

**Valenzabhängige Effekte normativen Feedbacks auf die Präzisionsleistung und Automatisierung beim motorischen Lernen**

**Dissertation**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doctor philosophae  
(Dr. phil.)

Universität Paderborn  
Fakultät für Naturwissenschaften  
Department Sport & Gesundheit

vorgelegt von  
Christina Zobe  
geb. am 08. April 1987 in Paderborn

Gutachter:

Prof. Dr. Norbert Olivier; Universität Paderborn

Prof. Dr. Klaus Blischke; Universität des Saarlandes

Paderborn, im April 2017

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>1 Problemstellung</b> .....	<b>1</b>
1.1 <i>Aufbau der Arbeit</i> .....	4
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>6</b>
2.1 <i>Motorisches Lernen</i> .....	7
2.1.1 Phasen des motorischen Lernens.....	11
2.1.2 Motorisches Lernen messen .....	15
2.1.3 Zusammenfassung.....	19
2.2 <i>Automatisierung als bedeutender Teilaspekt des motorischen Lernens</i> .....	20
2.2.1 Aufmerksamkeitstheorien und Arbeitsgedächtnismodelle .....	21
2.2.1.1 Ein-Kanal-Theorien bzw. Filtertheorien .....	23
2.2.1.2 Theorien zentraler Kapazität .....	26
2.2.1.3 Modulare Theorien .....	29
2.2.1.4 Synthesetheorien .....	33
2.2.1.5 Zusammenfassung und kritische Betrachtung .....	38
2.2.2 Automatizitätstheorien.....	41
2.2.2.1 Automatische Bahnung und kontrollierte Hemmung (Posner & Snyder, 1975).....	42
2.2.2.2 Automatische und kontrollierte Verarbeitungsprozesse (Schneider & Shiffrin, 1977 und Shiffrin & Schneider, 1977).....	45
2.2.2.3 Kritik an den Zwei-Prozess-Theorien .....	49
2.2.2.4 Automatizität als Kontinuum (Logan, 1985).....	53
2.2.2.5 Automatizität als Gedächtnis-retrieval (Logan, 1988).....	54
2.2.2.6 Parallel neural network model (Hikosaka et al., 1999 & 2002) .....	56
2.2.2.7 Uni- und multidimensionales System (Keele et al., 2003) .....	64
2.2.2.8 Neuronale Korrelate des motorischen Lernens und der Automatisierung .....	74

2.2.2.9	Zusammenfassung und kritische Betrachtung .....	80
2.2.3	Automatizität messen .....	81
2.3	<i>Motorisches Lernen durch Feedback</i> .....	86
2.3.1	Feedback-Valenz .....	89
2.3.2	Neurophysiologische Erkenntnisse zur Feedback-Valenz .....	95
2.3.3	Motorisches Lernen und Feedback-Valenz .....	103
2.3.3.1	Selbstkontrolliertes Feedback .....	104
2.3.3.2	Feedback nach guten bzw. schlechten Versuchen .....	107
2.3.3.3	Implizites und explizites Lernen und die Theorie des errorless learning .....	111
2.3.3.4	Bandbreiten-Feedback .....	117
2.3.3.5	Normatives Feedback .....	119
2.4	<i>Zusammenfassung und Ableitung der allgemeinen Forschungshypothesen</i> .....	123
<b>3</b>	<b>Empirische Untersuchung</b> .....	<b>125</b>
3.1	<i>Übergreifende Untersuchungsmethodik</i> .....	125
3.1.1	Lernaufgabe .....	125
3.1.2	Versuchsaufbau und Messtechnik .....	127
3.1.3	Sekundäraufgabe .....	130
3.1.4	Test .....	133
3.1.5	Abhängige Variablen .....	135
3.1.5.1	Der absolute Fehler (AE) .....	136
3.1.5.2	Der <i>n-Back-Fehler</i> .....	137
3.1.6	Stichprobe .....	137
3.2	<i>Untersuchungsdesign</i> .....	138
3.2.1	Unabhängige Variablen .....	141
3.2.2	Untersuchungsablauf .....	148
3.2.2.1	PANAVA .....	153
3.2.2.2	Manipulationscheck .....	154
3.3	<i>Statistisch-methodische Vorüberlegungen/Voraussetzungen</i> .....	155
3.3.1	Datenauswertung .....	155
3.3.2	Drop-Outs .....	156

---

3.3.3	Parallelisierung.....	157
3.3.4	Voraussetzungsprüfungen .....	158
3.3.5	Adjustierungen .....	160
3.3.6	Interpretation der Doppeltätigkeitstests.....	161
3.3.6.1	Aufgabenintegration .....	161
3.3.6.2	Priorisierung .....	162
3.4	<i>Experiment 1a</i> .....	163
3.4.1	Operationalisierte Forschungshypothesen.....	164
3.4.2	Datenauswertung .....	164
3.4.3	Ergebnisse .....	164
3.4.3.1	Ergebnisse zur Hypothese OH I_1a (Präzisionssteigerung) .....	165
3.4.3.2	Ergebnisse zur Hypothese OH II_1a (Automatisierung).....	165
3.4.4	Diskussion.....	166
3.5	<i>Experiment 2a</i> .....	169
3.5.1	Operationalisierte Forschungshypothesen.....	170
3.5.2	Datenauswertung .....	170
3.5.3	Ergebnisse .....	170
3.5.3.1	Ergebnisse zur Hypothese OH I_2a (Präzisionssteigerung) .....	171
3.5.3.2	Ergebnisse zur Hypothese OH II_2a (Automatisierung).....	171
3.5.4	Diskussion.....	172
3.6	<i>Experiment 2b</i> .....	175
3.6.1	Operationalisierte Forschungshypothesen.....	176
3.6.2	Datenauswertung .....	176
3.6.3	Ergebnisse .....	177
3.6.3.1	Ergebnisse zur Hypothese OH I_2b (Präzisionssteigerung) .....	177
3.6.3.2	Ergebnisse zur Hypothese OH II_2b (Automatisierung).....	178
3.6.4	Diskussion.....	178
3.7	<i>Experiment 2c</i> .....	183
3.7.1	Operationalisierte Forschungshypothesen.....	184
3.7.2	Datenauswertung .....	185
3.7.3	Ergebnisse .....	186

3.7.3.1	Ergebnisse zu den Hypothesen OH I_2c_POS und OH I_2c_NEG (Präzisionssteigerung) .....	187
3.7.3.2	Ergebnisse zu den Hypothesen OH II_2c_POS und OH II_2c_NEG (Automatisierung) .....	188
3.7.4	Diskussion.....	189
<b>4</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>192</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>205</b>
	<b>Erklärung .....</b>	<b>216</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>217</b>
I.	Teilnehmerinformation Interventionsgruppen.....	217
II.	Teilnehmerinformation passive Kontrollgruppe .....	219
III.	Einwilligungserklärung .....	221
IV.	Eingangsfragebogen .....	223
V.	PANAVA-KS.....	226
VI.	Manipulationscheck.....	227
VII.	Verpflichtung zum Stillschweigen.....	228
VIII.	Postexperimenteller Fragebogen .....	229
IX.	Movement Specific Reinvestment Skala .....	232
X.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 1 .....	233
XII.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 2 .....	238
XIII.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 3 .....	242
XIV.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 4 .....	244
XV.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 5 .....	246
XVI.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 6 .....	248
XVII.	Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 7 .....	251
XIX.	Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der POS100 .....	253
XX.	Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der POS14 .....	254
XXI.	Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der NEG14 .....	255
XXII.	Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der KGa.....	256
XXIII.	Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der KGp.....	257

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.	Bedeutung der Aufmerksamkeit in den verschiedenen Prozessstadien unterschiedlicher Ein-Kanal-Theorien.....	24
Abb. 2.	Schematische Darstellung der zentralen, limitierten Aufmerksamkeitskapazität mit zwei simultan ausgeführten Aufgaben, die jeweils nur einen Teil der Gesamtkapazität beanspruchen .....	26
Abb. 3.	Das 4-D Modell multipler Ressourcen von Wickens.....	30
Abb. 4.	Das Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses, entwickelt von Baddeley und Hitch 1974.....	34
Abb. 5.	Die aktuellste Version des Multikomponentenmodells des Arbeitsgedächtnisses von Baddeley und Hitch .....	37
Abb. 6.	Höhe der Bahnung (facilitation) oder Hemmung (inhibition) in Folge einer kongruenten Prime-Stimulus-Reaktion im Vergleich zu einer neutralen Bedingung .....	44
Abb. 7.	Schematische Darstellung der bei Schneider und Shiffrin (1977) und Shiffrin und Schneider (1977) verwendeten visuellen Suchaufgabe.....	47
Abb. 8.	Hypothetische Veränderung der Informationsverarbeitung im Verlauf des Lernens einer Bewegungssequenz.....	57
Abb. 9.	Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns von Kovacs, Han und Shea (2009) .....	58
Abb. 10.	Schema des motorischen Lernens auf Basis des parallel neural network model.....	61
Abb. 11.	Ergebnisdarstellung des ersten Experiments von Curran und Keele (1993) .....	68
Abb. 12.	Die wichtigsten Kortexregionen, die unter Einzeltätigkeit (links) und Doppelaufgabenbedingungen (rechts) eine erhöhte Durchblutung zeigten .....	71
Abb. 13.	Modell des motorischen Lernens nach Doyon et al. (2002, 2003, 2005 & 2009).....	76

Abb. 14.	Beteiligung der drei Lernsysteme (metakognitives System, kognitives Kontrollnetzwerk und Repräsentationssystem) im Lernverlauf .....	78
Abb. 15.	Schematische Darstellung des grundlegenden Prinzips der Leistung in der Sekundäraufgabe als Indikator für die Aufmerksamkeitsanforderungen der Primäraufgabe.....	82
Abb. 16.	Grundstruktur motorischer Lernprozesse.....	87
Abb. 17.	Kortikobasale Regelkreise, die beim Lernen (a) bzw. bei der Kontrolle (b) von Handlungsabläufen aktiv sind .....	99
Abb. 18.	Schematische Darstellung der Armbewegungssequenz .....	126
Abb. 19.	Der verwendete Unterarmhebel mit horizontaler Griffposition.....	128
Abb. 20.	Versuchsaufbau mit Unterarmhebel auf Holzkonsole, visueller Maskierung, Monitor und Tastatur.....	129
Abb. 21.	Versuchsaufbau mit Unterarmhebel, visueller Maskierung, Monitor und Tastatur, sowie die Positionierung der Probanden aus der Ansicht von oben.....	130
Abb. 22.	Darstellung der 3x3-Matrix und des Stimulus (gelbes Rechteck) während der n-Back-Aufgabe in PaDuTaS .....	132
Abb. 23.	Ablauf des Doppeltätigkeitstests .....	134
Abb. 24.	Planung des prozessartigen Untersuchungsdesigns mit den möglichen Telexperimenten. ....	139
Abb. 25.	Resultierendes Untersuchungsdesign mit den tatsächlich durchgeführten Telexperimenten .....	141
Abb. 26.	Exemplarische Darstellung der Feedback-Präsentationen für die Interventionsgruppen.....	144
Abb. 27.	Resultierendes Untersuchungsdesign mit den tatsächlich durchgeführten Telexperimenten und Versuchsgruppen.....	148
Abb. 28.	Kompletter Untersuchungsablauf.....	149
Abb. 29.	Darstellung des Avatars, das die Armhebelsequenz präsentierte.....	150
Abb. 30.	Darstellung des Feedbacks.....	150

Abb. 31.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der passiven Kontrollgruppe.....	162
Abb. 32.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler unter Einzeltätigkeit bzw. Einzel- und Doppeltätigkeit in der POS100.....	165
Abb. 33.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler unter Einzeltätigkeit bzw. Einzel- und Doppeltätigkeit in der POS14.....	171
Abb. 34.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler unter Einzeltätigkeit bzw. unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der NEG14 und POS14 im Vergleich. ....	178
Abb. 35.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängige Variable AE unter Einzeltätigkeit in der KGa, der POS14 und NEG14 im Vergleich. ....	187
Abb. 36.	Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängige Variable n-back-Fehler unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der KGa, der POS14 und NEG14 im Vergleich. ....	188

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.	Verschiedene Ansätze zur Charakterisierung von Phasen des motorischen Lernens.....	12
Tab. 2.	Gegenüberstellung der Charakteristika des controlled processing und des automatic processing anhand der folgenden Literaturstellen.....	45
Tab. 3.	Testablauf .....	133
Tab. 4.	Häufigkeiten der Rückmeldung von Fehlerwerten, die geringer als der Referenzwert waren, in Prozent. P1 bis P5 kennzeichnen die Mittelwerte für die einzelnen Übungstage. ....	146
Tab. 5.	Feedbackhäufigkeit und -verteilung in den Gruppen POS14, NEG14 und KGa. P1 bis P5 kennzeichnen die fünf Übungseinheiten.....	147
Tab. 6.	Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler der Gruppe POS100 zum Prä- und Retentions-Test.....	165
Tab. 7.	Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler der Gruppe POS14 zum Prä- und Retentions-Test.....	171
Tab. 8.	Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler der Gruppe NEG14 zum Prä- und Retentions-Test.....	177
Tab. 9.	Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen AE und n-Back-Fehler der Gruppe KGa zum Prä- und Retentions-Test.....	186

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ANOVA	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
cm	Zentimeter
DT	Doppeltätigkeit
DTK	Doppeltätigkeitskosten
EEG	Elektroenzephalografie
ET	Einzeltätigkeit
fMRI	funktionelle Magnetresonanztomographie
KGa	aktive Kontrollgruppe
KGp	passive Kontrollgruppe
KP	Knowledge of Performance
KR	Knowledge of Results
m	Meter
MZP	Messzeitpunkt(e)
ms	Millisekunden
mm	Millimeter
n	Umfang der Stichprobe
NEG14	Gruppe mit 14%iger Häufigkeit normativ negativem Feedbacks
p	Irrtumswahrscheinlichkeit (probability)
PaDuTaS	Paderborner Dual-Task-Software
POS100	Gruppe mit 100%iger Häufigkeit normativ positivem Feedbacks
POS14	Gruppe mit 14%iger Häufigkeit normativ positivem Feedbacks
s	Sekunde(n)
S.	Seite
SD	Standardabweichung (standard deviation)
s.o.	siehe oben
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
Tab.	Tabelle
UKP	Umkehrpunkt
VG	Versuchsgruppe
Vpn.	Versuchsperson(en)

## 1 Problemstellung

Eines der zentralen Ziele sportmotorischen Trainings ist das Erlernen von Bewegungen. Zu diesem Zweck steht der Trainer<sup>1</sup> während des Übungsprozesses im ständigen Austausch mit seinen Schützlingen. Mit Hilfe von Feedback versucht der Trainer den Lernenden einerseits an die korrekte Bewegungskörperausführung heranzuführen, indem er Rückmeldungen über Ergebnisse, Fehler oder Hinweise zur richtigen Technikausführung gibt. Andererseits nutzen Trainer das Feedback nicht nur als neutrale Information, sondern auch um die Übenden zu motivieren. Dabei fallen zum Teil kritische Aussagen wie „Komm, das kannst du besser!“, die dem Übenden einen Misserfolg signalisieren. Demgegenüber sprechen Trainer aber auch ermutigende und lobende Anmerkungen wie „Toll, weiter so!“ aus, die darauf hindeuten, dass die erzielte Leistung als Erfolg zu bewerten ist.

In der Sportwissenschaft stand bisher hauptsächlich die Informationsfunktion des Feedbacks im Fokus der Forschung. Es scheint jedoch ebenfalls bedeutend für den Lernprozess zu sein, ob eine erzielte Leistung durch den Lernenden als Erfolg oder Misserfolg bewertet wird (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 738). Dieser Einflussfaktor spielt für den Sport eine bedeutende Rolle, da Erfolge und Misserfolge im Trainings- und Wettkampfalltag allgegenwärtig sind. Dies liegt unter anderem daran, dass sich die erzielte Leistung im Sport in Form eines Ergebnisses meist gut beobachten lässt. So kommt es nach nahezu jeder Handlung einerseits zu einer objektiven Beobachtung der erzielten Leistung und andererseits zu einer anschließenden subjektiven Bewertung dieser als Erfolg oder Misserfolg durch den Übenden (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 130). Die erzielte Leistung lässt sich bspw. beim Kugelstoßen sehr gut anhand der Stoßweite beobachten. Die Rückmeldung über das genaue Ergebnis des Versuches bzw. die Höhe des Fehlers, wird als quantitatives Feedback bezeichnet (Lee & Carnahan, 1990, S. 779). Anschließend kommt es zur subjektiven Bewertung der quantitativ rückgemeldeten, erzielten Leistung. Übertrifft die

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

erzielte Weite die Erwartung des Lernenden, bewertet er den Versuch als Erfolg und es entstehen Zufriedenheit und Freude über den gelungenen Stoß. Jedoch kann es auch passieren, dass die erzielte Stoßweite die Erwartungen nicht erfüllt, so dass es zu Unzufriedenheit und einem Zweifeln über die korrekte Durchführung der Bewegung kommt. Eine Leistungsbewertung kann jedoch auch durch externe Quellen (bspw. den Trainer) vermittelt werden, indem ein qualitatives Feedback gegeben wird, welches Informationen über die Richtigkeit des Bewegungsergebnisses enthält (Lee & Carnahan, 1990, S. 779). Außerdem kann die subjektive Einschätzung der eigenen Leistung als Erfolg oder Misserfolg dadurch beeinflusst werden, wie sich der Übende im Vergleich zu Anderen, bspw. Mitgliedern seiner Trainingsgruppe, einschätzt.

Im Trainingsalltag sind vor allem die Rückmeldungen des Trainers in Form von Lob oder Kritik bedeutend für die Bewertung einer Leistung als Erfolg oder Misserfolg. Das Feedback vom Trainer ist besonders wichtig, wenn sich der Lernende bei der Beurteilung seiner eigenen Leistung unsicher ist. Häufig versuchen Trainer die Bewegungsfehler ihrer Schützlinge, getreu dem Motto „Aus Fehlern lernt man!“, durch Rückmeldungen zu korrigieren. Aber auch Aussagen wie „Gut gemacht!“ fallen im Training, wenn auf Erfolgserlebnisse aufmerksam gemacht werden soll. Ob sie ein Feedback mit einer positiven oder negativen Wertigkeit (Valenz) versehen, entscheiden Trainer im Praxisalltag meist aus dem Bauch heraus und wissen meistens nicht, welchen Einfluss die Feedback-Valenz auf den Lernprozess hat.

Diesem Problem widmet sich die vorliegende Arbeit, indem die Frage, welchen Einfluss die Feedback-Valenz auf das motorische Lernen hat, untersucht wird.

In diesem Zusammenhang ist es von zentraler Bedeutung, den gesamten Lernprozess bis hin zum gewünschten Endzustand zu betrachten und somit den ganzen Verlauf des motorischen Lernens zu berücksichtigen. Es existieren zahlreiche Modelle, die versuchen den Prozess und typischen Verlauf des motorischen Lernens zu beschreiben (Müller & Blischke, 2009, S. 167–170). Typischerweise zeigt sich als Folge eines erfolgreichen Lernprozesses eine Leistungssteigerung und in späten Lernphasen eine Automatisierung der zu erler-

nenden Fertigkeit (Müller & Blischke, 2009, S. 196). Beide Teilaspekte, die Leistungssteigerung und die Automatisierung, werden als zentrale Ziele des (sport-)motorischen Techniktrainings angesehen (Blischke & Reiter, 2002, S. 8). In der sportmotorischen Forschung liegen dennoch kaum Studien vor, die den Einfluss verschiedener Lernbedingungen auf die Leistungssteigerung und die Automatisierung untersucht haben. Diese Forschungslücke gilt es zu schließen, da es in Wettkampf- und Spielsituationen notwendig ist, die erlernten Bewegungsabläufe auf einem hohen Leistungsniveau abzurufen, wenn zeitgleich andere Aufgaben (bspw. das Treffen von taktischen Entscheidungen) ausgeführt werden und die Bewegung automatisch kontrolliert werden muss (Blischke & Reiter, 2002, S. 8; Olivier, Marschall & Büsch, 2008, S. 17–18). Auch im Alltag oder der Rehabilitation ist es bedeutend, dass Bewegungen automatisch kontrolliert und gleichzeitig leistungsstabil ausgeführt werden können. Die komplexe motorische Fertigkeit des Gehens ist bspw. bei den meisten Menschen hochgradig automatisiert. Es ist somit problemlos möglich, zeitgleich ein Gespräch zu führen oder einen Regenschirm aufzuspannen (Abernethy, 2001, S. 54). Diesen Status gilt es bei Reha-Patienten nach einem Gelenkersatz wieder herzustellen, da diese aufgrund von Schmerzen und Schonhaltungen ihr Gangmuster neu erlernen müssen.

Bei der Bearbeitung der zuvor genannten Fragestellung sollten demnach sowohl die Leistungssteigerung, als auch die Automatisierung, als bedeutende Teilaspekte des motorischen Lernens, berücksichtigt werden. Es existieren bereits einige wenige Untersuchungen, die sich mit dem Einfluss der Feedback-Valenz auf die Leistungssteigerung beim motorischen Lernen beschäftigt haben. Diese Studien zeigen jedoch erhebliche methodische Einschränkungen, da aufgrund des geringen Übungsumfangs keine Vergleichbarkeit mit der Sportpraxis möglich ist und der Einfluss auf die Automatisierung bisher nicht berücksichtigt wurde (bspw. Bund & Wiemeyer, 2005; Wulf, Shea & Lewthwaite, 2010b; Wulf & Lewthwaite, 2016).

In der vorliegenden Arbeit soll infolgedessen untersucht werden, welchen Einfluss die Feedback-Valenz auf das motorische Lernen und dabei insbesondere

auf die zwei Teilaspekte der Leistungssteigerung und Automatisierung der zu erlernenden Fertigkeit hat.

## **1.1 Aufbau der Arbeit**

Um diese Fragestellung zu beantworten, wird im folgenden Kapitel zunächst ein Überblick über den theoretischen Hintergrund und die zentralen Begrifflichkeiten gegeben. Nach einer Zusammenfassung der gängigen Definitionen motorischen Lernens in Kapitel 2.1 werden mit Hilfe der Lernphasenmodelle die typischen Veränderungen im Verlauf des motorischen Lernprozesses skizziert (siehe Kapitel 2.1.1). Im anschließenden Kapitel 2.1.2 werden bereits grundsätzliche Überlegungen zur Messmethodik vorgestellt, bevor in einer Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse verdeutlicht wird, warum die Leistungssteigerung und Automatisierung gleichsam als bedeutende Teilaspekte des motorischen Lernens im Fokus dieser Arbeit stehen (siehe Kapitel 2.1.3).

Das Kapitel 2.2 beschäftigt sich spezifisch mit der Automatisierung als Teilaspekt des motorischen Lernens und leitet anhand grundlegender Theorien und Modelle her, was unter dem Konzept der Automatizität bzw. Automatisierung zu verstehen ist. Ein erster Schwerpunkt liegt dabei auf den Theorien zur Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis, die entsprechend ihrer historischen Entwicklung in Kapitel 2.2.1 vorgestellt und abschließend kritisch betrachtet zusammengefasst werden. Das anschließende Kapitel 2.2.2 beschäftigt sich mit den Theorien, die motorische Kontrollprozesse und deren Veränderung im Lernverlauf thematisieren. Das Kapitel 2.2.3 thematisiert abschließend die Frage, wie Automatizität und Automatisierung empirisch erhoben werden können und stellt mit der Dual-Task-Methodik die geläufigste Methode zur Messung von Automatizität vor.

