation.

Ergonomics, 54(1), 34–46.

Thompson, R. F. (1986) The neurobiology of learning and memory. *Science* 233, 941-947.

Todorov, E., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1997). Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task. *Journal of Motor Behavior*, 29(2), 147–158.

Totsika, V., Wulf, G. (2003). The influence of external and internal foci of attention on transfer to novel situation and skills. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74, 220-225.

Trepel, M. (2015). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*. 6. Auflage Urban & Fischer, Elsevier 978-3-437-41287-5.

Tulving E (1991) Concepts of human memory. In: *Memory: organization and locus of change*. Squire, L. R., Weinberger, N. M., Lynch, G., McGauch, J. L. (eds) Oxford University Press, pp 3-32.

Utley, A., & Astill, S. (2008). *Motor control, learning and development*. BIOS Instant Notes. Taylor & Francis.

Vacca, A. (2006). "Vacuum-assisted delivery: an analysis of traction force and maternal and neonatal outcomes." *Aust N Z J Obstet Gynaecol* 46(2): 124-127.

Van der Linden, D. W., Cauraugh, J. H., & Greene, T. A. (1993). The effect of frequency of kinetic feedback on learning an isometric force production task in nondisabled subjects. *Physical Therapy*, 73(2), 79–87.

Vance, J., Wulf, G. Töllner, T., McNevin, N. H., Mercer, J. (2004). EMG activity as a function of the performer's focus of attention. *Journal of Motor Behavior*, 36, 450-459.

Verdaasdonk, E. G., et al. (2008). "Transfer validity of laparoscopic knot-tying training on a

VR simulator to a realistic environment: a randomized controlled trial." *Surg Endosc* 22(7) 1636-1642.

Vuillerme, N., Nafati, G. (2005). How attentional focus in body sway affects postural control during quiet standing. *Psychological Research*, 69, 1-9.

Weber, B., et al. (2010). "Vibrotaktiler Feedback zur Aufmerksamkeitslenkung bei komplexen Lotsentätigkeiten." *DGLR-Bericht 2010/06*.

Welch, R.B., Warren, D.H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychol Bull* 88(3): 638–667.

Wilhelm, D. M., et al. (2002). "Assessment of basic endoscopic performance using a virtual reality simulator." *J Am Coll Surg* 195(5): 675-681.

Winstein, C. J., Pohl, P. S., Cardinale, C., Green, A., Scholtz, L., Waters, C. S. (1996). Learning a partial-weight-bearing skill: Effectiveness of two forms of feedback. *Physical Therapy*, 76 (9), 985–993.

Wulf, G. (2007). Aufmerksamkeit und motorisches Lernen. *Elsevier, Urban und Fischer Verlag*.

Wulf, G., Höß, M., Prinz, W. (1998). Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention. *Journal of motor behavior*, 30, 169-179.

Wulf, G., Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(2), 185–211.

Zatorre, R.J., Chen, J.L., Penhune, V.B. (2007). When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production. *Nat Rev Neurosci* 8(7): 547–558.