Den dritten Teil des theoretischen Hintergrundes bildet das Kapitel 2.3, welches sich dem Einfluss von Feedback und speziell der Feedback-Valenz auf das motorische Lernen widmet. Nach einer kurzen Einführung über die grundsätzliche Bedeutung von Rückmeldungen für den motorischen Lernprozess findet in Kapitel 2.3.1 zunächst eine Klärung des Begriffes „Feedback-Valenz“ auf theoretischen

scher Ebene statt. Anschließend wird ein Überblick über die neurophysiologischen Erkenntnisse zur Wirkung von Valenz und Feedback-Valenz gegeben (Kapitel 2.3.2), die Aufschluss über mögliche, zu Grunde liegende Mechanismen bieten. Die aktuelle Befundlage verhaltensorientierter Untersuchungen wird in Kapitel 2.3.3 aufgezeigt. Dabei werden die verschiedenen geläufigen Operationalisierungsformen der Feedback-Valenz in einzelnen Kapiteln thematisiert. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet das Kapitel 2.3.3.5, welches sich speziell dem normativen Feedback widmet. Diese Form, Feedback-Valenzen zu erzeugen, hat eine besondere Bedeutung für die vorliegende Arbeit, da sie in der durchgeführten Untersuchung Anwendung findet.

Das Kapitel 2.4 fasst die Kerngedanken der drei vorangegangenen Kapitel kurz zusammen und zeigt die Herleitung der allgemeinen Forschungshypothesen auf. Die, auf diesen Forschungshypothesen aufbauende, eigene Untersuchung wird im anschließenden Kapitel 3 detailliert vorgestellt. Die vorliegende Studie wurde in vier aufeinander aufbauende Experimente differenziert, die jedoch auf einer grundlegend ähnlichen Untersuchungsmethodik basieren. Diese übergreifenden methodischen Aspekte werden in Kapitel 3.1 vorgestellt. Das Studiendesign und daraus resultierende Konsequenzen zur Auswertung, werden in Kapitel 3.2 und 3.3 konkret beschrieben. In den anschließenden Kapiteln werden experimentweise die operationalisierten Forschungshypothesen und das konkrete Vorgehen der Datenauswertung vorgestellt, bevor die jeweiligen Ergebnisse beschrieben und diskutiert werden.

Eine umfassende Diskussion der Ergebnisse der gesamten Untersuchung erfolgt in Kapitel 4. Dabei wird ein Bezug zwischen den empirischen Ergebnissen und den zu Beginn der Arbeit dargestellten, theoretischen Annahmen und Herleitungen hergestellt. Ein wichtiger Teil dieses Kapitels besteht darin, ein kritisches Fazit zu ziehen und einen Ausblick für zukünftige Untersuchungen zu geben.

## 2 Theoretische Grundlagen

Um die in der Problemstellung aufgeworfene Fragestellung zu beantworten, müssen zunächst die grundlegenden Begrifflichkeiten geklärt und der aktuelle Forschungsstand aufgearbeitet werden. Den Ausgangspunkt stellen die theoretischen Überlegungen zum motorischen Lernen dar. Im ersten Unterkapitel wird das für diese Arbeit zu Grunde liegende Verständnis motorischen Lernens konkretisiert, indem vorliegende Definitionen zusammenfassend betrachtet und typische Merkmale motorischen Lernens aufgezeigt werden. Einen Ausgangspunkt für das Verständnis des charakteristischen Verlaufes des motorischen Lernens liefert das Kapitel 2.1.1, so dass anschließend in Kapitel 2.1.2 aufgezeigt werden kann, wie motorisches Lernen gemessen wird.

Wie bereits erwähnt, wird der Automatisierung, als bedeutenden und dennoch in der Forschungslandschaft unterrepräsentierten Teilaspekt des motorischen Lernens, in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zukommen. Deshalb werden im Anschluss die zu Grunde liegenden Konzepte zur Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis beschrieben (siehe Kapitel 2.2.1). Diese dienen als Ausgangspunkt für die Automatizitätstheorien, deren bedeutendste im anschließenden Kapitel 2.2.2 vorgestellt werden: Den historischen Ursprung bilden dabei die Zwei-Prozess-Theorien, sowie deren kritische Betrachtung und die daraufhin entstandenen Weiterentwicklungen. Die aktuellsten Modelle, die in diesem Zusammenhang vorgestellt werden, beinhalten bereits Lösungsansätze für den Übergang zwischen den Lernphasen und binden neurophysiologische Befunde zur Unterstützung ihrer Annahmen ein. Ergänzend liefert das Kapitel 2.2.2.8 einen kurzen Überblick über neuronale Korrelate des motorischen Lernens, bevor die Automatizitätstheorien kritisch betrachtet und zusammengefasst werden. Wie Automatizität bzw. Automatisierung in der Experimentalpraxis gemessen wird, stellt das Kapitel 2.2.3 dar.

Im Anschluss greift das Kapitel 2.3 die Frage auf, inwiefern das motorische Lernen durch Feedback beeinflusst bzw. gefördert werden kann. Dazu wird zunächst der grundsätzliche Ablauf fremdinformationsgestützter, motorischer Lernprozesse dargestellt, bevor die Feedback-Valenz als eine besondere Form

des Feedbacks in Kapitel 2.3.1 intensiver beleuchtet wird. Da der Begriff Feedback-Valenz in der Sportmotorik bisher kaum einheitlich verwendet wird, ist das Ziel dieses Kapitels, sich dem Begriff auf theoretischer Ebene zu nähern und eine Definition für den weiteren Verlauf dieser Arbeit zu bestimmen. Anschließend werden in Kapitel 2.3.2 die neurophysiologischen Erkenntnisse im Zusammenhang mit Valenz und Feedback-Valenz vorgestellt, da sie Erklärungsansätze für die Effekte der Valenzen und Anknüpfungspunkte für die Theorien motorischen Lernens bieten. Die konkreten verhaltensorientierten Experimentalfunde werden in Kapitel 2.3.3 dargestellt. Das Ende dieses Kapitels bildet die Darstellung der Befunde zum normativen Feedback als eine Operationalisierungsform der Feedback-Valenz, die im Kontext sportmotorischer Experimente bereits häufig eingesetzt wurde und auch in der hier vorliegenden Untersuchung zur Verwendung kommen wird.

Abschließend werden die zentralen theoretischen Gedanken dieses gesamten Abschnittes in Kapitel 2.4 zusammengefasst und die Herleitung der allgemeinen Forschungshypothesen dargestellt.

## **2.1 Motorisches Lernen**

Das menschliche Lernen ist ein sehr vielfältiges Phänomen. Nur indem wir Lernen, können wir uns veränderten Umgebungsbedingungen anpassen. Ein typischer Anwendungsbereich ist das Lernen für eine Prüfung im Studium oder in der Schule. Neben der reinen Aneignung von Wissen gibt es jedoch noch einige andere Lebensbereiche, in denen das Lernen eine bedeutende Rolle spielt. Zum Beispiel müssen soziale und emotionale Kompetenzen erlernt werden, um erfolgreich mit anderen Menschen kommunizieren und interagieren zu können. Auch das Erlernen einer fremden Sprache oder des Kugelstoßens sind mögliche Beispiele für das menschliche Lernen. Das motorische Lernen ist demzufolge nur ein Teil des menschlichen Lernens und beschäftigt sich speziell mit dem Erlernen von Bewegungen (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 153–154).

In der Literatur existiert keine einheitliche Theorie, die das motorische Lernen mit all seinen Teilaspekten vollständig erklären kann (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 161). Aus diesem Grund muss auf verschiedene theoretische Konzepte und Definitionen zurückgegriffen werden, um sich einer grundlegenden Bedeutung des Begriffes anzunähern:

Die meisten Definitionen lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass sie motorisches Lernen als einen übungsbedingten Prozess verstehen, der zu einer relativ überdauernden Veränderung motorischer Kompetenz führt, die mit einer Ausbildung und Korrektur motorischen Gedächtnisbesitzes einhergeht (Magill, 2014, S. 257; Müller & Blischke, 2009, S. 159; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 153; Schmidt & Lee, 2011, S. 327). Allerdings sind sowohl der Lernprozess, als auch das Resultat dieses Prozesses, die veränderte motorische Kompetenz, nicht direkt beobachtbar (Magill, 2014, S. 257; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 153; Schmidt & Lee, 2011, S. 327). Da motorisches Lernen jedoch häufig mit einer äußerlich sichtbaren Verhaltensveränderung einhergeht, wird in der Forschung aufgrund des resultierenden Verhaltens auf die zu Grunde liegenden Prozesse geschlossen (Magill, 2014, S. 257; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 153–154; Schmidt & Lee, 2011, S. 327).

Darüber hinaus setzen alle vorliegenden Definitionen voraus, dass das äußerlich messbare Resultat des Lernprozesses, bspw. die Verhaltensänderung, relativ überdauernd fortbestehen muss, um von motorischem Lernen sprechen zu können. Eine deutliche Eingrenzung dieses Behaltensintervalls bieten die vorliegenden Theorien jedoch nicht direkt (Müller & Blischke, 2009, S. 159–160; Schmidt & Lee, 2011, S. 327–329; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 153–154). Müller und Blischke weisen darauf hin, dass die Konsolidierung der geübten Fertigkeit vorrangig zeit- und schlafabhängig zu sein scheint. Die Stabilisierung motorischer Gedächtnisgrundlagen bedarf anscheinend einer Ruhephase mit einer aufgabenabhängigen Dauer von mindestens vier bis zu mehr als 24 Stunden. Überdies bewirken „biochemische Vorgänge im Gehirn (. . .), die die REM-Schlaf- und Stadium-2-Schlafphasen in der zweiten Nachthälfte begleiten“ eine Optimierung der Bewegungsrepräsentation (Müller &

Blischke, 2009, S. 180–189). Aufgrund dieser zeit- und schlafabhängigen Konsolidierung empfiehlt es sich, motorisches Lernen erst nach 24 Stunden Ruhe und einer Schlafphase zu überprüfen. In den theoretischen und experimentellen Ansätzen der Motorikforschung erfolgt deshalb eine Differenzierung zwischen einer kurzfristigen Aneignung (*acquisition*) und einem längerfristigen Behalten (*retention*) (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 154; siehe Kapitel 2.1.2).

Eine weitere Gemeinsamkeit der meisten Definitionen ist die Aussage, dass Übung notwendig ist, damit motorisches Lernen stattfinden kann (Magill, 2014, S. 257; Müller & Blischke, 2009, S. 159; Schmidt & Lee, 2011, S. 327).

Darüber hinaus wird als weiterer wichtiger Aspekt angesehen, dass es sich nur um einen Lernprozess handelt, wenn dieser umweltbedingt und nicht durch Reifung oder Wachstum verursacht, oder durch temporär leistungsmodulierende Faktoren, wie bspw. Medikamente, Ermüdung oder Motivation, beeinflusst wird (Müller & Blischke, 2009, S. 160–161; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 154; Schmidt & Lee, 2011, S. 327–329).

Zusammenfassend lässt sich demnach sagen, dass motorisches Lernen durch Übung zu einer relativ überdauernden Veränderung motorischer Kompetenz führt, die mit einer Ausbildung und Korrektur motorischen Gedächtnisbesitzes einhergeht und in der Regel zu einer relativ überdauernden Verhaltensänderung führt, die nicht durch Reifung, Wachstum oder temporär leistungsmodulierende Faktoren verursacht wird. Um diese noch relativ oberflächliche Ansicht von motorischem Lernen zu präzisieren, können sechs typische Charakteristika herangezogen werden, die gewöhnlich beim motorischen Lernen beobachtet werden (Magill, 2014, S. 257–259):

Zunächst kann festgestellt werden, dass sich die Leistung im Lernverlauf in der Regel verbessert (*improvement*). Da es aber auch Situationen gibt, in denen es zu Verschlechterungen oder Leistungsplateaus kommt und trotzdem ein Lernprozess stattfindet, sollte motorisches Lernen nicht allein auf eine Leistungssteigerung beschränkt werden. Zweitens zeigt sich im Verlauf des Lernens eine Steigerung der Konsistenz (*consistency*). In einem frühen Lernstadium ist die

erzielte Leistung noch sehr variabel. Im weiteren Verlauf des Lernens wird die Leistung von Versuch zu Versuch ähnlicher und somit beständiger. Des Weiteren zeigt eine gelernte Fertigkeit eine stärkere Stabilität (*stability*) und somit eine geringere Anfälligkeit gegenüber internen (bspw. Stress) und externen Störungen (bspw. Wind). Viertens kann beim motorischen Lernen beobachtet werden, dass die Fertigkeit auch nach einem längeren Zeitraum von Tagen, Wochen, etc. noch auf nahezu gleichem Leistungsniveau abgerufen werden kann (*persistence*). Darüber hinaus zeigt sich im Verlauf des Lernens eine bessere Anpassung der Fertigkeit an veränderte Kontextbedingungen bezüglich der Aufgabe, der Person selber und der Umgebung (*adaptability*). Diese Eigenschaft scheint allerdings stark durch die Übungsbedingungen (bspw. Übungsvariabilität, zergliedertes oder ganzheitliches Training) beeinflusst zu werden. Zuletzt lässt sich mit fortschreitendem Lernprozess auch eine Reduktion der Anforderungen an die Aufmerksamkeitsressourcen feststellen (*reduction of attention demand*), so dass zusätzliche Aufgaben, parallel zur Bewegungsausführung, verrichtet werden können (Magill, 2014, S. 257–259).

Bei der Betrachtung dieser Kriterien fällt auf, dass sich die gewählten Begrifflichkeiten einerseits auf Zustände (*consistency, stability, persistence* und *adaptability*) und andererseits auf Prozesse (*improvement, reduction of attention demand*) beziehen. Diese Wortwahl könnte missverstanden werden, da auch die zustandsbeschreibenden Begrifflichkeiten einer Verbesserung unterliegen. Aus diesem Grund wäre es schlüssig den von Magill gewählten Begriff *improvement* durch den in der verhaltensorientierten Motorikforschung häufig verwendeten Begriff *performance* zu ersetzen. *Performance* kann als mittlere Leistung verstanden werden, die sich, wie von Magill beschrieben, im Lernverlauf in der Regel verbessert. In diesem Zuge ließe sich die prozessorientierte Begrifflichkeit *reduction of attention demand* ebenfalls in *automaticity* abändern, welche durch einen reduzierten Aufmerksamkeitsbedarf gekennzeichnet ist und im Lernprozess ebenfalls einer Verbesserung unterliegt.

Weiterhin ist zu beachten, dass die genannten Charakteristika im Verlauf des motorischen Lernens unterschiedlich deutlich präsent sind und ihr Auftreten im Prozess des Lernens selten gleichzeitig erfolgt: Zum Beispiel kommt es bei der

Leistung, vor allem zu Beginn des motorischen Lernens, zu einer Verbesserung (*improvement*). Im Vergleich zu anderen Kriterien erreicht diese aber früher im Lernverlauf ein Leistungsplateau, was zu dem Problem unentdeckter Lerneffekte führen kann (Magill, 2014, S. 279–291). Aus diesem Grund wird im Folgenden genauer auf die Phasen des motorischen Lernens eingegangen, um den charakteristischen Verlauf motorischer Lernprozesse besser zu verstehen und im Anschluss herleiten zu können, welche Parameter erhoben werden sollten, um motorisches Lernen zu messen.

### 2.1.1 *Phasen des motorischen Lernens*

Die Phasenmodelle motorischen Lernens beschreiben charakteristische Veränderungen im Verlauf des Lernprozesses, indem sie meist zwei oder drei Lernstadien voneinander abgrenzen. Bei der Beschreibung der verschiedenen Phasen werden sowohl die äußerlich beobachtbaren Verhaltensänderungen, als auch die „Veränderungen in den internen Prozessabläufen“ berücksichtigt (Müller & Blischke, 2009, S. 167). Diese internen Prozesse werden in Kontrollprozesse, die sich auf die Steuerung und Kontrolle der Bewegung beziehen, und Lernprozesse, die im Übungsverlauf zu einer Veränderung dieser Bewegungskontrolle führen, unterschieden (Müller & Blischke, 2009, S. 167–168).

In der Literatur existiert eine Vielzahl verschiedener Phasenmodelle des motorischen Lernens. Die bekanntesten sind in Tab. 1 zusammengefasst. Allerdings ist bei der Betrachtung dieser Modelle zu berücksichtigen, dass die einzelnen Phasen in den Modellen zwar strikt getrennt dargestellt werden, jedoch davon ausgegangen wird, dass die Lernphasen eher fließend ineinander übergehen bzw. sich überlappen (Schmidt & Lee, 2011, S. 430; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 196).

Auch wenn die Autoren unterschiedliche Anzahlen von Lernstadien annehmen und diese auch verschieden benennen, zeigen die genauen Beschreibungen dennoch ähnliche Charakteristika (Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 195). Einen Überblick über den gemeinsamen Tenor der dargestellten Lernphasenmodelle

haben Müller & Blischke (2009, S. 168-170), sowie Schmidt & Wrisberg (2004, S. 195-200) erstellt.

Tab. 1. Verschiedene Ansätze zur Charakterisierung von Phasen des motorischen Lernens (modifiziert nach Müller & Blischke, 2009, S. 168).

Autor	Charakterisierung der Phasen
James (1890a, b)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Conscious</li> <li>2 Automatic</li> </ol>
Fleishman & Hempel (1954, 1955)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Durch "nicht motorische" Faktoren bestimmt</li> <li>2 Durch "motorische" Faktoren bestimmt</li> </ol>
Fitts & Posner (1967)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Cognitive stage</li> <li>2 Associative stage</li> <li>3 Autonomous stage</li> </ol>
Adams (1971)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Verbal-motor</li> <li>2 Motor</li> </ol>
Galperin (1973)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Schaffung einer Orientierungsgrundlage</li> <li>2 Etappe der materiellen oder materialisierten Handlung</li> <li>3 Ebene der äußeren Sprache</li> <li>4 Ebene der äußeren Sprache für sich</li> <li>5 Ebene der inneren Sprache</li> </ol>
Volpert (1976)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Aufbau eines Grobschemas des Planes</li> <li>2 Detailarbeit am Plan, Hinwendung zu relevanten Signalen</li> <li>3 Herausbildung von Superzeichen, Automatisierung</li> </ol>
Blischke (1983)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Kognitiv kontrollierter Strukturwerb</li> <li>2 Übungsabhängige Optimierung</li> </ol>
Scully & Newell (1985)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Aufnahme der "topological characteristics of the relative motion"</li> <li>2 "Scaling of relative motion"</li> </ol>
Ito (1984), Paillar (1986)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Nutzung cortico-cortico-spinaler Bahnen</li> <li>2 Nutzung cortico-rubro-spinaler Bahnen</li> </ol>
Meinel & Schnabel (1998)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Entwicklung der Grobkoordination</li> <li>2 Entwicklung der Feinkoordination</li> <li>3 Stabilisierung der Feinkoordination/Entwicklung variabler Verfügbarkeit</li> </ol>
Gentile (2000)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Getting the idea of the movement</li> <li>2 Fixation/diversification</li> </ol>

In frühen Lernphasen geht es zunächst darum, ein Grundverständnis von der Bewegungsaufgabe zu entwickeln und einen groben Handlungsplan zur Lösung der Aufgabe zu entwerfen. Im Vordergrund stehen dabei vorrangig kognitive Prozesse, zu denen unter anderem verbale, visuelle und räumliche Prozesse gehören können. Diese kognitiven Prozesse beanspruchen einen hohen Anteil der Aufmerksamkeitskapazitäten, so dass es den Lernenden kaum möglich ist, zusätzliche Informationen aufzunehmen bzw. zu verarbeiten (eine genauere Differenzierung der Aufmerksamkeit, welche in dieser Arbeit als kapazitär limitiert aufgefasst wird, erfolgt in Kapitel 2.2.1). In dieser Lernphase stehen sehr häufig verbale Prozesse im Vordergrund: Die Lernenden sprechen, in Gedanken oder auch laut, mit sich selbst über die geplanten Handlungsschritte und denken über Strategien zur Lösung des Bewegungsproblems nach. Die noch artikulierbaren Bewegungsregeln bleiben bewusst zugänglich und ermöglichen somit eine Anpassung an andere, ähnliche Aufgaben. In diesem Lernstadium zeigen sich bereits in kurzer Zeit erhebliche Lernfortschritte bei noch geringer Qualität der Bewegungsausführung. Die Leistung variiert von einem zum nächsten Versuch sehr stark, da die Lernenden viele und gleichzeitig relativ große Fehler machen. Verbale und visuelle Informationen aus externen Quellen (bspw. Instruktionen, Demonstrationen, Feedback) scheinen in dieser Lernphase besonders förderlich zu sein (Magill, 2014, S. 274–277; Müller & Blischke, 2009, S. 168–169; Schmidt & Lee, 2011, S. 430–431; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 196–197).

Die anschließende zweite Lernphase zeichnet sich dadurch aus, dass sich der zuvor noch grobe Bewegungsplan stetig weiterentwickelt und ausdifferenziert. Die Bewegungsausführung wird konsistenter und leistungsstabiler und kann teilweise auch unabhängig von bewusster Kontrolle ausgeführt werden, so dass verbale und kognitive Prozesse immer mehr in den Hintergrund rücken. Die Lernenden können intrinsisches Feedback generieren und Bewegungsfehler erkennen. Das extrinsische Feedback sollte in diesem Lernstadium also präziser werden und sich direkt auf die zu verbessernden Aspekte der Bewegung konzentrieren. Dieses Lernstadium kann zumeist durch größere Übungsumfänge erreicht werden und dauert, in Abhängigkeit von der Komplexität der Bewe-

gung, mehrere Wochen bis Monate. In Abhängigkeit von den Übungsbedingungen kommt es entweder zu einer Stabilisierung einer geschlossenen Fertigkeit oder zu einer Ausdifferenzierung einer offenen Fertigkeit. Geschlossene Fertigkeiten sind sowohl durch eine optimierte Koordination und einen Rückgang des Bedarfs bewusster Kontrolle, als auch durch eine verringerte Ausführungsvariabilität gekennzeichnet. Offene Fertigkeiten hingegen ermöglichen, durch eine rasche Auswahl situationsspezifisch angepasster Ausführungsvarianten, eine flexiblere Bewegungslösung (Magill, 2014, S. 274–277; Müller & Blischke, 2009, S. 169; Schmidt & Lee, 2011, S. 431; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 197–198).

Die dritte und letzte Lernphase ist dadurch gekennzeichnet, dass die Bewegung nach sehr hohen Übungsumfängen (zumeist Monate bis Jahre) nahezu automatisch und fast aufmerksamkeitsfrei ausgeführt werden kann. Die Bewegungskontrolle läuft eher unbewusst ab, so dass Aufmerksamkeitskapazitäten frei werden, um zusätzliche Informationen wahrnehmen und verarbeiten zu können. So können während der Bewegungsausführung bspw. taktische Entscheidungen getroffen oder kurzfristige Anpassungen der Bewegung durchgeführt werden, ohne, dass die eigentliche Zielbewegung erheblich gestört wird. Die für die erste Lernphase bedeutenden verbalen Prozesse (bspw. die „Selbstgespräche“) treten sehr selten auf bzw. führen in diesem Lernstadium sogar eher zu einer Leistungsminderung. Eine Leistungssteigerung ist auf Verhaltensebene kaum noch zu beobachten. Dafür kommt es zu einer Reduktion der mentalen und physischen Anforderungen und einer hochgradigen Optimierung der Fehlererkennungs- und Korrekturmechanismen. Kritische Faktoren für das Erreichen dieses Lernstadiums scheinen die Qualität der extrinsischen Informationen und der Übungsumfang zu sein (Magill, 2014, S. 274–277; Müller & Blischke, 2009, S. 169–170; Schmidt & Lee, 2011, S. 431; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 198–200).

Für diese Arbeit dienen die vorgestellten Lernphasenmodelle jedoch nur als Ausgangspunkt für ein ganzheitliches Verständnis des motorischen Lernens. Schließlich muss bei der Betrachtung dieser Modelle stets berücksichtigt werden, dass eine Aufteilung in verschiedene Lernstadien eher aus didaktischen Gründen vorgenommen wird und nicht den tatsächlichen Lernverlauf widerspie-

gelt. Dieser ist nämlich viel mehr durch kontinuierliche Veränderungsprozesse charakterisiert, die in neueren Modellen, welche neurowissenschaftliche Befunde integrieren, besser berücksichtigt werden. Diese Theorien, die in Kapitel 2.2.2.6 bis 2.2.2.8 genauer dargestellt sind, beschreiben und erläutern Aktivitätsverschiebungen in bestimmten Gehirnbereichen, die mit den lernbedingten Veränderungen auf Verhaltensebene einhergehen. Insofern sind diese Theorien die aktuellen Weiterentwicklungen und Spezifikationen der gerade vorgestellten, traditionell etablierten Lernphasenmodelle und bilden den zentralen theoretischen Rahmen dafür, wie der Prozess des motorischen Lernens in dieser Arbeit verstanden werden soll. Um diese Modelle richtig einordnen zu können, muss zunächst geklärt werden, wie motorisches Lernen überhaupt gemessen werden kann (siehe Kapitel 2.1.2) und was unter den Begriffen Automatisierung und Aufmerksamkeit (siehe Kapitel 2.2.1 und 2.2.2) zu verstehen ist.

### 2.1.2 Motorisches Lernen messen

Um motorisches Lernen zu messen, wird in den meisten Untersuchungen die Leistungssteigerung auf Verhaltensebene als „primäres“ Kriterium herangezogen (Müller & Blischke, 2009, S. 165–167; Schmidt & Lee, 2011, S. 329–342; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 199), die dem von Magill als *improvement* beschriebenen Merkmal entspricht und in der Motorikforschung über eine Verbesserung der *performance* erhoben wird. Die dabei häufig zum Einsatz kommenden Leistungskurven, welche den Leistungsverlauf in Abhängigkeit zum Übungsprozess abbilden, werden jedoch stark durch temporäre Faktoren (bspw. Ermüdung, Motivation, Aufwärmefekte, Feedback, etc.) beeinflusst und sind deshalb ungeeignet, um langfristige Lerneffekte zu beschreiben. Um von motorischem Lernen sprechen zu können, müsste, wie in Kapitel 2.1 bereits dargelegt, eine relativ überdauernde Verhaltensänderung beobachtbar sein. Aus diesem Grund wird das primäre Kriterium der Leistungsverbesserung in der Experimentalpraxis mit sogenannten Transfer-Test- oder Retentions-Test-Designs untersucht (Magill, 2014, S. 269; Müller & Blischke, 2009, S. 161–166; Schmidt & Lee, 2011, S. 329–337; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 199–200). Dabei wird die Leistung der Versuchsteilnehmer vor und nach einer Übungs-

phase miteinander verglichen. Bedeutend ist dabei, dass der Retentions-Test erst nach einem hinreichenden Behaltensintervall von in der Regel mindestens 24 Stunden durchgeführt wird, um, wie in den Definitionen zum motorischen Lernen gefordert, langfristig überdauernde Veränderungen feststellen zu können (Müller & Blischke, 2009, S. 165–166; Schmidt & Lee, 2011, S. 335–336). Bei einem Retentions-Test werden die gleichen Aufgaben durchgeführt, die die Versuchspersonen in der Übungsphase eingeübt haben. In einem Transfer-Test werden Variationen der geübten Aufgabe oder sogar neue Teilaufgaben ausgeführt (Kantak & Winstein, 2012, S. 221; Schmidt & Lee, 2011, S. 335–336).

Es existiert eine Vielzahl möglicher Kenngrößen, die verwendet werden können, um die Leistung zu messen. Welche Parameter zur Erfassung der Leistung am besten geeignet sind, hängt jedoch von der Bewegungsaufgabe und der spezifischen Zielstellung ab (Schmidt & Lee, 2011, S. 26; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 337). Die folgenden Parameter gehören zu den häufigsten in der verhaltensorientierten Motorikforschung verwendeten Leistungsmaßen: Besteht die Aufgabe darin möglichst schnell auf einen Stimulus zu reagieren, werden in der Regel Reaktionszeiten gemessen. Bei Bewegungen mit der Zielstellung der Präzision, wird die Leistung mit Hilfe verschiedener Fehlermaße erhoben. Für verlaufsorientierte Aufgaben werden vor allem kinematische (Lage, Geschwindigkeit, Beschleunigung) oder kinetische (Kraft, Muskelaktivität) Leistungsmaße ermittelt. Zusätzlich werden immer öfter neurophysiologische Maße eingesetzt, um Informationen über die Gehirnaktivität zu gewinnen und diese mit den Leistungsmaßen auf Verhaltensebene in Beziehung zu setzen (Magill, 2014, S. 27–50; Schmidt & Lee, 2011, S. 26).

Es ist jedoch problematisch, motorisches Lernen rein über das Kriterium der Leistungssteigerung zu messen, da nicht nur die Leistungssteigerung, sondern auch, wie in der Problemstellung bereits angerissen, die Automatisierung der zu erlernenden Fertigkeit als zentrales Ziel des motorischen Lernens angesehen wird. Darüber hinaus zeigt sich, wie bereits in Kapitel 2.1.1 dargestellt, vorrangig zu Beginn des Lernens eine starke Verbesserung der Leistung. Im weiteren Lernverlauf kommt es hingegen eher zu einer Optimierung und Stabilisation der Leistung, bis schlussendlich kaum noch Verbesserungen zu beobachten sind.

Trotz dessen findet auch im fortgeschrittenen Lernprozess motorisches Lernen statt. Eine reine Betrachtung der Leistungsveränderung würde somit zu dem Problem führen, dass, aufgrund der häufig auftretenden Decken- bzw. Bodeneffekte, vorhandene Lerneffekte nicht mehr dargestellt werden können (Magill, 2014, S. 269–270; Schmidt & Lee, 2011, S. 338–342):

The measurement of performance on a task often does not tell us much about the person's level of learning. Additional practice (. . .) will probably result in some additional learning of the skill even at advanced levels of proficiency, but the experimenter may not be able to detect these effects because the subjects are so close to the performance ceiling or floor, as the case may be. (Schmidt & Lee, 2011, S. 339)

Aus diesem Grund ist es notwendig, „sekundäre“/alternative Kriterien heranzuziehen, um die auf Seiten der Leistungssteigerung ggf. nicht mehr beobachtbare Veränderung motorischer Kompetenz abbilden zu können.

Schmidt und Lee empfehlen zu diesem Zweck die Dual-Task-Methodik, welche im Sinne von Magill das Kriterium *reduction of attention demand* abzubilden versucht und somit näheren Aufschluss über Automatisierungsprozesse liefern kann. Wie im vorangegangenen Kapitel bereits dargestellt, zeigt sich eine Reduktion des Aufmerksamkeitsbedarfes vor allem in späten Lernphasen, wenn die Bewegungen nahezu automatisch ausgeführt und fast nicht-attentional kontrolliert werden. Dadurch werden attentionale Ressourcen frei, die für parallel auszuführende Aufgaben eingesetzt werden können. Genau dieses Phänomen macht sich die Dual-Task-Methodik zu Nutze, indem eine Zusatzaufgabe genutzt wird, um die kognitiven Anforderungen der Bewegungsaufgabe zu messen (Schmidt & Lee, 2011, S. 338–342). Eine genauere Erläuterung der Dual-Task-Methodik ist in Kapitel 2.2.3 zu finden. Die Reduktion des Aufmerksamkeitsbedarfes als sekundäres Kriterium heranzuziehen, scheint demnach eine sinnvolle Ergänzung zur Erhebung der Leistungssteigerung zu sein, wenn man den Prozess des motorischen Lernens in seiner Gesamtheit untersuchen möchte. In diesem Zusammenhang steht die Forderung von Schmidt und Lee, auch aus anwendungsorientierter Sicht, den Fokus der Motorikforschung stärker auf späte Lernphasen zu richten: „A major problem for motor behavior research is that this [autonomous/automatic] stage, which is of immense importance for

understanding high-level skills, is only rarely studied in experiments on motor learning” (Schmidt & Lee, 2011, S. 431).

Neben der Dual-Task-Methodik existieren zahlreiche weitere sekundäre Kriterien, die in Abhängigkeit vom Untersuchungskontext angewendet werden können, um Lerneffekte genauer zu beschreiben. Im Sinne des Merkmals *consistency* wird bspw. die Ausführungsvariabilität/-stabilität erhoben, die sich entsprechend der Lernphasenmodelle vorrangig in der mittleren Lernphase verbessern müsste. Eine Anpassung der Fertigkeit an veränderte Umgebungsbedingungen, die *adaptability*, kann durch die bereits angesprochenen Transfer-Tests überprüft werden. Die Erhebung der *persistence* geschieht über Retentions-Tests, die nach einer Pause von mindestens 24 Stunden oder länger durchgeführt werden, um die Behaltensstabilität nach längeren Zeiträumen zu testen (Magill, 2014, S. 269; Müller & Blischke, 2009, S. 166–167; Schmidt & Lee, 2011, S. 338–342).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, um motorisches Lernen zu messen, eine Vielzahl verschiedener Merkmale untersucht werden kann. Durch die vorangegangenen Ausführungen und das folgende Zitat von Schmidt und Lee wird jedoch deutlich, dass eine reine Beobachtung der Leistungssteigerung nicht ausreicht, um den hochkomplexen Prozess des motorischen Lernens zu erfassen: „Above all, we stress here the deficiency in the oversimplified idea that learning is merely a change in behavior on the task in question. It is clearly a much more complex set of processes” (Schmidt & Lee, 2011, S. 342). Demnach sollte bei Experimenten zum motorischen Lernen ein weiteres Kriterium, neben dem geläufigen Kriterium der Leistungssteigerung, untersucht werden. Da sich diese Arbeit gleichsam der Leistungssteigerung und Automatisierung als zwei bedeutenden Teilaspekten des motorischen Lernens widmet, werden in der geplanten Untersuchung, die im Kapitel 3 vorgestellt wird, zwei entsprechende Lernmaße verwendet werden.

### 2.1.3 Zusammenfassung

Das motorische Lernen ist ein hochkomplexer Prozess, der durch Übung zu einer relativ überdauernden Veränderung motorischer Kompetenz führt, die mit einer Ausbildung und Korrektur motorischen Gedächtnisbesitzes einhergeht und in der Regel zu einer relativ überdauernden Verhaltensänderung führt (siehe Kapitel 2.1). Mit Hilfe der Lernphasenmodelle, die in Kapitel 2.1.1 dargestellt sind, lässt sich ein erster Überblick darüber verschaffen, welche Veränderungen auf Seiten der Kontrollprozesse und im Verhalten mit dem motorischen Lernen einhergehen. Eine Erweiterung dieses Verständnisses über charakteristische Veränderungsprozesse im Lernverlauf bieten die durch neurowissenschaftliche Befunde erweiterten Modelle, welche in Kapitel 2.2.2.6 bis 2.2.2.8 dargestellt werden. Experimentell wird motorisches Lernen in der Regel durch die Leistungssteigerung und möglichst ein weiteres Kriterium beobachtet und untersucht (siehe Kapitel 2.1.2). Eine Forschungslücke in der Motorikforschung sehen Schmidt und Lee im Bereich der späten Lernphasen: Nur wenige Untersuchungen haben sich bisher bemüht, die Grundsätze der Automatisierung/Automatisierung motorischer Aufgaben zu verstehen. Dies ist jedoch unbedingt notwendig, wenn motorisches Lernen in seiner Gesamtheit untersucht werden soll (Blischke & Reiter, 2002, S. 11; Schmidt & Lee, 2011, S. 432). Dies hat vor allem eine praktische Bedeutsamkeit, da die Automatisierung nicht nur ein zentrales Ziel jedes (sport-)motorischen Techniktrainings ist, sondern die meisten Alltagsbewegungen, wie bspw. das Gehen, Fahrrad- oder Autofahren, größtenteils automatisch kontrolliert werden (Blischke & Reiter, 2002, S. 8). Aus diesen Gründen wird die Automatisierung motorischer Fertigkeiten für diese Arbeit, neben der Leistungssteigerung, als bedeutender Teilaspekt des motorischen Lernens angesehen. Zu diesem Zweck werden im folgenden Kapitel die speziellen theoretischen Grundlagen zum Themenfeld der Automatisierung aufgearbeitet.

## 2.2 Automatisierung als bedeutender Teilaspekt des motorischen Lernens

Wie bereits dargestellt, ist die Automatisierung motorischer Fertigkeiten ein bedeutender Teilaspekt des motorischen Lernens, der bisher jedoch nur spärlich untersucht wurde. Aus diesem Grund finden sich in der Literatur kaum klare Aussagen darüber, was unter Automatisierung zu verstehen ist (Blischke & Reiter, 2002, S. 9–11). In der Regel wird der Begriff jedoch verwendet, wenn die Kontrolle einer Fertigkeit im Lernverlauf reduzierte Anforderungen an die Aufmerksamkeitsressourcen stellt. Automatisierung ist demnach als *Prozess* zu verstehen (Blischke & Reiter, 2002, S. 9; Müller & Blischke, 2009, S. 203; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138; Neumann, 1984, S. 282; Schmidt & Lee, 2011, S. 449). Der Begriff Automtizität hingegen beschreibt den *Zustand*, eine Fertigkeit ohne oder mit nur geringem Aufmerksamkeitsbedarf ausführen zu können (Magill, 2014, S. 213).

Über dieses grundlegende Verständnis hinausgehend, existieren einige Erklärungsansätze, die sich umfassender mit dem Phänomen der Automtizität auseinandersetzen. Dabei sind an erster Stelle die Zwei-Prozess-Theorien zu nennen, die grundsätzlich zwischen zwei Arten von Kontrollprozessen unterscheiden: „kontrollierte Prozesse“, die Aufmerksamkeit erfordern und „automatische Prozesse“, die aufmerksamsfrei ablaufen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138–139). Diese dichotome Auffassung wird mittlerweile jedoch kritisch gesehen, da eine Fertigkeit somit entweder einer kontrollierten oder einer automatischen Bewegungskontrolle unterliegen müsste. Dies widerspricht nämlich dem graduellen Übergang zwischen den Lernphasen und würde voraussetzen, dass eine automatisierte Aufgabe komplett aufmerksamsunabhängig und infolgedessen interferenzfrei mit verschiedensten Sekundäraufgaben ausgeführt werden könnte (Schmidt & Lee, 2011, S. 107). Aus diesen Gründen wird Automtizität gegenwärtig vielmehr als Kontinuum verschiedener Automtizitätsgrade angesehen. Der Prozess der Automatisierung entspricht demnach der Verlagerung auf diesem Kontinuum, hin zum automatisch kontrollierten Ende (Cohen, McClelland & Dunbar, 1990, S. 357; Magill, 2014, S. 214; Schmidt & Lee, 2011, S. 107; Underwood & Everatt, 1996, S. 186).

Bevor die spezifischen Zwei-Prozess-Theorien ab dem Kapitel 2.2.2 ausführlicher vorgestellt und diskutiert werden, wird an dieser Stelle die Auseinandersetzung mit dem grundlegenden Konzept der Aufmerksamkeit vorangestellt.

### 2.2.1 *Aufmerksamkeitstheorien und Arbeitsgedächtnismodelle*

Am Konzept der Aufmerksamkeit besteht seit dem 19. Jahrhundert ein großes Interesse in der Psychologie und Motorikforschung. Ein Grund dafür ist die zentrale Bedeutung der Aufmerksamkeit für nahezu alle Aspekte der Wahrnehmung, Kognition und Handlung (Abernethy, Maxwell, Masters, van der Kamp & Jackson, 2007, S. 245; Schmidt & Lee, 2011, S. 97). Trotz der weiten Verbreitung des Begriffes, gibt es keine allgemein anerkannten Definitionen oder Konzepte, sondern vielmehr eine große Vielfalt an verschiedenen Aufmerksamkeitstheorien (Abernethy, 2001, S. 53–54; Abernethy et al., 2007, S. 245; Posner & Boies, 1971, S. 391; Schmidt & Lee, 2011, S. 97). Eine übersichtliche Zusammenfassung und Gruppierung der in der Forschung verwendeten Auffassungen von Aufmerksamkeit erstellten Posner und Boies 1971, indem sie folgende drei Hauptthemenfelder ausmachten (S. 391-392):

- 1.) Wachheit (*alertness*)
- 2.) Selektive Aufmerksamkeit (*selectivity*)
- 3.) Limitierte Kapazität (*limited processing capacity*)

Die Wachheit bzw. Wachsamkeit (*alertness*) bezeichnet die Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit und wird sowohl für die Durchführung langandauernder, ermüdender Aufgaben, als auch für eine optimale Sensitivität bei der Vorbereitung auf Reaktionsaufgaben benötigt (Abernethy, 2001, S. 54; Abernethy et al., 2007, S. 245; Posner & Boies, 1971, S. 391).

Die zweite wesentliche Funktion der Aufmerksamkeit ist die Selektion (*selectivity*), also die Auswahl bestimmter Inhalte bzw. Informationen mit dem Ziel, diese der Steuerung von Denken und Handeln zugänglich zu machen, während gleichzeitig andere, irrelevante oder möglicherweise ablenkende Informationen ausgeblendet werden (Müller & Krummenacher, 2003, S. 104). Angesichts der Fülle an visuellen, auditiven, kinästhetischen, taktischen, etc. Reizen, die im

Alltag und im Sport auf uns einströmen, ist es für ein effizientes und störungsfreies Handeln unbedingt notwendig, dass nur die wichtigsten Informationen verarbeitet werden (Abernethy, 2001, S. 67; Müller & Krummenacher, 2003, S. 105). Die Selektion kann entweder intentional oder unbeabsichtigt passieren. Wenn einer Informationsquelle zielgerichtet Beachtung geschenkt wird (bspw. dem Zeitung lesen), während zeitgleich das Abschweifen der Aufmerksamkeit zu anderen Inhalten (bspw. dem Radiohören) gehemmt wird, handelt es sich um eine intentionale Selektion. Eine unabsichtliche Fokussierung der Aufmerksamkeit geschieht in der Regel durch externe Stimuli, wie bspw. laute oder erschreckende Geräusche (Schmidt & Lee, 2011, S. 99). Eine bewusste Verarbeitung und Lenkung der Aufmerksamkeit ist somit nicht in allen Fällen notwendig, so dass es problematisch wäre, Aufmerksamkeit notwendigerweise an Bewusstsein/Bewusstheit (*consciousness*) zu koppeln (Abernethy, 2001, S. 53).

Diese Annahmen zur selektiven Aufmerksamkeit sind bereits sehr eng mit der dritten von Posner und Boies genannten Eigenschaft der Aufmerksamkeit, der begrenzten Kapazität (*limited processing capacity*), verbunden. Denn wenn man von limitierten Aufmerksamkeitsressourcen ausgeht, scheint eine Selektion notwendig zu sein, um die vorhandenen Kapazitäten nicht mit allen eintreffenden Informationen zu überlasten (Abernethy, 2001, S. 67; Schmidt & Lee, 2011, S. 99). Darüber hinaus könnte die Limitierung der Aufmerksamkeit, wie von Neumann postuliert, eher als Folge von Verhaltenshemmungen und Selektionsprozessen entstehen (Neumann, 1992, S. 92–96; Neumann, 1996, S. 412–414). Näheres zu Neumanns Auffassung von Aufmerksamkeit und seinen kritischen Anmerkungen bezüglich der folgenden Aufmerksamkeitskonzepte ist in Kapitel 2.2.1.5 zu lesen.

An dritter Stelle führen Posner und Boies an, dass die Kapazitäten bzw. die Ressourcen zur Informationsverarbeitung limitiert sind (Posner & Boies, S.392; Schmidt & Lee, 98). Die gleichzeitige Ausführung von mehreren Aufgaben ist somit nur bedingt möglich bzw. führt zu Interferenzen oder Leistungseinbußen, wenn die gemeinsamen Verarbeitungsanforderungen mehrerer Aufgaben die zur Verfügung stehenden Kapazitäten übersteigen. Aufgrund dieser Leistungsminderungen kann jedoch anschließend auf die Limitationen der Informations-

verarbeitungskapazitäten geschlossen werden (Abernethy, 2001, S. 54; Müller & Krummenacher, 2003, S. 132; Schmidt & Lee, 2011, S. 97–99).

Theoretische Konzepte, die Erklärungen für Interferenzen durch Mehrfachaufgabentätigkeit mit Bezug zu Selektionsprozessen bieten, wurden seit den 1950er Jahren entwickelt. Die wichtigsten dieser aufmerksamkeitstheoretischen Ansätze werden in den folgenden Unterkapiteln ausführlicher dargestellt, da sie eng mit dem Konzept der Automatisierung/Automatizität, wie aus den Definitionen in Kapitel 2.2 hervorgeht, zusammenhängen (Magill, 2014, S. 202; Müller & Krummenacher, 2003, S. 132).

#### 2.2.1.1 Ein-Kanal-Theorien bzw. Filtertheorien

Zu den ersten Aufmerksamkeitskonzepten gehören die sogenannten Ein-Kanal- bzw. Filtertheorien. Ein schematischer Überblick über die wichtigsten dieser Theorien ist in Abb. 1 dargestellt. Bereits bei einer groben Betrachtung der Grafik ist erkennbar, dass alle Theorien von einem Engpass (*bottleneck*) im Verarbeitungsprozess ausgehen. An dieser Stelle werden parallel eintreffende Informationen gefiltert, bevor die selektierte Information anschließend in einem einzigen verfügbaren Kanal weiter verarbeitet wird. Die verschiedenen Theorien haben die Gemeinsamkeit, dass sie, in Form des einzigen Verarbeitungskanals, eine limitierte Kapazität für die Informationsverarbeitung annehmen, die nicht auf mehrere Prozesse aufteilbar ist. Die Verarbeitung mehrerer eintreffender Stimuli muss also seriell erfolgen. Die Konzepte unterscheiden sich hauptsächlich in der Annahme, welche Prozesse Aufmerksamkeit benötigen und zu welchem Zeitpunkt somit die Selektion notwendig ist (Magill, 2014, S. 202–203; Schmidt & Lee, 2011, S. 100).

Die in Zeile eins der Abbildung dargestellte Theorie von Welford (1952) nimmt an, dass alle Informationsverarbeitungsprozesse Aufmerksamkeit benötigen und somit nur ein einziger Reiz-Antwort-Vorgang auf einmal ausgeführt werden kann. Alle weiteren eintreffenden Signale würden demnach so lange geblockt bis die Verarbeitung des ersten Reizes abgeschlossen ist, um anschließend seriell die Verarbeitung des nächsten Reizes zu starten (Müller & Krummenacher, 2003, S. 106; Schmidt & Lee, 2011, S. 100–101). Alle im Anschluss ent-

wickelten Theorien nehmen an, dass einige frühe Prozesse aufmerksamkeitsunabhängig und somit parallel ablaufen können (parallel processing). Nach der von Broadbent (1958) entwickelten Filtertheorie (siehe Zeile zwei in Abb. 1) trifft dies auf die Enkodierung sensorischer Informationen zu, die gleichzeitig Zugang zu einem sensorischen Speicher (in Abb. 1 als „sensory storage“ bezeichnet) erlangen. Der an dieser Stelle verortete Filter selektiert einen Reiz, der zum zentralen, kapazitätär limitierten Verarbeitungskanal weitergeleitet wird.

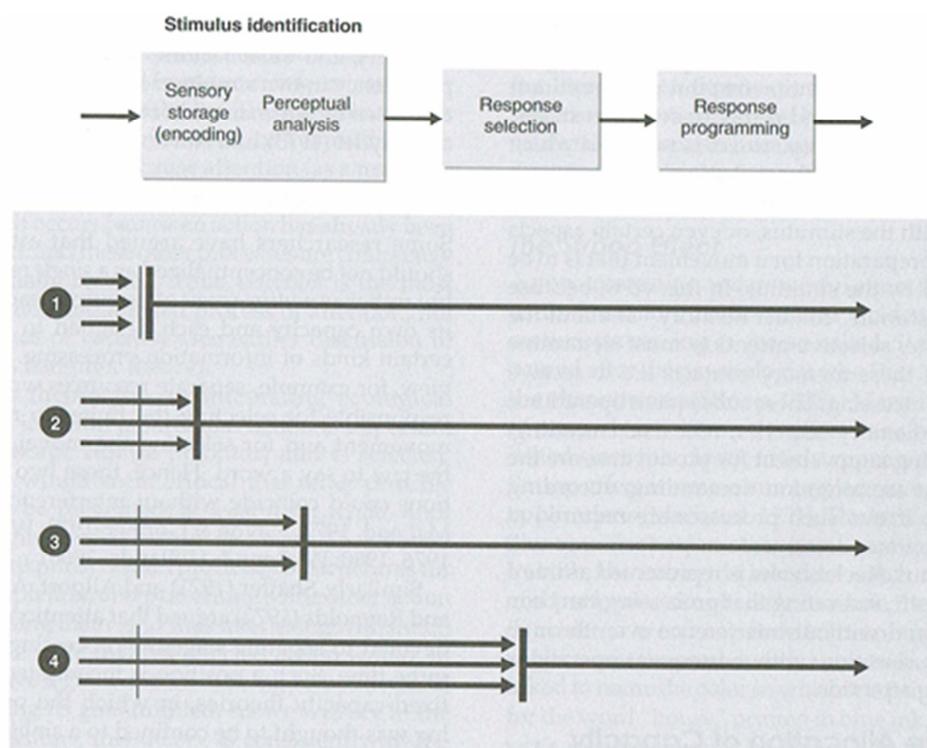


Abb. 1. Bedeutung der Aufmerksamkeit in den verschiedenen Prozessstadien unterschiedlicher Ein-Kanal-Theorien. Zeile 1: Original Ein-Kanal-Theorie (Welford, 1952); Zeile 2: Broadbents Filter-Theorie (Broadbent, 1958); Zeile 3: Theorie der späten Selektion (Deutsch & Deusch, 1963 und Norman, 1969); Zeile 4: Keeles Theorie (Keele, 1973) (modifiziert nach Schmidt & Lee, 2011, S. 101).

Die nicht selektierten Stimuli werden blockiert, aber für einen späteren Zugriff vorübergehend im Speicher belassen. Entsprechend dieser Theorie ist eine zeitgleiche Ausführung mehrerer Aufgaben nur möglich, indem die Aufmerksamkeit durch schnelles Umschalten des Filters auf die unterschiedlichen Eingangssignale umgeschwenkt wird (Kahnemann, 1973, S. 6; Müller & Krumenacher, 2003, S. 106–107; Schmidt & Lee, 2011, S. 100–101). Interferenzen und Leistungseinbrüche ergeben sich demnach durch die limitierte Kapazität des einzigen Verarbeitungskanals (Neumann, 1996, S. 391).

Weitere Ansätze, wie die von Deutsch und Deutsch (1963) oder Keele (1973), welche in Zeile drei und vier der Abb. 1 dargestellt sind, unterscheiden sich von Broadbents Filtertheorie hauptsächlich bezüglich des Selektions-Zeitpunktes (Müller & Krummenacher, 2003, S. 107–108; Schmidt & Lee, 2011, S. 100–102).

Alle diese Theorien haben die Gemeinsamkeit, dass die Selektion und anschließende Informationsweiterleitung nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip funktioniert. Dieser Annahme stehen Befunde gegenüber, die eine Verarbeitung der nicht selektierten Informationen im nicht beachteten Verarbeitungskanal aufzeigen. Diese Erkenntnisse berücksichtigt Treisman, als sie in den 1970er Jahren die Attenuationstheorie der Aufmerksamkeit entwickelte, die im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Ein-Kanal-Theorien von einem Mehr-oder-Weniger-Prinzip bei der Informationsweiterleitung ausgeht. Demnach werden die nicht selektierten Informationen nicht komplett abgeblockt, sondern können in abgeschwächter Form weitergeleitet und verarbeitet werden. Den zentralen Engpass vermutet Treisman allerdings, wie auch Broadbent, relativ früh im Verarbeitungsprozess (Abernethy et al., 2007, S. 246–247; Müller & Krummenacher, 2003, S. 106–107).

Es wird als großer Schwachpunkt der Ein-Kanal- und Filtertheorien angesehen, dass sie nicht alle Anwendungssituationen, wie bspw. die gleichzeitige Ausführung zweier oder mehrerer Aufgaben, erklären können (Magill, 2014, S. 203). Darüber hinaus konnten experimentell zu verschiedenen Zeitpunkten im Informationsverarbeitungsprozess zentrale Engpässe gefunden werden, so dass es, im Gegensatz zu den Annahmen der vorgestellten Konzepte, nicht möglich ist, eine fixe Lokalisation des Filters im Verarbeitungsprozess festzumachen (Abernethy, 2001, S. 62; Müller & Krummenacher, 2003, S. 136–137). Aus diesen Gründen wurden die Ein-Kanal- und Filtertheorien durch die Theorien zentraler Kapazität abgelöst, die annehmen, dass Informationsverarbeitungsprozesse nicht seriell, sondern parallel ablaufen und Aufmerksamkeitslimitierungen vielmehr aufgrund begrenzter Ressourcen existieren (Abernethy et al., 2007, S. 247; Magill, 2014, S. 203; Müller & Krummenacher, 2003, S. 137–138).

### 2.2.1.2 Theorien zentraler Kapazität

Die Theorien zentraler Kapazität verstehen Aufmerksamkeit als eine undifferenzierte, begrenzte Ressource, die flexibel auf mehrere Aufgaben verteilt werden kann (Abernethy, 2001, S. 62; Kahnemann, 1973, S. 7–8; Magill, 2014, S. 203; Müller & Krummenacher, 2003, S. 137; Neumann, 1996, S. 400–401). Die Grundidee des Konzeptes lässt sich gut anhand der folgenden Abbildung (siehe Abb. 2) verdeutlichen.

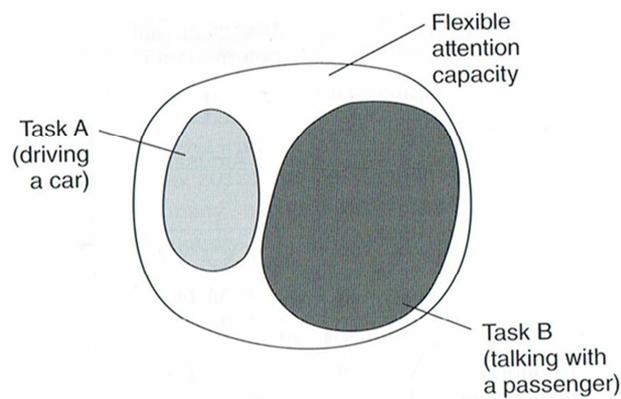


Abb. 2. Schematische Darstellung der zentralen, limitierten Aufmerksamkeitskapazität mit zwei simultan ausgeführten Aufgaben, die jeweils nur einen Teil der Gesamtkapazität beanspruchen (modifiziert nach Magill, 2014, S. 203).

Die grundsätzlich zur Verfügung stehende Aufmerksamkeitskapazität ist durch den großen Kreis, der mit *flexible attention capacity* betitelt wird, dargestellt. Die zwei kleineren Kreise innerhalb des großen Kreises stehen für die Anteile der Aufmerksamkeitsanforderungen, die durch zwei unterschiedliche Tätigkeiten beansprucht werden. In diesem Fall werden zeitgleich Aufmerksamkeitskapazitäten für die Aufgabe des Autofahrens (Task A) und das Gespräch mit einem Mitfahrer (Task B) zur Verfügung gestellt. So lange die aufsummierten Aufmerksamkeitsanforderungen der Tätigkeiten die verfügbare Gesamtkapazität nicht übersteigen, also die kleinen Kreise innerhalb des großen Kreises untergebracht werden können, können diese ohne Interferenzen ausgeführt werden (Magill, 2014). Für die gleichzeitige Ausführung mehrerer Tätigkeiten sind also die Ressourcenanforderungen bzw. die Schwierigkeiten der Aufgaben ausschlaggebend (Abernethy, 2001, S. 62; Müller & Krummenacher, 2003, S. 137).

Somit können die Theorien zentraler Kapazität, im Gegensatz zu den Ein-Kanal-Theorien, das Auftreten verschiedener *bottlenecks* im Informationsverarbeitungsprozess, in Abhängigkeit vom Individuum und der Aufgabenschwierigkeit, durch die flexible Verteilung der Aufmerksamkeitskapazität erklären (Abernethy, 2001, S. 62; Abernethy et al., 2007, S. 247).

Die erste Theorie zentraler Kapazität entwickelte Moray (1967), indem er einen Vergleich mit der CPU eines Computers anstellte und eine limitierte Aufmerksamkeitsressource im Sinne eines zentralen Allzweck-Prozessors annahm. Ähnlich wie im Zusammenhang mit Abb. 2 bereits dargestellt, kann die Kapazität dieses Prozessors je nach Bedarf flexibel auf verschiedene Vorgänge verteilt werden (Abernethy, 2001, S. 54; Neumann, 1996, S. 401).

Einen eher energetischen Ansatz verfolgt Kahnemann (1973), der zwar ebenfalls von einer limitierten, jedoch flexibel verteilbaren Kapazität ausgeht. Kahnemann versteht Aufmerksamkeit als kognitiven Aufwand (*cognitive effort*). Die Ressourcen zur Aufbringung des kognitiven Aufwandes sind im zentralen Nervensystem verortet und stehen nur in einem begrenzten Umfang zur Verfügung, der jedoch flexibel angepasst werden kann (Gopher & Sanders, 1984, S. 233; Magill, 2014, S. 203–204): „The amount of available attention can vary depending on certain conditions related to the individual, the task being performed, and the situation“ (Magill, 2014, S. 204). In diesem Sinne kann sich also die Größe des Kreises, der in Abb. 2 als *flexible attention capacity* betitelt ist und die verfügbare Gesamtkapazität darstellt, in Abhängigkeit von bestimmten personellen, aufgaben- und situationsspezifischen Bedingungen verändern. Einen direkten Einfluss auf die Aufmerksamkeitskapazität hat die Erregtheit bzw. Aufgeregtheit (*arousal*) der Person, die per Definition als grundsätzlicher Erregungs- bzw. Aktivierungszustand des emotionalen, mentalen und physiologischen Systems verstanden wird und dem von Posner und Boies angesprochenen Hauptthemenfeld der Wachheit (*alertness*) zuzuordnen ist. Um die maximalen Aufmerksamkeitskapazitäten einsetzen zu können, ist nach Kahnemann ein optimales *arousal level* notwendig, da eine zu hohe oder zu geringe Erregtheit die zur Verfügung stehende Aufmerksamkeitskapazität einschränkt. Die Verteilung der Aufmerksamkeit auf verschiedene Aufgaben geschieht dann

in Abhängigkeit von der *allocation policy*, die als grundsätzliche Strategie der Aufmerksamkeitsverteilung verstanden wird und somit der Selektionsfunktion zugeordnet werden kann. Diese wird durch die Einschätzung der Ressourcenanforderungen der auszuführenden Aufgaben, mögliche Ablenkungen, die persönliche Bedeutung der Aufgaben und die momentane Zielsetzung beeinflusst (Kahnemann, 1973, S. 9–11; Magill, 2014, S. 204–206).

Im Sinne der Theorien zentraler Kapazität kommt es bei der gleichzeitigen Ausführung mehrerer Aufgaben zu Interferenzen, wenn die kombinierten Ressourcenanforderungen der Aufgaben die verfügbare Gesamtkapazität überschreiten. „Demzufolge ist die kritische Determinante der Zweifachaufgabenperformanz die Aufgabenschwierigkeit, wobei Schwierigkeit im Sinne der Ressourcenanforderungen definiert ist“ (Müller & Krummenacher, 2003, S. 137). Dementsprechend müssten identische Interferenzen auftreten, wenn die gleiche Primäraufgabe mit unterschiedlichen, jedoch gleich schweren Sekundäraufgaben kombiniert wird.

Dieser Annahme widersprechen allerdings zahlreiche Befunde, die inkonsistente Interferenzen in Abhängigkeit von der strukturellen Ähnlichkeit der kombinierten Aufgaben aufzeigen (Abernethy, 2001, S. 62; Abernethy et al., 2007, S. 247; Gopher & Sanders, 1984, S. 242; Müller & Krummenacher, 2003, S. 137–138; Neumann, 1992, S. 84–86; Neumann, 1996, S. 393–394). Unter anderem fanden Segal und Fusella (1970), sowie Allport, Antonis und Reynolds (1972) heraus, dass sich Interferenzen bei der Doppeltätigkeit nur dann zeigten, wenn beide Aufgaben der gleichen Modalität zuzuordnen sind (Allport, Antonis & Reynolds, 1972, S. 232–233; Müller & Krummenacher, 2003, S. 137–138; Neumann, 1996, S. 405). Darüber hinaus liegen bereits seit dem 19. Jahrhundert weitere und mittlerweile zahlreiche Forschungsergebnisse vor, die verdeutlichen, dass die strukturelle Interferenz als Normalfall, statt als Randphänomen zu verstehen ist (Neumann, 1992, S. 85). Daher forderten Allport und Kollegen die Annahme einer zentralen, undifferenzierten Aufmerksamkeitskapazität fallen zu lassen und im Sinne der von ihnen aufgestellten „multi-channel hypothesis“ von mehreren spezifischen Verarbeitungssystemen auszugehen (Allport et al., 1972, S. 233; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138; Neumann, 1996, S. 405).

Die infolgedessen entstandenen modularen Theorien werden im anschließenden Kapitel genauer vorgestellt.

### 2.2.1.3 Modulare Theorien

Die modularen Theorien nehmen die Existenz von „multiplen spezialisierten Ressourcen oder multiplen spezialisierten (modularen) Verarbeitungssystemen“ an (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138). Im Gegensatz zu den Theorien zentraler Kapazität wird also nicht von einer unspezifischen Aufmerksamkeitskapazität ausgegangen, sondern von mehreren Subsystemen, die für spezifische Informationsverarbeitungsprozesse zuständig sind und einen eigenen Ressourcenpool besitzen. Dementsprechend entstehen Interferenzen dann, wenn zwei Aufgaben die gleichen Subsysteme beanspruchen und deren kombinierten Anforderungen die verfügbare Kapazität überschreiten (Abernethy, 2001, S. 62–63; Abernethy et al., 2007, S. 247; Gopher & Sanders, 1984, S. 242; Magill, 2014, S. 206–207; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138; Schmidt & Lee, 2011, S. 102).

Als eine Ausarbeitung dieser zunächst grundsätzlichen Idee entwickelte Wickens (1980, 1984, 2002, 2008) das Konzept multipler Ressourcen, welches mittlerweile als eine der bedeutendsten modularen Theorien angesehen wird (Magill, 2014, S. 208). Die aktuellste Version des über die Jahre immer weiter überarbeiteten Modells ist in Abb. 3 zu sehen. Das Modell multipler Ressourcen geht von vier dichotomen Dimensionen mit zwei Ausprägungsformen (*levels*) aus, die jeweils über eigene, voneinander unabhängige Ressourcenpools verfügen. Demnach kommt es zu den stärksten Interferenzen, wenn zwei Aufgaben das gleiche *level* einer Dimension und somit die gleichen Ressourcen beanspruchen. Die vier Dimensionen, die in Abb. 3 dargestellt sind und im Folgenden genauer beschrieben werden, sind die Verarbeitungsphasen (*stages*), die Wahrnehmungsmodalitäten (*modalities*), die Verarbeitungs-codes (*codes*) und die visuelle Verarbeitung (*visual processing*) (Neumann, 1996, S. 406–407; Wickens, 2002, S. 163; Wickens, 2008, S. 449–450).

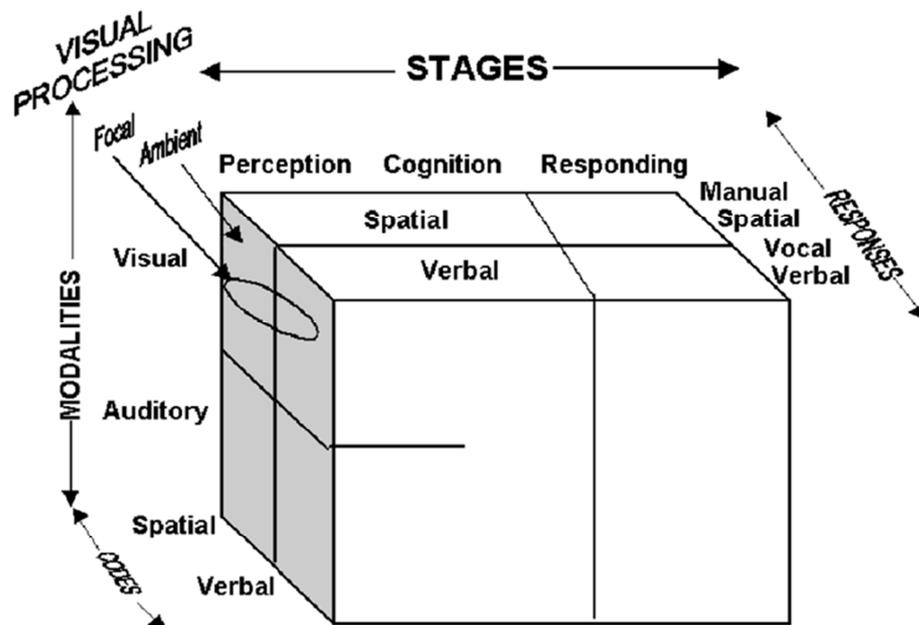


Abb. 3. Das 4-D Modell multipler Ressourcen von Wickens (modifiziert nach Wickens, 2008, S. 450).

Die Dimension der Verarbeitungsphasen (in Abb. 3: *stages*) beinhaltet wahrnehmende (*perception*), kognitive (*cognition*) und exekutive (*responding*) Stadien der Informationsverarbeitung. Aufgrund vielfältiger Befunde geht Wickens davon aus, dass durch Wahrnehmung und Kognition ein anderer Ressourcenpool, nämlich das Arbeitsgedächtnis, beansprucht wird, als durch die Selektion und Ausführung der Handlung (Wickens, 1980, S. 242–243; Wickens, 2002, S. 163–164; Wickens, 2008, S. 450). Somit greift Wickens in seinem Modell die Erkenntnisse der Phasen-Modelle auf und kombiniert diese mit neuen Befunden der Ressourcenmodelle (Gopher & Sanders, 1984, S. 231–244).

Die zweite Dimension umfasst die Verarbeitungs-codes (in Abb. 3: *codes*) mit den beiden Ausprägungsformen räumlich (*spatial*) und sprachlich (*verbal*). Befunde verschiedener Multitasking-Untersuchungen zeigen auf, dass räumliche und verbale Prozesse, unabhängig von der Verarbeitungsphase, auf zwei unterschiedliche Ressourcen zurückgreifen, die möglicherweise den beiden Gehirnhälften entsprechen. Ein starkes Argument für die Trennung in räumliche und verbale Verarbeitungs-codes ist die hohe Effektivität mit der gleichzeitig manuelle (eher räumlich kodierte) und sprachliche (eher verbal kodierte) Handlungen ausgeführt werden können (Wickens, 1980, S. 243; Wickens, 2002, S.

166–167; Wickens, 2008, S. 450). Die Dimension der Modalitäten (in Abb. 3: *modalities*) existiert nur in der wahrnehmenden Verarbeitungsphase und unterscheidet sich in visuell (visual) und auditiv (auditory). Demnach beanspruchen die visuelle und die auditive Wahrnehmung von Informationen unterschiedliche Ressourcenpools. Dies wird durch Untersuchungen belegt, die bei der Wahrnehmung cross-modaler Reize eine höhere Effektivität als bei der perzeptiven Verarbeitung intra-modaler Informationen nachweisen konnten (Wickens, 1980, S. 243–244; Wickens, 2002, S. 164–165; Wickens, 2008, S. 450). Die letzte Dimension, die visuelle Verarbeitung (in Abb. 3: *visual processing*), liegt nur im Falle einer visuellen Modalität in der wahrnehmenden Verarbeitungsphase vor. Sie umfasst die Ausdifferenzierung in fokale (focal) und periphere (ambient) Wahrnehmung und wurde erst nach 1984 ergänzt. Die fokale Wahrnehmung bezieht sich dabei nahezu immer auf das foveale und somit scharfe Sehen, welches beim Lesen von Texten und der Wiedererkennung von Symbolen zum Einsatz kommt. Das periphere Sehen hingegen betrifft das gesamte Sichtfeld und ist für die visuelle Wahrnehmung von Bewegung und Orientierung zuständig. Diese beiden Ausprägungsformen der visuellen Wahrnehmung scheinen ebenfalls auf unterschiedliche Ressourcen zurückzugreifen (Wickens, 2002, S. 165–166; Wickens, 2008, S. 450).

Dem Modell entsprechend kommt es zu Interferenzen, wenn gleichzeitig auszuführende Aufgaben auf die gleichen Ressourcen, also die gleichen Zellen des in Abb. 3 dargestellten Modells zurückgreifen. Dementsprechend müssten Aufgaben, die unterschiedlichen Zellen zugeordnet werden und somit voneinander unabhängige Ressourcen beanspruchen, interferenzfrei ausgeführt werden können (Abernethy, 2001, S. 53; Magill, 2014, S. 208; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138).

Dies lässt sich gut am Beispiel des Autofahrens veranschaulichen: Grundsätzlich werden beim Autofahren alle Verarbeitungsphasen durchlaufen. Die Reize sind jedoch vornehmlich räumlich kodiert und der visuellen Modalität zugeordnet, wobei sowohl die fokale, als auch die periphere Wahrnehmung bedeutend ist. Bei geringem Verkehrsaufkommen werden die jeweiligen Ressourcen nur in geringem Maße beansprucht, so dass es möglich ist, gleichzeitig ein Gespräch

mit dem Beifahrer zu führen. Bei der Aufrechterhaltung der Unterhaltung werden wiederum alle Verarbeitungsphasen durchlaufen. Diese Reize gehören aber eher der auditiven Modalität an und sind vorrangig verbal kodiert. Je nach Inhalt des Gesprächs, ist jedoch auch eine räumliche Kodierung denkbar, bspw. wenn die Unterhaltung eine Wegbeschreibung thematisiert. In diesem Fall würden die beiden auszuführenden Aufgaben, das Autofahren und die Unterhaltung über die geplante Route, gleichermaßen die Ressourcen beanspruchen, die der räumlichen Kodierung zugeordnet sind. Dies ist nur interferenzfrei möglich, bis die aufsummierten Aufgabenanforderungen das Kapazitätslimit der entsprechenden Ressource erreicht haben. In diesem Beispiel wäre das der Fall, wenn das Verkehrsaufkommen sehr hoch werden würde und/oder die Fülle und Komplexität für die Informationsverarbeitung der räumlich kodierten Gesprächsanteile zunehmen würde (Magill, 2014, S. 208).

Der große Vorteil modularer Theorien liegt in der Ausdifferenzierung multipler spezifischer Verarbeitungssubsysteme, die mit eigenen Kapazitäten ausgestattet sind und somit in der Lage sind aufgabenspezifische Interferenzen zu erklären (Magill, 2014, S. 208).

Kritik erhielten die modularen Theorien auf drei Ebenen: Zum einen besteht ein Zirkularitätsproblem, da es „keine unabhängige Weise gibt zu bestimmen, ob die beanspruchten Subsysteme gleich oder unterschiedlich sind“ (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138). Zum anderen wird das Problem der Falsifizierbarkeit genannt: Da die Subsysteme nicht unabhängig voneinander ermittelt werden können, ist es kaum möglich, modulare Theorien zu widerlegen, da ad hoc zu den Befunden passende Subsysteme postuliert werden können. An dritter Stelle wird das Koordinationsproblem angesprochen, da es bei einer großen Anzahl parallel arbeitender Subsysteme einer zentralen Koordinationsstelle bedarf, um ein zielgerichtetes Handeln zu ermöglichen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138). Darüber hinaus kam es zu Einwänden gegen die modularen Theorien, da in einigen Untersuchungen auch dann Interferenzen auftraten, wenn die verschiedenen Aufgaben eigentlich unterschiedliche Subsysteme beanspruchten (Abernethy, 2001, S. 63; Neumann, 1996, S. 407).

Infolgedessen entwickelten sich die Synthesetheorien als Erweiterung der modularen Theorien. Sie gehen von einer hierarchischen Struktur aus, an deren Spitze ein zentraler Verarbeitungsprozessor steht, der die Koordination und Kontrolle der unabhängig voneinander funktionierenden Subsysteme übernimmt (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138).

#### 2.2.1.4 Synthesetheorien

Die einflussreichste Synthesetheorie wurde 1974 von Baddeley und Hitch entwickelt. Das ursprünglich als Arbeitsgedächtnis (working memory) bezeichnete Modell wurde mehrfach überarbeitet und wird aktuell als Multikomponentenmodell des Arbeitsgedächtnisses (multi-component model of working memory) bezeichnet (Miyake & Shah, 1999, S. 21).

Der Begriff Arbeitsgedächtnis ist ein zentrales theoretisches Konstrukt der Kognitionspsychologie und Neurowissenschaft. Da der Begriff jedoch in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet wird, lässt sich eine übergreifende Definition nur sehr vage formulieren: „Working memory‘ is the theoretical construct that has come to be used in cognitive psychology to refer to the system or mechanism underlying the maintenance of task-relevant information during performance of a cognitive task“ (Miyake & Shah, 1999, S. 1). Bereits in dieser sehr allgemeinen Definition werden die Parallelen zum Konstrukt der Aufmerksamkeit deutlich: Die Aufrechterhaltung (maintenance) von Informationen zur Weiterverarbeitung stellt, laut Definition, eine zentrale Aufgabe des Arbeitsgedächtnisses dar. Diese Funktion wird, im Sinne von Posner und Boies, als Wachheit (*alertness*), ebenfalls der Aufmerksamkeit zugesprochen. Ebenso wird das Bereitstellen von aufgabenspezifischen Informationen zur weiteren Verarbeitung von Miyake und Shah als Hauptaufgabe des Arbeitsgedächtnisses bezeichnet. Eine ähnliche Auffassung vertreten die geläufigen Aufmerksamkeitstheorien, da sie es als zentrale Funktion der Aufmerksamkeit ansehen, eine zielgerichtete Informationsverarbeitung (bspw. durch die Selektion relevanter Reize) zu ermöglichen.

Wie genau die Begrifflichkeiten Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit zusammenhängen, ist jedoch vom jeweiligen Autor bzw. Arbeitsgedächtniskonzept

abhängig. Für das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch, welches im Folgenden genauer vorgestellt werden soll, kann man von einem sehr engen Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis ausgehen, da Baddeley 1993 sogar anmerkte, dass das Arbeitsgedächtnis möglicherweise vielmehr als „working attention“ bezeichnet werden sollte (Miyake & Shah, 1999, S. 16–21).

Die ursprüngliche Version ihres Arbeitsgedächtnismodells entwickelten Baddeley und Hitch (1974) in einer Zeit, in der die Informationsverarbeitungstheorien von einem einfachen, einheitlichen Kurzzeitgedächtnis (short-term store = STS) mit begrenzter Kapazität ausgingen, wie bspw. von Atkinson und Shiffrin postuliert. Die in experimentellen Befunden aufgezeigten Beziehungen zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis widersprachen diesen Modellen jedoch. Infolgedessen führten Baddeley und Hitch eine Reihe von Experimenten durch, auf deren Ergebnissen ihr in Abb. 4 dargestelltes Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses beruht (Atkinson & Shiffrin, 1968, S. 92–93; Baddeley, 2000, S. 418; Baddeley, 2004, S. 1–3; Baddeley & Hitch, 1974, S. 47–50).

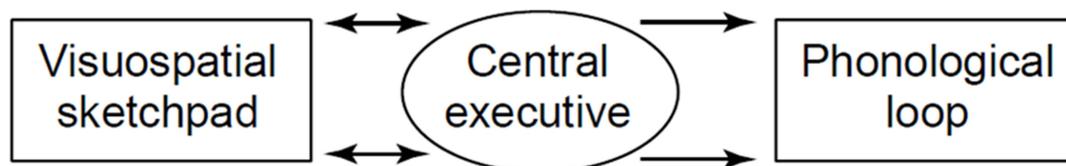


Abb. 4. Das Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses, entwickelt von Baddeley und Hitch 1974 (modifiziert nach Baddeley, 2000, S. 418).

Das Modell ist hierarchisch aufgebaut und besteht aus drei Komponenten. Die *central executive* steht dabei an der Spitze und übernimmt die Funktion eines zentralen Aufmerksamkeitsprozessors, der die beiden untergeordneten, spezifischen Subsysteme koordiniert und kontrolliert. Die zwei spezifischen Verarbeitungssysteme, der *phonological loop* und das *visuospatial sketchpad*, funktionieren dabei unabhängig voneinander (Baddeley, 2000, S. 418; Baddeley, 2004, S. 3; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138).

Der *phonological loop* ist für die Verarbeitung verbaler und akustischer Informationen innerhalb des Arbeitsgedächtnisses verantwortlich (Baddeley, 2000, S. 418). Er wird wiederum in eine passive und eine aktive Komponente unterteilt.

Der *phonological store* ist der passive Anteil, der als temporärer Zwischenspeicher fungiert, indem er phonologisch kodierte Informationen für ein paar Sekunden vorhalten kann. Das *articulatory rehearsal system* stellt den aktiven Bestandteil des *phonological loop* dar. Dieses nutzt subvokale Wiederholungen („subvocal speech“ oder „inner speech“), um den *phonological store* zu aktualisieren und Informationen somit länger im Gedächtnis zu behalten. Des Weiteren werden diese subvokalen Wiederholungsprozesse genutzt, um visuell präsentierte Stimuli, wie bspw. Buchstaben oder Zahlen, phonologisch umzukodieren (Baddeley, 1992, S. 558; Baddeley & Logie, 1999, S. 32; Baddeley, 2002, S. 86; Baddeley, 2004, S. 3). Diese Unterteilung in einen passiven und aktiven Anteil des *phonological loop* wird sowohl durch experimentelle neuropsychologische, als auch durch bildgebende neurologische Befunde unterstützt (Baddeley & Logie, 1999, S. 32).

Das *visuospatial sketchpad* ist für die kurzzeitige Speicherung und Verarbeitung visueller und räumlicher Informationen zuständig. Auch für dieses Subsystem des Arbeitsgedächtnisses kann von einer Zergliederung in mehrere Teilkomponenten ausgegangen werden. Baddeley nimmt an, dass sich das *visuospatial sketchpad* in zwei bis drei Anteile gliedert, die auf die Verarbeitung von visuellen, räumlichen, kinästhetischen und ggf. auch taktilen Informationen spezialisiert sind (Baddeley, 2000, S. 418; Baddeley, 2002, S. 88; Baddeley, 2004, S. 4; Baddeley, 2012, S. 13). Der visuelle Anteil ist dabei für das Aussehen von Objekten und die räumliche Komponente für Ort und Richtung verantwortlich (Baddeley & Hitch, 1994, S. 490). Eine weitere Ausdifferenzierung bezüglich der Subkomponenten des *visuospatial sketchpads* vertreten Baddeley und Logie (1999, S. 32), aufbauend auf Logie (1995), die, wie beim *phonological loop*, eine passive und eine aktive Struktur vermuten. Der *visual cache* fungiert dabei ebenfalls als Zwischenspeicher für visuelle Informationen wie bspw. Farben, Formen und Helligkeit. Der aktive Anteil, der *inner scribe*, umfasst die Verarbeitung räumlicher Informationen, die im Sinne von Logie immer etwas mit Bewegung zu tun haben müssen (Baddeley & Logie, 1999, S. 49–51; Logie, 1995, S. 77–79; Zimmer, 2008, S. 1375): „My own inclination when using the term spatial is to refer to a representation that involves movement in its broad sense, to in-

corporate imagined movement as well as physical movement" (Logie, 1995, S. 78). In diesem Sinne würde das mentale Scannen eines Bildes als „imagined movement“ und das sich Zubewegen auf ein Ziel als „physical movement“ verstanden werden (Zimmer, 2008, S. 1375).

Die *central executive* ist die komplexeste und bisher am schlechtesten erforschte Komponente des Arbeitsgedächtnismodells. Sie wird als unspezifischer, zentraler Aufmerksamkeitsprozessor verstanden und fungierte besonders in dem in Abb. 4 dargestellten, ursprünglichen Modell zunächst als „Resterampe“ für all die komplexen Strategien, die bei der Planung und Durchführung verschiedenster Aufgaben vorkommen und nicht in den beiden bereits vorgestellten Subsystemen untergebracht werden konnten (Baddeley & Hitch, 1994, S. 490; Baddeley, 1996, S. 5–6; Baddeley, 2002, S. 89): „Our initial specification of the *central executive* was so vague as to serve as little more than a ragbag into which could be stuffed all the complex strategy“ (Baddeley, 1996, S. 6). Diese Vereinfachung sah Baddeley zu Beginn der Entwicklung des Arbeitsgedächtnismodells jedoch als notwendig an, um sich dem Konzept über die einfacher zu untersuchenden Subsysteme anzunähern und gleichzeitig die Komplexität des Gesamtsystems zu berücksichtigen. Eine Ausgestaltung der *central executive* geschieht in Anlehnung an das von Norman and Shallice (1980) vorgestellte „supervisory attentional system“ (SAS). Im Sinne dieser Theorie wird angenommen, dass menschliches Handeln durch eine Serie von Schemata und Gewohnheiten (habits), die durch Umgebungsreize ausgelöst werden, kontrolliert wird. Um eine Handlung zu planen und die Durchführung zu kontrollieren, werden Umgebungsreize mit Informationen aus dem Langzeitgedächtnis kombiniert. Zu Ausführungsfehlern kommt es demnach, wenn es dem SAS nicht gelingt, Gewohnheiten zu unterdrücken und man an einem Samstagmorgen ins Büro fährt, statt zum Supermarkt. Wie auch bei den anderen bisher vorgestellten Aufmerksamkeitskonzepten, ist die Kapazität des SAS ebenfalls limitiert. Darüber hinaus ordnet Baddeley der *central executive* die Funktionen der Aufmerksamkeitslenkung/-selektion, sowie der Aufmerksamkeitsteilung zu (Baddeley, 2002, S. 90; Baddeley, 2004, S. 4).

Diese ursprüngliche Version des Arbeitsgedächtnismodells überarbeitete und erweiterte Baddeley mehrfach. In Abb. 5 ist die aktuellste Version des Modells zu sehen.

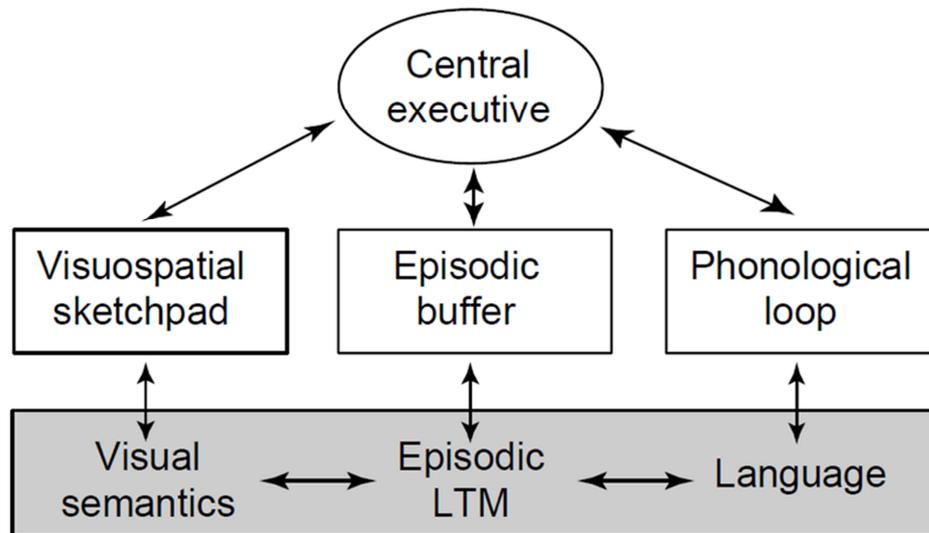


Abb. 5. Die aktuellste Version des Multikomponentenmodells des Arbeitsgedächtnisses von Baddeley und Hitch (modifiziert nach Baddeley, 2000, S. 421).

Wie zuvor steht die *central executive* an der Spitze des Modells. Die bereits bekannten Subsysteme *visuospatial sketchpad* und *phonological loop* bleiben erhalten und wurden um den *episodic buffer* ergänzt. Des Weiteren wurden Aspekte des Langzeitgedächtnisses (long-term memory = LTM), die in den vorangegangenen Versionen immer vom Arbeitsgedächtnis separiert wurden, in das Modell eingegliedert. In diesem Zusammenhang wird auch zwischen *crystallized systems*, die in der Abbildung grau hinterlegt sind, und *fluid systems*, in der Abbildung weiß dargestellt, unterschieden. *Crystallized systems* verändern sich durch Lernen und sind an der Entstehung von Wissen im Langzeitgedächtnis beteiligt. *Fluid systems* werden durch Lernen nicht beeinflusst, sondern stellen Aufmerksamkeit und Kapazitäten für temporäre Informationsspeicherung und -verarbeitung zur Verfügung (Baddeley, 2000, S. 418–421).

Da vielzählige Untersuchungen belegen, dass der *phonological loop* eine zentrale Rolle beim Erlernen von Sprache(n) hat, wurde diese enge Verbindung des *phonological loops* zum verbalen bzw. sprachlichen Langzeitgedächtnis im Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley ergänzt (Baddeley, 2000, S. 418; Baddeley, 2002, S. 87–93). Ähnliche Zusammenhänge werden für das *visuospatial*

*sketchpad* und das semantische, visuelle Langzeitgedächtnis angenommen (Baddeley, 2002, S. 93).

Der *episodic buffer* fungiert als kapazitär begrenzter und modalitäts-unabhängiger Zwischenspeicher. Er dient als Bindeglied zwischen der *central executive*, den beiden spezifischen Subsystemen (*phonological loop* und *visuospatial sketchpad*) und dem Langzeitgedächtnis (Episodic Long-Term memory). Eine direkte Kommunikation zwischen dem *phonological loop* und *visuospatial sketchpad* mit dem *episodic buffer* ist jedoch nicht möglich, sondern wird unter Verwendung bewusster Aufmerksamkeit über die *central executive* (Baddeley, 2000, S. 421; Baddeley, 2004, S. 4): „The episodic buffer can be accessed by the central executive through the medium of conscious awareness“ (Baddeley, 2000, S. 421). Der *episodic buffer* übernimmt somit die Speicherfunktion der *central executive*, welcher ab dieser Version des Arbeitsgedächtnismodells nur noch aufmerksamkeitslenkende Aufgaben und keine eigene Speicherkapazität mehr zugeschrieben werden. Um dem Kapazitätsproblem zu begegnen, nimmt Baddeley an, dass Informationen im *episodic buffer* in sogenannten Episoden zusammengefasst werden (Baddeley, 2002, S. 92). Dies entspricht dem Mechanismus des „Chunkings“, dem Gruppieren von Informationen zu größeren Einheiten, wie bspw. beim Zusammenfassen von Buchstaben zu Worten (Baddeley, 2004, S. 4).

#### 2.2.1.5 Zusammenfassung und kritische Betrachtung

In der Literatur werden drei Hauptthemenfelder identifiziert, in deren Kontext Aufmerksamkeit untersucht wird. Die Aufmerksamkeit wird einerseits als Wachheit bzw. Wachsamkeit (*alertness*) verstanden. In anderen Forschungszusammenhängen werden andererseits die Selektions-Funktion (*selectivity*) oder auch die limitierte Kapazität der Aufmerksamkeit (*limited processing capacity*) in den Fokus gerückt (Posner & Boies, 1971, S. 391–392). Für diese Arbeit ist vor allem der dritte Aspekt, der den Fokus auf die Limitierung der Aufmerksamkeit richtet, von großer Bedeutung, da im Kontext des motorischen Lernens das Erreichen später Lernphasen und eine Automatisierung als Reduktion der Anforderungen an die Aufmerksamkeitsressourcen definiert ist (siehe Kapitel 2.1,

2.1.1 und 2.2). Aus diesem Grund wurden in den vorangegangenen Kapiteln die geläufigsten Aufmerksamkeitstheorien, die auf der Grundannahme der Ressourcenbegrenzung basieren, entsprechend ihrer historischen Entwicklung vorgestellt. Die ersten Aufmerksamkeitstheorien waren die sogenannten Ein-Kanal- bzw. Filtertheorien, die von einer seriellen Informationsverarbeitung und einem Engpass im Verarbeitungsprozess ausgehen (siehe Kapitel 2.2.1.1). Abgelöst wurden diese durch die Theorien zentraler Kapazität, die auf der grundsätzlichen Annahme paralleler Verarbeitungsprozesse basieren. Diesen Theorien entsprechend entstehen Interferenzen dann, wenn die addierten Anforderungen mehrerer Aufgaben die zentral limitierte Kapazität überschreiten (siehe Kapitel 2.2.1.2). Da diese Konzepte aber nicht in der Lage sind, strukturelle Interferenzen zu erklären, wurden die modularen Theorien entwickelt. Diese nehmen mehrere spezifische Subsysteme an, welche einen eigenen Ressourcenpool besitzen und für spezifische Informationsverarbeitungsprozesse eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.2.1.3). Die letzte Weiterentwicklung der Aufmerksamkeitstheorien stellen die Synthesetheorien dar (siehe Kapitel 2.2.1.4), welche eine zentrale Kontrollinstanz ergänzen und somit eine Koordination der Subsysteme integrieren. Das bedeutendste dieser Konzepte ist das Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch, welches mittlerweile mehrfach überarbeitet wurde. Trotz einiger Einschränkungen, da vor allem die beiden Komponenten *central executive* und *episodic buffer* noch unzureichend erforscht sind, hat das Modell bis heute Bestand (Baddeley, 2002, S. 94).

Alle diese sogenannten Ressourcenmodelle basieren auf der grundsätzlichen Annahme, dass Interferenzen auftreten, wenn verschiedene Aktivitäten die gleichen Ressourcen beanspruchen und ihre kombinierten Anforderungen diese Kapazität übersteigen. Diese grundlegende Auffassung wird von einigen Autoren, wie bspw. Neumann, angezweifelt, da er nicht die Kapazitätsbegrenzung, sondern die Selektionsfunktion und Verhaltenshemmung als zentrale Eigenschaft der Aufmerksamkeit und somit als Ursache für mögliche Interferenzen ansieht (Neumann, 1992; Neumann, 1996). Neumanns Auffassung zu Folge werden zunächst mehrere Reize gleichzeitig verarbeitet, bis die Selektion einer bestimmten Aktion dazu führt, dass andere Prozesse unterdrückt werden. Die

Verhaltenshemmung ist somit als Lösung für Selektionsprobleme und zugleich als Ursache für die Limitierung der Aufmerksamkeit anzusehen (Neumann, 1992, S. 92–96; Neumann, 1996, S. 412–414; Schmidt & Lee, 2011, S. 102). Interferenzen treten bei Theorie entsprechend auf, wenn zeitgleich ablaufende Prozesse nicht mehr hinreichend gegeneinander isoliert werden können (Neumann, 1992, S. 91; Neumann, 1996, S. 410). Mit Bezug zu dem dieser Arbeit zu Grunde liegenden Verständnis von Automtizität, zeigen sich jedoch kaum Widersprüche zwischen diesem Ansatz von Neumann und den zuvor thematisierten Ressourcenmodellen. Automatische Prozesse werden, im Sinne der Ressourcenmodelle, als Prozesse verstanden, die keine bzw. kaum Aufmerksamkeitskapazitäten beanspruchen. Nach dem Ansatz von Neumann werden automatische Prozesse als nicht top-down kontrolliert verstanden (Neumann, 1996, S. 433). Da er die top-down Kontrolle jedoch als zentrale Funktion der Aufmerksamkeit ansieht (Neumann, 1996, S. 434), können automatische Prozesse demnach ebenfalls als aufmerksamkeitsunabhängig betrachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Aufmerksamkeitstheorien im Laufe der Jahre stark weiterentwickelt wurden, aber keines der vorgestellten Konzepte so weit ausgereift ist, dass es alle Fragestellungen im Kontext dieses vielfältigen Themenfeldes hinlänglich beantworten kann. Da die modularen Konzepte und Synthesetheorien jedoch die meisten Antworten bieten können (Repovš & Baddeley, 2006, S. 18) und sich auf neurobiologische Korrelate zurückführen lassen (Baddeley & Logie, 1999, S. 55), wird der Begriff Aufmerksamkeit im weiteren Verlauf dieser Arbeit modular verstanden. Darüber hinaus wird die Aufmerksamkeit im Folgenden als in irgendeiner Weise limitiert aufgefasst. Die Verortung dieser Kapazitätsbegrenzung liegt möglicherweise in den Strukturen des Arbeitsgedächtnisses. Aus diesem Grund sind die Lenkung der Aufmerksamkeit und infolgedessen die Selektion relevanter Informationen notwendig, um Interferenzen aufgrund der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zu verhindern. Darüber hinaus ist eine interferenzfreie Durchführung mehrerer Aufgaben möglich, wenn eine oder mehrere der auszuführenden Fertigkeiten automatisiert sind, da sich Automtizität, wie bereits dargestellt,

dadurch charakterisiert, dass die entsprechenden Prozesse nahezu ohne Beanspruchung von Aufmerksamkeitsressourcen und somit unabhängig vom Arbeitsgedächtnis kontrolliert werden können. Näheren Aufschluss über die motorische Kontrolle automatisierter und nicht automatisierter Prozesse, sowie die Veränderung im Lernverlauf bieten die Theorien, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

### 2.2.2 *Automatizitätstheorien*

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert, werden Bewegungen zu Beginn des motorischen Lernens vorrangig auf Basis bewusster, kognitiver Verarbeitungsprozesse kontrolliert. Erst in späten Lernphasen ist eine nahezu aufmerksamsfreie Kontrolle der Bewegung möglich. Die sogenannten Zwei-Prozess-Theorien widmen sich diesem Phänomen, indem sie zwei Arten von Kontrollprozessen annehmen und somit Erklärungsansätze für das Konzept der Automatisierung bieten können (Müller & Blischke, 2009, S. 203; Müller & Krummenacher, 2003, S. 138; Neumann, 1984, S. 255; Styles, 2008, S. 183). Atkinson und Shiffrin (1968) gehören zu den ersten Autoren, die Kontrollprozesse explizit in ihre Theorie integrieren. Ihr Modell des menschlichen Gedächtnisses ist Broadbents Filter-Theorie sehr ähnlich, wird jedoch durch ein kapazitär begrenztes Kurzzeitgedächtnis (short-term store = STS) ergänzt. Dieses wird im Sinne eines Arbeitsgedächtnisses verstanden, in dem Informationen unabhängig von der Modalität und mittels bewusster Kontrolle gespeichert und verarbeitet werden. Atkinson und Shiffrin verstehen „bewusste Kontrollprozesse“ als durch den Willen des Subjektes gesteuert, bieten darüber hinaus aber keine tiefere Erläuterung oder Abgrenzung zu unbewussten Kontrollprozessen an (Atkinson & Shiffrin, 1968; Styles, 2008, S. 185–186). Eine ausführlichere Differenzierung und Gegenüberstellung der zwei Arten von Kontrollprozessen bieten die im Folgenden dargestellten Theorien. Die Konzepte von Posner und Snyder (1975), Schneider und Shiffrin bzw. Shiffrin und Schneider (1977), sowie Logan (1985; 1988) nähern sich dem Thema auf einer rein psychologischen Ebene. Die anschließend dargelegten Modelle von Hikosaka und Kollegen (1999; 2002) sowie von Keele et al. (2003) integrieren die neurophysiologische Sichtweise und

widmen sich außerdem der Frage, wie sich der Übergang zwischen den zwei Arten von Kontrollprozessen im Lernverlauf vollzieht. Anschließend wird ein Überblick über die neuronalen Korrelate motorischen Lernens und der Automatisierung gegeben, bevor die vorgestellten Automtizitätstheorien zusammengefasst und kritisch reflektiert werden. Abschließend wird die gängige Untersuchungsmethodik vorgestellt, die in der experimentellen Praxis verwendet wird, um Automtizität bzw. Automatisierung zu messen.

#### 2.2.2.1 Automatische Bahnung und kontrollierte Hemmung (Posner & Snyder, 1975)

Mit ihrem Text von 1975 liefern Posner und Snyder die ersten Anhaltspunkte für die Existenz zweier gegensätzlicher Kontrollprozesse. Sie schlagen vor, automatische Aktivierungsprozesse, die einzig das Ergebnis vergangenen Lernens sind, von Prozessen, die unter gegenwärtiger bewusster Kontrolle stehen, zu unterscheiden. Demnach geschehen automatische Kontrollprozesse unabsichtlich, ohne bewusste Erkenntnis und rufen keine Interferenzen mit anderen gleichzeitig auszuführenden mentalen Aktivitäten hervor (Posner & Snyder, 1975, S. 81): „They are distinguished from operations performed by the conscious processing system since the latter system is of limited capacity and thus its commitment to any operation reduces its availability to perform any other operation” (Posner & Snyder, 1975, S. 81–82).

Diese Annahme untersuchten sie mit Hilfe einer sogenannten Priming-Aufgabe, bei der ein Paar von gleichzeitig eingeblendeten Buchstaben, wie bspw. „AA“ oder „AB“, möglichst schnell miteinander verglichen werden musste. Zusätzlich wurde den Versuchsteilnehmern vor der Einblendung jedes Stimulus ein Prime präsentiert, der entweder neutral, ein Plus-Zeichen „+“, oder ein Buchstabe, bspw. „A“ oder „B“, sein konnte. Posner und Snyder stellten zwei Annahmen auf. Erstens gehen sie davon aus, dass die Präsentation eines Primes dessen Repräsentation im Gedächtnis automatisch aktiviert. Demnach würde die Einblendung eines kongruenten Primes (bspw. Prime „A“ für den Stimulus „AA“) die Dauer bis zur Stimulus-Reaktion verringern. Ein inkongruenter Prime (bspw. Prime „B“ für den Stimulus „AA“) würde sich bezüglich der Reaktionszeiten nicht

von denen nach einem neutralen Prime unterscheiden (bspw. Prime „+“ für den Stimulus „AA“) (Müller & Krummenacher, 2003, S. 138–139; Posner & Snyder, 1975, S. 66–67; Styles, 2008, S. 188–189). Zweitens vermuteten Posner und Snyder: „[When the subject] actively attends to the prime, he should show benefits from both automatic activation and conscious attention, and these should be accompanied by costs on those trials when the prime is not a valid cue to the target“ (Posner & Snyder, 1975, S. 67). Demnach müsste ein kongruenter Prime (bspw. Prime „A“ für den Stimulus „AA“), im Vergleich zu einem neutralen Prime zu einer beschleunigten Reaktionszeit führen – unabhängig davon, ob die Verarbeitung automatisch oder bewusst ablaufen würde. Ein inkongruenter Prime (bspw. Prime „B“ für den Stimulus „AA“) müsste jedoch, anders als in der ersten Annahme, bei bewusster Verarbeitung eine Verlangsamung der Reaktionszeit bewirken (Müller & Krummenacher, 2003, S. 139; Posner & Snyder, 1975, S. 67; Styles, 2008, S. 188–189). Eine eher automatische oder vorwiegend bewusste Verarbeitung versuchten Posner und Snyder zu provozieren, indem sie die Häufigkeit der Kongruenz so manipulierten, dass der Prime entweder ein valider (80% Kongruenz) oder invalider Prädiktor (20% Kongruenz) des Stimulus war. Die Autoren vermuteten, dass die Versuchspersonen in Folge von vorrangig validen Primes spezifische Strategien entwickeln und somit auf eher bewusste Aufmerksamkeitsprozesse zurückgreifen würden, um über den Prime auf den Stimulus schließen zu können. Demzufolge müssten die eher invaliden Primes zu automatischen Verarbeitungsprozessen und der ersten von Posner und Snyder formulierten Annahme führen. Die zweite Annahme würde folglich eintreten, wenn durch die validen Primes eher bewusste Verarbeitungsprozesse angestoßen würden (Müller & Krummenacher, 2003, S. 139; Posner & Snyder, 1975, S. 67; Styles, 2008, S. 188–189).

Die Ergebnisse, die in Abb. 6 zusammenfassend dargestellt sind, bestätigten diese Hypothesen. Wie angenommen zeigen sich verringerte Reaktionszeiten bei Übereinstimmungen von Prime und Stimulus (die jeweils durchgezogenen Linien). Diese Beobachtung konnte sowohl bei geringer Validität (obere Grafik), als auch bei hoher Validität des Primes (untere Grafik) gemacht werden. Wie in der ersten Annahme postuliert, konnten keine hemmenden Effekte eines inkon-

gruerten Primes gefunden werden, wenn die Primes als unzuverlässige Prädiktoren der Stimuli fungierten (gestrichelte Linie in der oberen Grafik). War die Validität der Primes jedoch hoch, so zeigte sich, wie Posner und Snyder in ihrer zweiten Hypothese vermutet hatten, eine Zunahme der Reaktionszeiten bei inkongruenten Primes (gestrichelte Linie in der unteren Grafik). Dieser hemmende Effekt des inkongruenten Primes konnte aber erst dann beobachtet werden, wenn das zeitliche Intervall zwischen der Präsentation von Prime und Stimulus länger wurde (in Abb. 6 ab ca. 300ms).

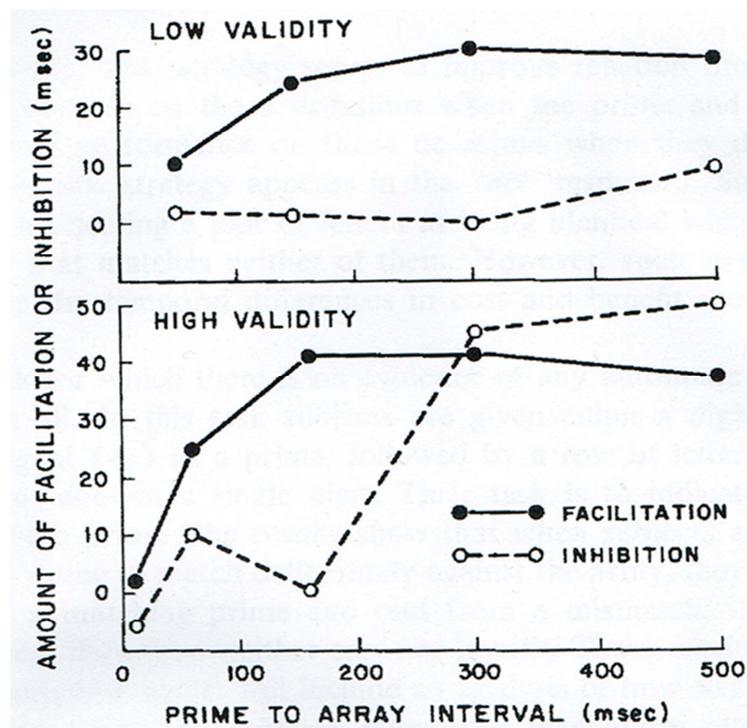


Abb. 6. Höhe der Bahnung (facilitation) oder Hemmung (inhibition) in Folge einer kongruenten Prime-Stimulus-Reaktion im Vergleich zu einer neutralen Bedingung. Die obere Grafik zeigt die Situation mit geringer Validität in der die Versuchsteilnehmer keine spezifische Aufmerksamkeit auf den prime richten sollten. In der unteren Grafik ist die Bedingung mit hoher Validität und aktiver Involvierung der Aufmerksamkeit dargestellt (modifiziert nach Posner & Snyder, 1975, S. 68).

Die Autoren erklären diesen asymmetrischen Effekt damit, dass bewusste Verarbeitungsprozesse mehr Zeit beanspruchen als automatische Aktivierungsvorgänge (Müller & Krummenacher, 2003, S. 139; Posner & Snyder, 1975, S. 67–68; Styles, 2008, S. 189). Diese Asymmetrie konnten Posner und Styles in weiteren Experimenten belegen (Posner & Snyder, 1975, S. 67–68). Infolge ihrer Ergebnisse schlugen sie eine Unterscheidung in automatische Aktivierungs-

und bewusste Kontrollprozesse vor: Automatische Prozesse lassen sich nicht unterdrücken und laufen schnell ab. Bewusst gesteuerte Kontrollprozesse hingegen können flexibel eingesetzt werden, scheinen aber langsamer abzulaufen (Posner & Snyder, 1975, S. 67–82; Styles, 2008, S. 188).

#### 2.2.2.2 Automatische und kontrollierte Verarbeitungsprozesse (Schneider & Shiffrin, 1977 und Shiffrin & Schneider, 1977)

Auf Basis des von Posner und Snyder entwickelten Konzeptes arbeiteten Schneider und Shiffrin (1977) die Unterscheidung in kontrollierte (*controlled processing*) und automatische Verarbeitungsprozesse (*automatic processing*) weiter aus und veröffentlichten ihre Theorie in zwei bedeutenden Publikationen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 139; Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977; Styles, 2008, S. 189–190). Die zentralen Eigenschaften der beiden konträren Kontrollprozesse sind in Tab. 2 aus verschiedenen Literaturstellen zusammengefasst dargestellt.

Tab. 2. Gegenüberstellung der Charakteristika des *controlled processing* und des *automatic processing* anhand der folgenden Literaturstellen: (Abernethy et al., 2007, S. 248; Müller & Krummenacher, 2003, S. 139–140; Neumann, 1984, S. 257–258; Schmidt & Lee, 2011, S. 105–106; Schneider & Shiffrin, 1977, S. 51–52; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 155–160; Styles, 2008, S. 187–188; Underwood & Everatt, 1996, S. 186)

	<i>controlled processing</i>	<i>automatic processing</i>
Aufmerksamkeit	Abhängig	Unabhängig
Verarbeitung mehrerer Reize	Seriell	Parallel
Verarbeitungs-Geschwindigkeit	Langsam	Schnell
Absicht	Intentional	Selten intentional
Flexibilität	Hoch	Gering
Lernphase	Früh	Spät
Bewusstsein	Größtenteils bewusstseinsfähig	Nicht bewusstseinsfähig

Kontrollierte Verarbeitungsprozesse beanspruchen Arbeitsgedächtnisressourcen und sind aufmerksamkeitsabhängig. Dementsprechend kann es zu Interferenzen mit anderen, parallel auszuführenden Aufgaben kommen, die auf die gleichen limitierten Ressourcen zurückgreifen. Sie laufen vergleichsweise langsam ab und die Verarbeitung mehrerer zeitgleich eintreffender Reize geschieht in der Regel seriell. Die kontrollierten Prozesse werden willentlich initiiert und können durch den Willen des Individuums abgebrochen oder unterdrückt werden. Sie werden vorrangig in frühen Lernphasen eingesetzt, können flexibel an veränderte Bedingungen angepasst werden und sind größtenteils bewusstseinsfähig (Abernethy et al., 2007, S. 248; Müller & Krummenacher, 2003, S. 139–140; Neumann, 1984, S. 257–258; Schmidt & Lee, 2011, S. 105–106; Schneider & Shiffrin, 1977, 1-3; 51-52; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 155–160).

Im Gegensatz dazu laufen automatische Prozesse aufmerksamkeitsunabhängig ab und sind somit nicht kapazitätslimitiert. Infolgedessen ergeben sich keine Interferenzen mit anderen, parallel auszuführenden Aufgaben. Sie werden nicht durch die Intention des Individuums, sondern durch entsprechende Stimuli initiiert und laufen dann selbstständig, ohne die Kontrolle des Subjektes, ab. In der Regel sind sie nicht bewusstseinsfähig und schwer modifizierbar, wenn sie einmal erworben sind. Mehrere gleichzeitig eintreffende Reize können parallel verarbeitet werden, sodass automatische Prozesse mit hoher Geschwindigkeit ablaufen können. Darüber hinaus entwickeln sich automatische Prozesse nur nach einem sehr hohen Übungsumfang in späten Lernphasen, wie bereits in Kapitel 2.1.1 angedeutet wurde (Abernethy et al., 2007, S. 248; Müller & Krummenacher, 2003, S. 140; Neumann, 1984, S. 257–258; Schmidt & Lee, 2011, S. 106; Schneider & Shiffrin, 1977, 1-3; 51-52; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 155–160; Underwood & Everatt, 1996, S. 186).

Automatische und kontrollierte Prozesse können dabei sowohl separat, als auch, vor allem in komplexen Verarbeitungssituationen wie bspw. dem Lesen, parallel ablaufen. In der Regel dominieren zu Beginn des Lernverlaufes kontrollierte Prozesse, die jedoch mit zunehmender Übung immer mehr automatische Prozesse initiieren (Shiffrin & Schneider, 1977, S. 161):

In novel situations or in situations requiring moment-to-moment decisions, controlled processing may be adopted and used to perform accurately, though slowly. Then as the situations become familiar, always requiring the same sequence of processing operations, automatic processing will develop, attention demands will be eased, other controlled operations can be carried out in parallel with the automatic processing, and performance will improve. (Schneider & Shiffrin, 1977, S. 161)

Dieses Konzept bietet, nach Shiffrin und Schneider, einige Vorteile: Durch die Entwicklung automatischer Prozesse können die limitierten Ressourcen der Aufmerksamkeit effizient genutzt werden. Gleichzeitig kann die Aufmerksamkeit auf bedeutende Stimuli gerichtet werden, egal welche Art von Prozess momentan aktiv ist. Überdies sind eine Anpassung an sich verändernde Umgebungsbedingungen, ein Neulernen in fremden Situationen und die Aneignung komplexer Verarbeitungsabläufe möglich (Shiffrin & Schneider, 1977, S. 161–162).

Zu diesen Erkenntnissen kamen Schneider und Shiffrin durch zahlreiche Untersuchungen, in denen sie Experimente mit verschiedenen Varianten einer visuellen Suchaufgabe durchführten, die in Abb. 7 schematisch dargestellt ist.

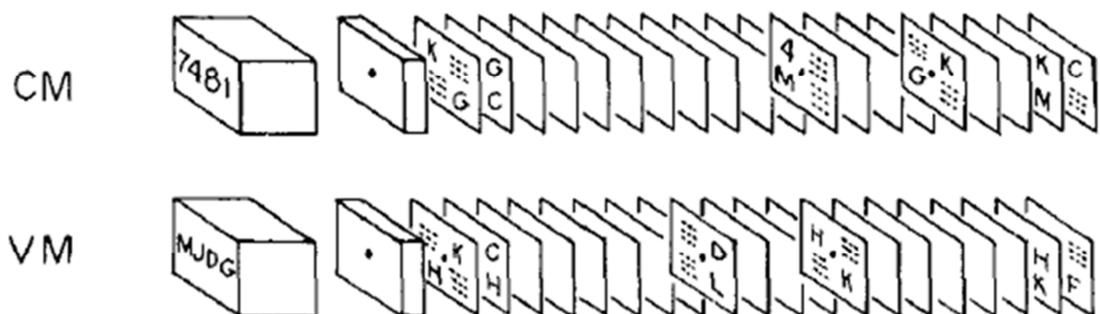


Abb. 7. Schematische Darstellung der bei Schneider und Shiffrin (1977) und Shiffrin und Schneider (1977) verwendeten visuellen Suchaufgabe (modifiziert nach Shiffrin & Schneider, 1977, S. 128).

Bei dem von Schneider und Shiffrin verwendeten Untersuchungsparadigma beginnt ein Durchgang damit, dass den Versuchspersonen ein sogenanntes *memory set* (in Abb. 7: großer Quader) mit einer bestimmten Anzahl an Gedächtnisreizen präsentiert wird. In der Abbildung enthält das *memory set* im oberen Beispiel vier Zahlen und im unteren Beispiel vier Buchstaben, die sich die Probanden merken sollen. Anschließend werden mehrere aufeinander folgende *display sets* (in Abb. 7: flache Einzelbilder) mit je ein bis vier Zielreizen präsentiert. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, zu entscheiden, ob einer

oder mehrere der memorierten Gedächtnisreize mit mindestens einem der im *display set* abgebildeten Zielreize übereinstimmt. Über die Anzahl der Gedächtnisreize und der im *display set* dargestellten Elemente lässt sich die Schwierigkeit variieren. Gedächtnisreize, die als Zielreiz im *display set* vorkommen, werden als *target* bezeichnet. Alle weiteren im *display set* abgebildeten Elemente, die nicht aus der Menge der Gedächtnisreize stammen, werden als *distractor* betitelt. Es werden die Bedingungen *consistent mapping* und *varied mapping* unterschieden, die in der Abb. 7 mit CM und VM abgekürzt sind. Bei konsistenter Zuordnung werden, wenn das *memory set* aus Buchstaben besteht, nur Zahlen als *distractor* verwendet und andersherum. Wie oben in der Abbildung zu sehen ist, sind somit alle Buchstaben *distractoren* und alle Zahlen *targets*. In der *varied mapping*-Bedingung werden für das *memory set* und das *display set* immer die gleiche Kategorie von Elementen verwendet. Dies ist im unteren Beispiel der Abbildung zu erkennen: Die Gedächtnisreize sind Buchstaben. In den *display sets* werden somit nur Buchstaben verwendet, die jedoch als *target* oder auch als *distractor* auftreten können (Müller & Krummenacher, 2003, S. 140; Schmidt & Lee, 2011, S. 106; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 128–129).

Schneider und Shiffrin fanden deutliche Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen: Bei der VM-Bedingung war die Leistung hochgradig abhängig vom Schwierigkeitsgrad, also der Anzahl der Elemente in den *memory* und *display sets*. Im Gegensatz dazu blieben die Reaktionszeiten bei der *consistent mapping*-Bedingung stabil, egal wie viele Elemente in den *memory* und *display sets* abgebildet wurden. Im direkten Vergleich konnten sogar beim höchsten Schwierigkeitsgrad unter CM-Bedingung geringere Reaktionszeiten gemessen werden als bei der einfachsten VM-Bedingung. Die Autoren schlussfolgerten daraus, dass zwei unterschiedliche Verarbeitungsprozesse vorliegen mussten: Die steigenden Reaktionszeiten erklärten Shiffrin und Schneider dadurch, dass jedes Element des *display sets* unter der *varied mapping*-Bedingung einzeln mit jedem Gedächtnisreiz verglichen wird. Sie scheinen somit einem kontrollierten, seriellen Verarbeitungsprozess zu unterliegen, der durch limitierte Kapazitäten begrenzt und verlangsamt wird. Das Gegenstück dazu bilden die automatisch ablaufenden Entdeckungsprozesse, die unter *consistent mapping*-Bedingungen

vermeintlich parallel für das gesamte *display set* ablaufen und frei von Kapazitätslimitierungen zu sein scheinen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 140; Schneider & Shiffrin, 1977, S. 52; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 129). Diese Erkenntnisse konnten durch weitere Experimente gestützt werden, in denen Schneider und Shiffrin verschiedene Varianten des beschriebenen Paradigmas einsetzten und sowohl Reaktionszeiten, als auch Präzisionsleistungen untersuchten (Schneider & Shiffrin, 1977, S. 52–53; Styles, 2008, S. 190–191). Durch weitere Experimente konnten Shiffrin und Schneider ergänzend aufzeigen, dass automatische Verarbeitungsprozesse nur durch umfangreiche Übung erlernt werden können. Sie sind sehr änderungsresistent und können nur durch ebenfalls ausgedehnte Übungsumfänge „verlernt“ werden. Darüber hinaus können automatische Verarbeitungsprozesse ohne die Aufmerksamkeit des Individuums initiiert werden, so dass sie ablaufen, ohne durch den Willen des Individuums unterdrückt werden zu können (Schmidt & Lee, 2011, S. 107; Shiffrin & Schneider, 1977, S. 185–186; Styles, 2008, S. 190–191).

Die Untersuchungen von Schneider und Shiffrin gehören zu den einflussreichsten Arbeiten im Kontext der Informationsverarbeitung, blieben jedoch nicht unangefochten. In den darauffolgenden Jahren wurden zahlreiche Kritikpunkte erarbeitet, die im folgenden Kapitel zusammenfassend dargestellt werden und somit zu einem aktuelleren Verständnis von Automatizität überleiten.

### 2.2.2.3 Kritik an den Zwei-Prozess-Theorien

Ein zentraler Kritikpunkt bezieht sich auf die im Rahmen der Zwei-Prozess-Theorien aufgestellte Dualitätsannahme: Schneider und Shiffrin grenzen automatische Prozesse im Sinne einer Dualitätsannahme von kontrollierten Prozessen ab. Dieser Annahme entsprechend stehen sich die beiden Arten von Verarbeitungsprozessen dichotom gegenüber, ohne dass Mischformen möglich wären. Ein Prozess, der eines der Kriterien erfüllt, welches in Tab. 2 einem automatischen Prozess zugeordnet ist, müsste demnach auch in allen anderen Charakteristika einem automatischen Prozess entsprechen (Neumann, 1992, S. 86–87; Underwood & Everatt, 1996, S. 186). Aufgrund zahlreicher empirischer Befunde lässt sich jedoch nachweisen, dass diese strikte Trennung in zwei Ar-

ten von Kontrollprozessen nicht möglich ist, sondern spezifischer differenziert werden muss, in Bezug auf welche Teilkomponente (der Aufmerksamkeit) eine automatische oder eher kontrollierte Verarbeitung vorliegt (Neumann, 1992, S. 86–88; Styles, 2008, S. 192–193): Eine „völlig automatische Verarbeitung wäre hiernach ein Grenzfall, nicht ein genereller Modus der Verarbeitung“ (Neumann, 1992, S. 88). Aktuelleren Auffassungen zufolge wird Automtizität daher als Kontinuum betrachtet, mit den zuvor dargestellten Charakteristika kontrollierter und automatischer Verarbeitungsprozesse als Gegenpole (Schmidt & Lee, 2011, S. 107; Underwood & Everatt, 1996, S. 186), wie Neumann in seinem Review von 1992 betont: „Die nach diesen Kriterien konstruierten reinen ‚Aufmerksamkeitsprozesse‘ und rein ‚automatischen‘ Prozesse sind wohl nicht zwei Klassen mentaler Prozesse, sondern eher zwei Pole eines (mehrdimensionalen) Kontinuums“ (Neumann, 1992, S. 88). An dieser Stelle bleiben die Zwei-Prozess-Theorien jedoch stehen, da sie lediglich die zwei Arten von Kontrollprozessen beschreiben und keinen Aufschluss darüber geben, was beim Prozess der Automatisierung passiert. Es bleibt offen, ob es nur zu einem übungsbedingt schnelleren und effektiveren Ablauf der Prozesse kommt, oder ob strukturelle Verlagerungen zu Grunde liegen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 140). Darüber hinaus bleibt unklar, ob der im Lernverlauf verringerte Aufmerksamkeitsbedarf mit der Leistungssteigerung einhergeht, oder ob sie diesen bedingt (Underwood & Everatt, 1996, S. 188). Im Sinne der Kontinuums-Annahme entspräche der Prozess der Automatisierung der Verlagerung der an einer Aufgabe beteiligten Verarbeitungsprozesse vom eher kontrollierten Pol des Kontinuums hin zum automatisch kontrollierten Ende. Es zeigte sich, dass sich die in Tab. 2 zusammengefassten Charakteristika automatischer Prozesse allmählich im Übungsverlauf entwickeln (Underwood & Everatt, 1996, S. 186–187). Diese Ansicht steht somit im Einklang mit den in Kapitel 2.1.1 vorgestellten klassischen Phasenmodellen des motorischen Lernens, die von einem fließenden Übergang der Lernphasen ausgehen. An dieser Stelle setzen ebenfalls die ab dem Kapitel 2.2.2.6 dargestellten, eher neurophysiologisch orientierten Theorien von Hikosaka et al. und Keele et al. an, die sich spezifisch der Frage widmen, wie sich die Informationsverarbeitung im Lernverlauf verändert.

Neben der Dualitätsannahme wird an den Zwei-Prozess-Theorien kritisiert, dass die Ausführung hochgeübter Fertigkeiten nicht immer interferenzfrei abläuft. Einerseits scheinen auch hochgradig automatisierte Fertigkeiten geringe Ansprüche an die Aufmerksamkeitsressourcen zu stellen (Müller & Krummenacher, 2003, S. 140; Neumann, 1984, S. 256; Schmidt & Lee, 2011, S. 107; Styles, 2008, S. 192). Andererseits treten Interferenzen anscheinend in Abhängigkeit von der ausgewählten Sekundäraufgabe auf und können diesbezüglich in ihrer Höhe variieren. Dabei hängen das Auftreten und die Höhe der Interferenzen offenbar damit zusammen, wie ähnlich sich die beiden Aufgaben sind (Neumann, 1984, S. 260–261; Schmidt & Lee, 2011, S. 107; Styles, 2008, S. 192–193). Diese sogenannten strukturellen Interferenzen wurden bereits in Kapitel 2.2.1.2 thematisiert, da sie ein bedeutender Grund dafür waren, dass die Theorien zentraler Kapazität zu Gunsten modularer Konzepte fallen gelassen wurden. Interferenzen können demnach nur auftreten, wenn zwei Aufgaben die gleichen Ressourcenpools der Aufmerksamkeit beanspruchen. Demnach könnten mehrere bewusste Prozesse gleichzeitig interferenzfrei ablaufen, wenn sie unterschiedliche Subsysteme beanspruchen. Aufgrund der Interferenzfreiheit mit einer Sekundäraufgabe kann also nicht pauschal von einer automatischen Verarbeitung ausgegangen werden (Neumann, 1984, S. 260–261; Underwood & Everatt, 1996, S. 190–191): „There has, however, been ample evidence during the last decade that this notion is insufficient and that at least part of the dual-task interference is specific in nature“ (Neumann, 1984, S. 260). Diese Besonderheit muss also bei der Messung von Automatisität (siehe Kapitel 2.2.3) berücksichtigt werden.

Schließlich wird auch kritisiert, dass die Begrifflichkeiten „automatisch“ und „kontrolliert“ als konträr gegenübergestellt werden, wie Logan hervorhebt: „It appears that the general belief that automaticity and control are opposites may be mistaken, or at least, overstated“ (Logan, 1985, S. 379). Beide Prozessarten sind schließlich nur Kategorien von Kontrollprozessen, wie aus dieser Auffassung Neumanns hervorgeht: „Neumann believes that automatic processing is not uncontrolled, but rather is controlled below the level of conscious awareness“ (Styles, 2008, S. 193). Die korrekte, aber irreführende Formulierung müss-

te demnach eigentlich „automatische Kontrollprozesse“ und „kontrollierte Kontrollprozesse“ lauten.

Darüber hinaus kann an dieser Stelle kritisch angemerkt werden, dass sowohl Aufmerksamkeits- und Automatizitätstheorien, als auch die Dual-Task-Methodik (siehe Kapitel 2.2.3) gewöhnlich Einzel- und Doppelaufgaben gegenüberstellen, ohne eine mögliche weitere Ausdifferenzierung in Teilaufgaben oder Teilprozesse zu betrachten. Die sich daraus ergebende Problematik lässt sich gut anhand eines Beispiels erläutern: Das Autofahren wird häufig als beispielhafte Aufgabe herangezogen, um die Bedeutung von Doppeltätigkeitssituationen im Alltag darzustellen. Bei genauerer Betrachtung lässt sich die Aufgabe des Autofahrens jedoch in viele weitere Teilaufgaben, wie bspw. das Lenken, Kuppeln, Schalten, aber auch das Verfolgen des richtigen Weges oder die Entscheidung über das Bremsverhalten an einer auf gelb springenden Ampel unterteilen. Und auch diese Teilaufgaben lassen sich weiter ausdifferenzieren. Für das Kuppeln ist es unter anderem notwendig den Krafteinsatz, den Zeitpunkt und die Geschwindigkeit bei der Betätigung des Pedals zu steuern und zu kontrollieren. Es ist also möglich, die vielfach benannte „Einzelaufgabe“ des Autofahrens als aus mehreren Teilprozessen bestehende Multi-Aufgabe zu betrachten. Diese Gliederung in mögliche Teilprozesse untermauert, nach Underwood und Everatt (1996, S. 187–194), die Kontinuumsannahme von Automatizität dahingehend, dass eine sukzessive Teilautomatisierung einzelner beteiligter Prozesse eine graduelle Reduktion von Aufmerksamkeitskapazitäten durch die Gesamtaufgabe erklären kann. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit soll eine mögliche Differenzierung von Aufgaben in Teilaufgaben mit beteiligten Teilprozessen, die auch unterschiedliche Anteile des Arbeitsgedächtnisses beanspruchen können, berücksichtigt werden. Dennoch ist eine sinnvolle Gruppierung von Teilprozessen zu Aufgaben für eine anwendungsbezogene Motorikforschung notwendig.

In Folge der genannten Kritikpunkte erarbeitete Logan einen alternativen Ansatz, der im folgenden Kapitel vorgestellt werden soll und sich an der bereits vorgestellten Kontinuums-Annahme anschließt: „Like skill, automaticity is a dimension, and it can be studied profitably without treating extreme points on the dimension as if they were opposites“ (Logan, 1985, S. 379).

#### 2.2.2.4 Automtizität als Kontinuum (Logan, 1985)

Zu den bedeutendsten Konzepten im Kontext der Automtizitätstheorien gehören die in Folge der Kritik an den Zwei-Prozess-Theorien von Logan (1985; 1988) entwickelten Arbeiten (Magill, 2014, S. 214).

In seinem ersten Artikel stellt Logan 1985 die Zusammenhänge und Unterschiede von Automtizität und Fertigkeiten (*skill*) dar. Unter dem Begriff *skill* versteht Logan die zielgerichtete Ausführung einer komplexen Aufgabe (Logan, 1985, S. 368). Im Gegensatz dazu beschreibt Logan Automtizität etwas genauer, indem er sich an den Zwei-Prozess-Theorien orientiert (siehe Tab. 2) und ähnliche Kriterien formuliert: Automatisch kontrollierte Aufgaben können demnach schnell (*quickly*), anstrengungslos (*effortless*) und relativ selbstständig (*autonomous*) ausgeführt werden (Logan, 1985, S. 368). Als zentralen Unterschied zwischen *skill* und *automaticity* führt Logan an, dass automatische Prozesse eher an kleineren Teilen einer größeren Aufgabenstellung beteiligt sind, wohingegen sich *skill* auf die gesamte komplexe Aufgabe bezieht. *Skills* sind demnach eine Kombination mehrerer spezialisierter automatischer Prozesse mit deklarativem und metakognitivem Wissen (Logan, 1985, S. 368–369): “Skills consist of automatic procedures as well as metacognitive knowledge about how and when to use the procedures and declarative knowledge about the trappings and demographics of the skill” (Logan, 1985, S. 369). Je besser der *skill* ausgebildet ist, desto größer ist der Anteil der automatisch kontrollierten Prozesse und die Menge des deklarativen und metakognitiven Wissens über die entsprechende Aufgabe (Logan, 1985, S. 368–369). Als Gemeinsamkeit haben Automtizität und *skill*, dass sie graduell durch extensive Übung erlernt werden können und, dass es keine Obergrenzen bezüglich des zu erlangenden Automtizitätsgrades bzw. *skills* gibt, auch wenn Grenzen hinsichtlich der Messbarkeit existieren (Logan, 1985, S. 369–370).

Eine bedeutende Erkenntnis aus Logans Arbeit ist die in Kapitel 2.2.2.3 bereits angesprochene Kontinuums-Annahme (Magill, 2014, S. 214): Statt von einer dichotomen Einteilung von Prozessen in automatisch oder nicht-automatisch, geht Logan von einem Kontinuum mit unterschiedlichen Automtizitätsgraden

aus. Die Charakteristika, welche Shiffrin und Schneider den als *controlled* und *automatic* betitelten Verarbeitungsprozessen zuordnen, stehen sich dabei an den Polen des Kontinuums gegenüber. Dennoch geht Logan davon aus, dass keine klaren Endpunkte existieren, da kein Prozess einer vollkommen automatischen Verarbeitung unterliegen kann und somit immer einer gewissen Restkapazität bedarf (Logan, 1985, S. 369–376; Magill, 2014, S. 214). Der Prozess der Automatisierung, also der zunehmenden Unabhängigkeit von Aufmerksamkeitskapazitäten, entspricht demnach einer Verlagerung auf dem Kontinuum, hin zum „automatisch kontrollierten“ Pol: „Automatization reflects a reduction in the amount of resources needed to perform a task“ (Logan, 1985, S. 376). Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die verschiedenen Charakteristika kontrollierter und automatischer Verarbeitungsprozesse nicht einheitlich verändern, sondern bisher unbekannt ist, welchem Zeitverlauf die Veränderungen der unterschiedlichen Kriterien unterliegen und in welchem Zusammenhang diese zueinander stehen (Logan, 1985, S. 373). Im Sinne der aktuelleren Aufmerksamkeitstheorien (Modulare und Synthese-Theorien, siehe Kapitel 2.2.1.3 und 2.2.1.4) kann es sich bei der Automatisierung allerdings nicht um eine rein globale Reduktion des Kapazitätsbedarfs handeln, sondern vielmehr um eine strukturelle Verlagerung, also eine qualitative Veränderung des Ressourceneinsatzes (Logan, 1985, S. 377–383). Genau dieser Frage nach strukturellen Verlagerungen im Verlauf des Lernprozesses gehen die beiden Konzepte nach, die in den zwei Kapiteln 2.2.2.6 und 2.2.2.7 vorgestellt werden.

#### 2.2.2.5 Automatizität als Gedächtnis-retrieval (Logan, 1988)

In seiner zweiten Arbeit, die 1988 veröffentlicht wurde, stellt Logan einen alternativen Erklärungsansatz vor (Instance theory of automatization), in dem er Automatizität eher als ein Abrufen von Gedächtnis-Spuren auffasst (*retrieval*) und somit Abstand von dem vorherrschenden Ansatzpunkt der limitierten Aufmerksamkeitskapazitäten nimmt (Logan, 1988, S. 492–493).

Dieser Theorie entsprechend wird eine noch unbekannte Aufgabe in der Regel mit Hilfe von Algorithmen und Regeln auf Basis bewusster Verarbeitungsprozesse gelöst. Der Algorithmus muss bei jeder neuen Durchführung der Aufgabe

erneut durchlaufen werden. Im Übungsverlauf werden für die erarbeiteten Lösungsmöglichkeiten, durch die wiederholte Ausführung, jedes Mal separate Gedächtnis-Spuren angelegt und im Langzeitgedächtnis abgespeichert. Mit zunehmender Übung werden somit immer mehr Informationen über die Lösung der Aufgabe angesammelt, so dass sich ein aufgabenspezifischer Wissensbestand (domain-specific knowledge base) entwickelt. Sobald dieser umfangreich genug ist, kann die Aufgabe nicht nur auf Basis des Algorithmus, sondern auch durch Abrufen (*retrieval*) der bereits abgespeicherten Gedächtnis-Spuren bewältigt werden. Automatizität liegt dieser Theorie entsprechend dann vor, wenn die Aufgabenlösung per *retrieval* immer, also bei jedem Lösungsversuch der gleichen Aufgabe, handlungsleitend wird (Logan, 1988, S. 492–519; Magill, 2014, S. 214; Müller & Krummenacher, 2003, S. 140–141; Underwood & Everatt, 1996, S. 188–194): „Automaticity is memory retrieval: Performance is automatic when it is based on single-step direct-access retrieval of past solutions from memory“ (Logan, 1988, S. 493). Der Prozess der Automatisierung entspricht demnach einer Verlagerung von algorithmen-basierter hin zu gedächtnis-basierter Aufgabenbewältigung durch Entwicklung eines aufgabenspezifischen Wissensbestandes (Logan, 1988, S. 493–501). Ein noch nicht automatisierter Prozess ist demzufolge also nicht durch einen Mangel an Ressourcen, sondern durch einen Mangel an Wissen limitiert (Logan, 1988, S. 501; Müller & Krummenacher, 2003, S. 141).

Trotz dieses alternativen Ansatzes gelingt es Logan mit seiner Theorie nicht, die geläufigen Probleme der Automatizitätsforschung zu lösen, sondern bietet vielmehr eine gut geeignete Nullhypothese zur weiteren Untersuchung automatischer und nicht-automatischer Kontrollprozesse. Dennoch erweitern die Arbeiten Logans das vorliegende Verständnis von Automatizität im Sinne eines Kontinuums, da er jeweils von einem übungsbedingten, graduellen Übergang ausgeht, der in seinem Modell jedoch von einem algorithmusbasierten zu einem *retrieval* basierten Pol verläuft (Underwood & Everatt, 1996, S. 190–193).

#### 2.2.2.6 Parallel neural network model (Hikosaka et al., 1999 & 2002)

Das 1999 von Hikosaka und Kollegen veröffentlichte *parallel neural network model* vereinigt in einem Modell serielle und parallele Verarbeitungsprozesse und versteht Lernen als Wechsel zwischen diesen zwei Kontrollmodi. Obwohl das Konzept auf Basis der Ergebnisse physiologischer und verhaltensgestützter Untersuchungen entwickelt wurde, ist es zunächst ein hypothetisches Konzept. Die Grundannahme, dass motorische Kontrolle in zwei voneinander unabhängigen, kortikalen Systemen abläuft, bildet dabei den Ausgangspunkt der Theorie. Die beiden Systeme unterscheiden sich bezüglich der Kodierung der Bewegungsrepräsentation: Die räumliche Kodierung (spatial) geht mit einer seriellen Informationsverarbeitung einher und ist zu Beginn des Lernens dominant. Im späteren Lernverlauf wird die parallele Verarbeitung handlungsleitend, die motorisch (motor) kodiert ist. Beide Systeme sind in zwei separaten, kortikalen Kreisläufen zwischen den Basalganglien und dem Kleinhirn lokalisiert und können somit gleichzeitig aktiv sein und lernen (Hikosaka et al., 1999).

In Abb. 8 ist das Modell von Hikosaka et al. im Detail dargestellt. Die Teile A, B und C repräsentieren dabei unterschiedliche Lernstadien. Die einzelnen grauen Boxen (Act 1, Act 2 und Act 3) stehen für einzelne Elemente einer Bewegungssequenz.

In einem frühen Lernstadium, welches in der Abb. 8 mit dem Buchstaben A gekennzeichnet ist, laufen die Verarbeitungsprozesse ausschließlich seriell ab. Die sogenannte sensomotorische Transformation, die im Schaubild durch die senkrechten schwarzen Pfeile dargestellt ist, muss für jedes einzelne Element der Bewegungssequenz komplett durchlaufen werden: Das sensorische Eingangssignal (sensory input) wird zunächst räumlich kodiert (spatial), bevor es in eine motorische Kodierung umgewandelt wird, die anschließend für die Steuerung der Bewegungsausführung (motor output) verwendet wird (Hikosaka et al., 1999, S. 465–466).

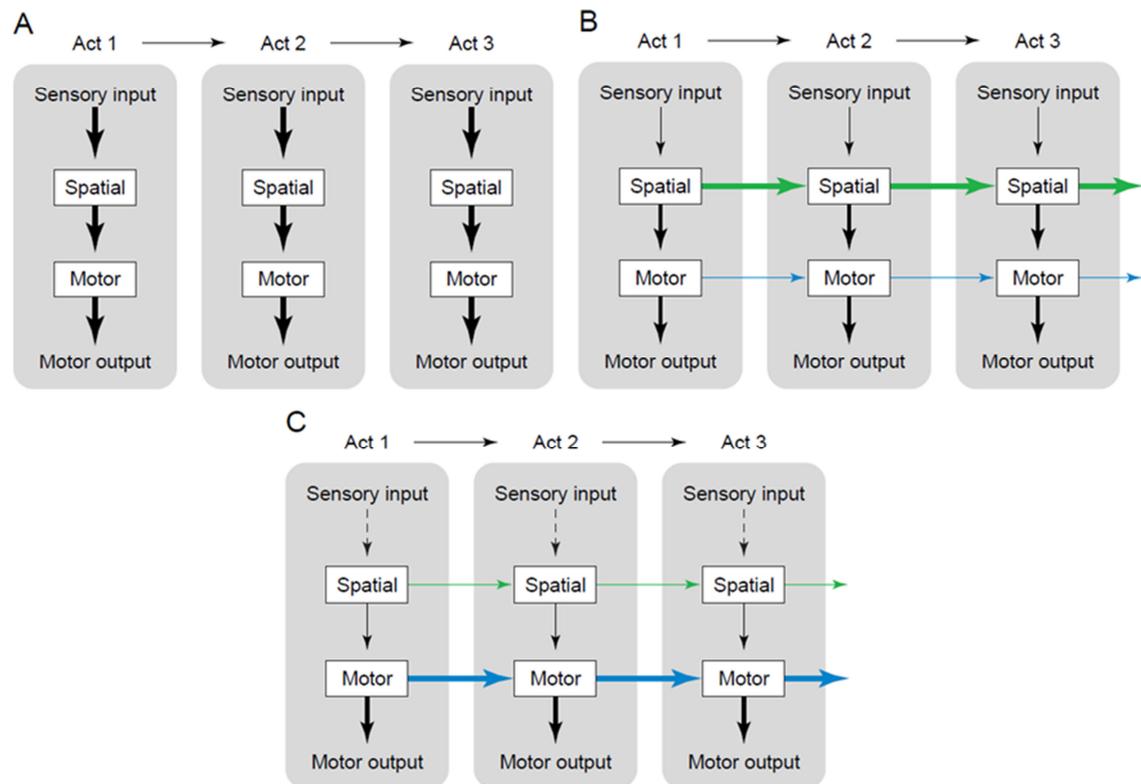


Abb. 8. Hypothetische Veränderung der Informationsverarbeitung im Verlauf des Lernens einer Bewegungssequenz (modifiziert nach Hikosaka et al., 1999, S. 465).

Mit fortschreitendem Lernprozess (siehe Teil B und C der Abb. 8) werden Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bewegungselementen (Act 1, Act 2 und Act 3) hergestellt, die in dem Schaubild durch die waagerechten Pfeile dargestellt sind. Diese horizontalen Verbindungen entstehen parallel und unabhängig voneinander in beiden Kodierungssystemen, so dass sowohl eine räumlich, als auch eine motorisch kodierte Bewegungsrepräsentation ausgebildet wird. Infolgedessen kann der Lernende die Bewegung auf Basis sequentieller Prozesse steuern und ist somit nicht mehr abhängig davon, den kompletten Ablauf der sensomotorischen Transformation für jede Aktion einzeln zu durchlaufen. In Abhängigkeit vom Lernfortschritt ist eher das räumliche oder das motorische Kodierungssystem dominant handlungsleitend. In den frühen bis mittleren Lernstadien (siehe Teil B der Abb. 8) sind die räumlichen Kodierungen handlungsleitend, die schnell erlernt und relativ flexibel angewendet werden können, jedoch aufmerksamkeits- bzw. arbeitsgedächtnisabhängig sind. Die motorische Kodierung dominiert die Bewegungskontrolle eher in den späteren Lernphasen (siehe Teil C der Abb. 8), da sie erst mit größeren Übungsumfängen und insgesamt

langsamer erlernt, jedoch dauerhafter abgespeichert wird (Hikosaka et al., 1999, S. 465–466).

In Experimenten mit verschiedenen Sequenz-Lernaufgaben stellten Hikosaka und Kollegen fest, dass die räumlich kodierten Repräsentationen effektorun-spezifisch sind, was bedeutet, dass sie für alle Körperteile zugänglich sind. Bewegungsrepräsentationen mit motorischer Kodierung sind allerdings effektor-spezifisch, sodass die entsprechenden Bewegungen nur von den Körperteilen ausgeführt werden können, die beim Erlernen der Bewegung genutzt wurden (Hikosaka et al., 1999, S. 466–467).

Auf dieser Erkenntnis aufbauend, wurde das Modell von Hikosaka und Kollegen durch verschiedene Untersuchungen zum kontralateralen Transfer empirisch überprüft. Dabei wurde die Effektorspezifität bzw. -unspezifität beim Erlernen von Bewegungssequenzen getestet, um auf die handlungsleitende Kodierungsform schließen zu können. Nach diesem Prinzip gehen vier Untersuchungen vor, die von Kovacs et al. sowie Panzer et al. durchgeführt wurden (Kovacs, Han & Shea, 2009a; Kovacs, Mühlbauer & Shea, 2009b; Panzer et al., 2007; Panzer, Krueger, Muehlbauer, Kovacs & Shea, 2009): Eine schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes von Kovacs, Han und Shea (2009) ist in Abb. 9 zu sehen und kann als Beispiel für das in allen Untersuchungen verwendete kontralaterale Untersuchungsdesign angesehen werden (Kovacs et al., 2009a, S. 57):

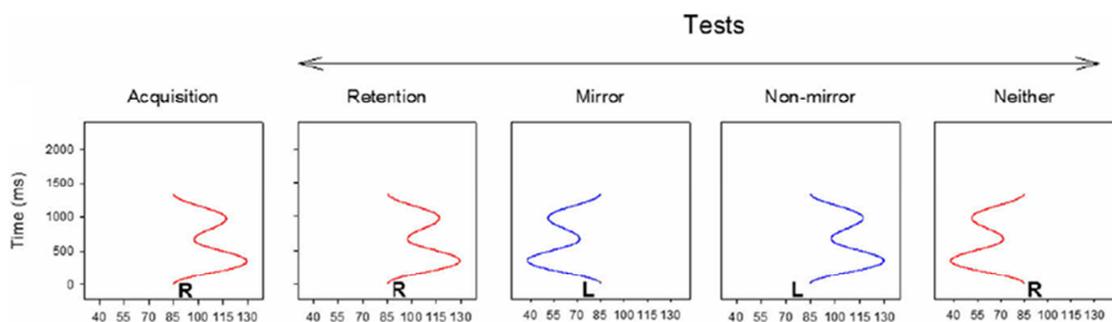


Abb. 9. Schematische Darstellung des Untersuchungsdesigns von Kovacs, Han und Shea (2009) (modifiziert nach Kovacs, Han & Shea, 2009, S. 57).

In allen Experimenten sollten die Versuchspersonen die möglichst genaue Ausführung einer Bewegungssequenz an einem Armhebel erlernen (in Abb. 9: ac-

quisition). Die räumlich-zeitliche Struktur der Bewegungssequenz wurde instruiert, indem entweder nacheinander aufleuchtende Zielkreise angesteuert oder das Ziel-Bewegungsmuster eingeblendet und anschließend reproduziert werden musste (Kovacs et al., 2009a, S. 56–57; Kovacs et al., 2009b, S. 392–401; Panzer et al., 2007, S. 125–126; Panzer et al., 2009, S. 100–101). Die Dauer der Aneignungsphase reichte von 99 Versuchen an einem Tag (Kovacs et al., 2009a, S. 56; Panzer et al., 2009, S. 101) über zwei Übungseinheiten mit insgesamt 320 Versuchen (Panzer et al., 2007, S. 126) bis hin zu einer, vier oder 12 Übungseinheiten mit je 160 Versuchen und somit insgesamt maximal 1920 Übungsversuchen (Kovacs et al., 2009b, S. 390–401). Im Anschluss an die Übungsphase wurde nach frühestens 24 Stunden eine Testphase durchgeführt. Diese bestand in der Regel aus einem Retentions-Test (in Abb. 9: retention), bei dem die Behaltensleistung bezüglich der Übungsaufgabe überprüft wurde, sowie mindestens einem weiteren Transfertest. Um zu testen, ob eher die räumlich oder die motorisch kodierte Bewegungsrepräsentation dominant handlungsleitend ist, wurden zwei inter-manuelle Transfertests (in Abb. 9: blau dargestellt und mit einem L markiert) durchgeführt: In der „non-mirror“-Bedingung sollte die geübte Bewegungssequenz ausgeführt werden, allerdings nicht mit dem Arm, mit dem diese geübt wurde, sondern mit der kontralateralen Seite. Eine räumlich kodierte Bewegungsrepräsentation der erlernten Bewegungssequenz würde demnach mit der Bewegungsrepräsentation für diese Testbedingung übereinstimmen. Die „mirror“-Bedingung verlangte von den Probanden ebenfalls eine Ausführung mit der kontralateralen Seite. In diesem Transfertest wurde jedoch eine gespiegelte Version der Original-Bewegungssequenz verwendet, die somit kongruent zu einer motorisch kodierten Bewegungsrepräsentation der eingeübten Sequenz wäre, da gleiche Gelenkwinkel und Muskelaktivität gefordert würden. In einer Kontroll-Bedingung (in Abb. 9: neither) musste eine gespiegelte Version der Original-Bewegungssequenz mit dem Arm durchgeführt werden, mit dem die Aneignungsphase durchlaufen wurde, so dass in dieser Testbedingung auf keine der beiden erlernten Kodierungen zurückgegriffen werden konnte (Kovacs et al., 2009a, S. 56–57; Kovacs et al., 2009b, S. 391–401; Panzer et al., 2007, S. 124–126; Panzer et al., 2009, S. 101).

Die wesentlichen Unterschiede der Untersuchungen bestehen in den verschiedenen Übungsumfängen und -einheiten, sowie der Komplexität der verwendeten Bewegungssequenzen. Als zentrales, übergreifendes Ergebnis aller vier Veröffentlichungen kann festgestellt werden, dass die Ausbildung und Handlungslenkung der Bewegungsrepräsentation bezüglich der Kodierungsform sowohl vom Übungsumfang, als auch von der Komplexität der zu erlernenden Bewegungssequenz abhängt. Die räumliche Kodierung scheint sich bereits schnell in frühen Lernphasen zu entwickeln und in diesem Lernstadium dominant handlungsleitend zu sein. Erst in späteren Lernphasen bildet sich anscheinend die motorisch kodierte Repräsentation aus und übernimmt eine ausführungslenkende Funktion. Diese Aussage lässt sich jedoch nicht pauschal verallgemeinern, da sich motorisch kodierte Bewegungsrepräsentationen bei weniger komplexen Sequenzen bereits sehr schnell entwickelten, hingegen bei komplexen Bewegungsmustern auch bei hohen Übungsumfängen teilweise gar nicht auftraten (Kovacs et al., 2009a, S. 54–61; Kovacs et al., 2009b, S. 390–406; Panzer et al., 2007, S. 123–128; Panzer et al., 2009, S. 99–108). Mit der Einschränkung, dass der Wechsel der Repräsentationskodierung (von räumlich kodiert zu motorisch kodiert) in Abhängigkeit vom Übungsumfang und der Komplexität der Bewegung von statten geht, kann das von Hikosaka und Kollegen aufgestellte Modell durch die dargestellten Befunde bekräftigt werden (Kovacs et al., 2009a, S. 59–61; Kovacs et al., 2009b, S. 396–406; Panzer et al., 2007, S. 128; Panzer et al., 2009, S. 107–108). Als Ausnahme sehen Hikosaka und Kollegen das implizite Lernen an. Die Autoren gehen davon aus, dass es möglich ist in impliziten Lernsituationen zunächst die motorisch kodierte Repräsentationsform zu erlernen, welche anschließend die räumlich kodierte Bewegungsrepräsentation anleitet (Hikosaka et al., 1999, S. 470).

Ergänzend zu den verhaltensbasierten Studien führten Hikosaka und Kollegen neurophysiologische Untersuchungen durch, um die neuronalen Mechanismen zu ergründen, die ihrem Modell zu Grunde liegen. Dabei fanden sie neuronale Korrelate der beiden Kodierungen in Form von zwei Regelkreisen (loop circuits) zwischen verschiedenen Anteilen der Basalganglien und des Kleinhirns. Die Ergebnisse sind in der aktuellen Version des *parallel neural network model* in-

tegiert, das in Abb. 10 zu sehen ist (Hikosaka et al., 1999, S. 464; Hikosaka, Nakamura, Katsuyuki & Nakahara, 2002, S. 217).

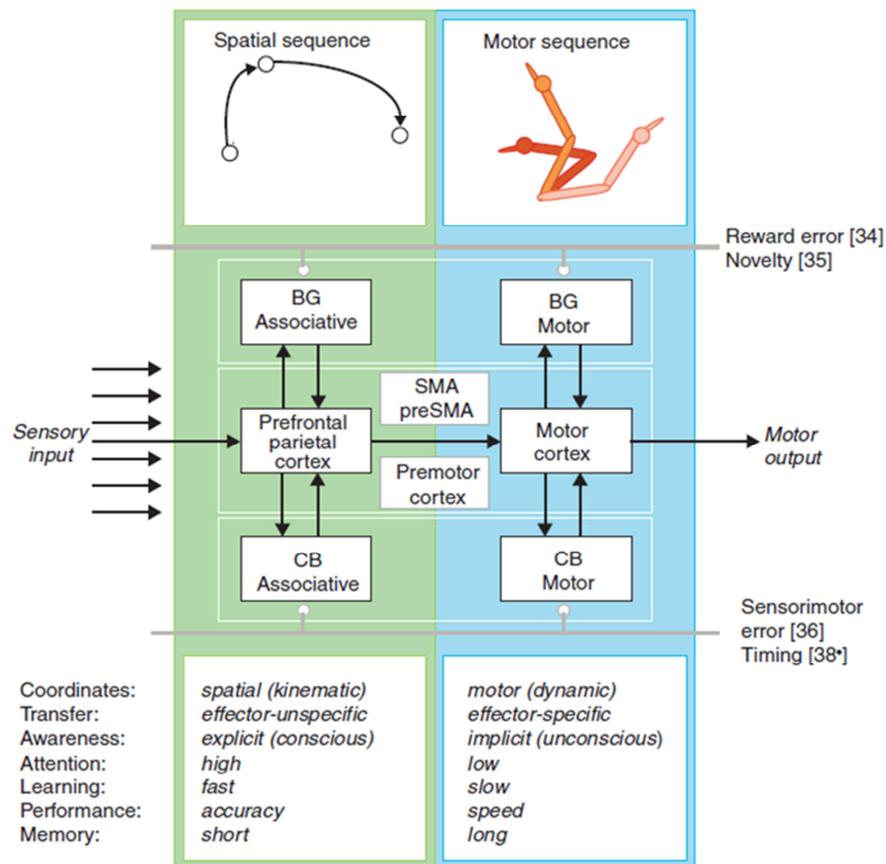


Abb. 10. Schema des motorischen Lernens auf Basis des *parallel neural network model* (modifiziert nach Hikosaka et al., 2002, S. 218).

Da diese Darstellung eine Erweiterung des in Abb. 8 bereits vorgestellten Schemas ist, sollten beide Abbildungen im direkten Vergleich betrachtet werden. Der bedeutendste Unterschied besteht darin, dass die in Abb. 8 senkrecht dargestellten Verbindungen den waagerechten Pfeilen in Abb. 10 entsprechen. Die Farbgebung wurde jedoch beibehalten, so dass die grün hinterlegten Bereiche der räumlichen Kodierung und die blau markierten der motorischen Kodierung entsprechen (Hikosaka et al., 1999, S. 468–469; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219). Die zu Beginn des Lernprozesses seriell ablaufenden Verarbeitungsprozesse sind in Abb. 8 in Teil A zu sehen und in Abb. 10 waagrecht dargestellt: Der sensorische Input gelangt zunächst zu präfrontal parietalen Bereichen des Assoziationskortex, um über verschiedene motorische Areale, wie bspw. die supplementär-motorische Rinde (SMA), die präsupplementär-

motorische Rinde (preSMA) oder die prämotorische Rinde (premotor cortex) zum Motorkortex weitergeleitet zu werden, wo abschließend die Bewegungsausführung konkret angesteuert wird. Die „Übersetzung“ der räumlichen in die motorische Kodierung wird dabei von der prämotorischen Rinde übernommen, während das preSMA die Koordination zwischen beiden Repräsentationsformen übernimmt (Hikosaka et al., 1999, S. 468; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219). Die in frühen Lernphasen primär ausführend leitende, räumlich kodierte Bewegungsrepräsentation ist vorrangig in dem grün hinterlegten Regelkreis zwischen den präfrontalen und parietalen Kortexregionen und dem assoziativen Arealen der Basalganglien (BG) und dem Kleinhirn (Cerebellum = CB) verortet. Nach einem erheblichen Übungsumfang wird die Bewegungssequenz hauptsächlich mit Hilfe der motorischen Kodierung kontrolliert und demnach dem zweiten, blau markierten Regelkreis zwischen dem Motorkortex und den motorischen Arealen der Basalganglien und des Kleinhirns zugeordnet (Hikosaka et al., 1999, S. 468; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219).

In diesem Zusammenhang muss berücksichtigt werden, dass die Verarbeitung in den Basalganglien und dem Kleinhirn auf Basis anderer Informationen stattfindet, als in den kortikalen Arealen: In den Basalganglien und im Kleinhirn werden Lernprozesse durch Fehlersignale gesteuert, die durch Dopamin-Neuronen des Mittelhirns und vom Kleinhirn aufsteigenden Fasern vermittelt werden. Die speziellen Funktionen der Dopamin-Neuronen in den Basalganglien sind die Einschätzung von Wahrscheinlichkeiten, sowie die Bewertung von Fehlern und entsprechenden Belohnungen, so dass sie einen hohen Einfluss auf die Motivation haben. Im Kleinhirn und dort speziell in den zum Mittelhirn aufsteigenden Fasern geschieht die Verarbeitung sensomotorischer Fehlersignale, die anscheinend auch Timing-Fehler einschließen, so dass diese Areale einen großen Einfluss auf die schnelle und präzise Bewegungsausführung zu haben scheinen (Hikosaka et al., 1999, S. 469; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219).

Als Vorteil ihres Modelles nennen Hikosaka und Kollegen, dass beide Regelkreise parallel und somit für beide Kodierungsformen unabhängig voneinander lernen können: „This is probably the key mechanism that makes the model system extremely robust and adaptable because these sequence mech-

anisms can learn a sequence independently and, therefore, either one of them can take the initiative, depending on the behavioral context” (Hikosaka et al., 1999, S. 469). Welche der erlernten Bewegungsrepräsentationen anschließend handlungsleitend wird, ist demnach abhängig vom Kontext. Eine Aufgabe kann somit auf Basis motorischer Kodierung ausgeführt und gesteuert werden, während neue Sequenzen auf Basis räumlich kodierter Bewegungsrepräsentationen erlernt werden. Darüber hinaus können die beiden Regelkreise aber auch miteinander kommunizieren und somit „voneinander“ lernen, da, wie oben bereits erwähnt, die prämotorische Rinde als Übersetzer und das preSMA als Kommunikator zwischen den beiden Kodierungsformen fungieren kann (Hikosaka et al., 1999, S. 468–469; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219). Die Hauptfunktion der preSMA liegt dabei in der Koordination der handlungsleitenden Bewegungskontrolle bei möglicherweise widersprüchlichen Signalen der motorischen und räumlichen Repräsentationen: In frühen Lernphasen kann es häufig passieren, dass der motorische und räumliche Regelkreis unterschiedliche Lösungsmuster generiert. Da es sich in frühen Lernphasen meistens um einen Fehler in der motorischen Repräsentation handelt, wird der räumlichen Repräsentation durch das preSMA die Handlungsleitung zugesprochen, während die motorische Repräsentation sich die korrekte Ausführung aneignen kann (Hikosaka et al., 1999, S. 468–469; Hikosaka et al., 2002, S. 218–219). Sobald die Bewegung als motorische Repräsentation abgelegt ist, wird diese handlungsleitend: „Once a sequence is implemented as a motor sequence, the spatial sequence mechanism can work on other sequences so that eventually many sequences can be learned” (Hikosaka et al., 2002, S. 218–219).

Ergänzend zu den bisher bekannten Charakteristika der motorisch und räumlich kodierten Bewegungsrepräsentationen, beschreiben Hikosaka und Kollegen weitere bedeutende Kriterien, die mit der Bewegungsausführung, auf Basis der entsprechenden Kodierungsformen, einhergehen (kleine Tabelle unten in Abb. 10). Diese ähneln den Beschreibungen der kontrollierten und automatischen Prozesse im Rahmen der Zwei-Prozess-Theorien sehr: Demnach werden räumlich kodierte Repräsentationen effektor-unspezifisch, auf Basis bewusster Aufmerksamkeit und somit schnell angeeignet. Allerdings bedürfen sie

eines Großteils der Arbeitsgedächtniskapazitäten und werden nur relativ kurz im Gedächtnis behalten, können jedoch sehr präzise, aber weniger schnell ausgeführt werden. Die motorisch kodierten Bewegungsrepräsentationen sind effektor-spezifisch und werden in der Regel implizit, ohne bewusste Aufmerksamkeit erlernt, was dazu führt, dass die Aneignung relativ viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Bewegungsausführung kann hingegen schnell erfolgen und bleibt langfristig im Gedächtnis gespeichert (Hikosaka et al., 2002, S. 218).

#### 2.2.2.7 Uni- und multidimensionales System (Keele et al., 2003)

Keele, Mayr, Ivry, Hazeltine und Heuer veröffentlichten 2003 ein weiteres Modell, welches sich den neurophysiologischen Veränderungen während des Lernverlaufes widmet. Die Theorie bezieht sich dabei vor allem auf das Sequenz-Lernen und wurde vorrangig mit Hilfe verschiedener „Serial-Reaction-Time“-Aufgaben (SRT) untersucht. Das Erlernen sequentieller Repräsentationen ist notwendig, um eine kleine Anzahl von Elementen passend anzuordnen, damit diese anschließend, bspw. als Laute, und infolgedessen als Worte wahrgenommen und verstanden werden können. Das Lernen geschieht in diesem Zusammenhang, ähnlich wie auch bei der klassischen Konditionierung, indem Assoziationen zwischen zwei Elementen gebildet werden, was teilweise auch als Korrelation (correlated stimuli) bezeichnet wird. Diese Assoziationen entstehen, wenn ein Signal ein weiteres, unmittelbar anschließendes Signal zuverlässig vorhersagen kann, also beide Stimuli in einem direkten Zusammenhang stehen (Keele, Mayr, Ivry, Hazeltine & Heuer, 2003, S. 316–317). Wie auch Hikosaka et al., nehmen Keele und Kollegen an, dass das Lernen in zwei voneinander unabhängigen neurokognitiven Systemen stattfindet, welche unter bestimmten Bedingungen auch gleichzeitig operieren können. Ähnlich wie das *parallel neural network model* geht dieses Konzept davon aus, dass die zwei Systeme unterschiedlichen Nervenbahnen zuzuordnen sind, verortet diese jedoch in zwei anderen neuronalen Systemen (dorsal und ventral): Das dorsale System ist im Parietallappen und dem SMA verortet, wohingegen das ventrale System im Temporallappen und dem lateralen präfrontalen Kortex lokalisiert ist (Keele et al., 2003, S. 316–320).

Das dorsale und das ventrale System unterscheiden sich nicht nur in der bereits angesprochenen neuronalen Lokalisation, sondern auch in der „Dimensionalität“. Die Dimensionalität ist für dieses Modell zentral und, im Vergleich zu den bisher vorgestellten Theorien, neu. Darunter werden vorrangig Modalitäten, vereinzelt aber auch Stimulus-Attribute oder Effektor-Dimensionen verstanden. Wörtlich beschreiben Keele et al. die Dimensionalität folgendermaßen: „Dimension has generally been used interchangeably with modality, and we maintain this convention. However stimulus attributes within a modality can also constitute relevant dimensions (. . .). Moreover, distinctions within the motor system (e.g., hands vs. feet) may also constitute dimensions“ (Keele et al., 2003, S. 317). Das ventrale System funktioniert multidimensional. Das bedeutet, es kann Assoziationen modalitätsübergreifend ausbilden und ist somit in der Lage, relativ komplexe Sequenzen zu erlernen. Im Gegensatz dazu arbeitet das dorsale System unimodal, so dass eine Differenzierung in spezifische Module notwendig ist, die in ihrer Verarbeitung auf Informationen einer einzelnen Dimension begrenzt sind. Durch diese Verkapselung (encapsulation) ist das unidimensionale System in der Lage mehrere, gleichzeitig auszuführende Aufgaben unabhängig voneinander zu erlernen und auszuführen, so lange diese nicht die gleiche Dimension beanspruchen (Keele et al., 2003, S. 317). Im weiteren Verlauf ihrer Arbeit konkretisieren Keele und Kollegen ihre Auffassung der Dimensionen, indem sie postulieren, dass je nach Dimension unterschiedliche Codes verwendet werden. Demnach verwendet das dorsale, unidimensionale System relativ unkategorisierte Stimuli, während das ventrale, multidimensionale System sich auf kategorisierte Stimuli bezieht (Keele et al., 2003, S. 317).

Darüber hinaus unterscheiden sich beide Systeme sehr stark hinsichtlich ihrer Aufmerksamkeitsanforderungen und der Zugänglichkeit zum Bewusstsein: Wie bereits angedeutet, verläuft der Lernprozess innerhalb der Module des unidimensionalen Systems aufmerksamsfrei und automatisch, sowie infolgedessen interferenzfrei ab, wenn die Bearbeitung weiterer Aufgaben nicht die gleichen Dimensionen beansprucht. Im multidimensionalen System ist es ebenfalls möglich, dass das Lernen automatisch stattfindet. Allerdings erhalten nur Signale Zugang zu diesem System, denen Aufmerksamkeit geschenkt wird, da sie für

die zu lösende Aufgabe als relevant bewertet werden. In Folge der aufgabenrelevanten Aufmerksamkeitslenkung werden die Stimuli also durch das multidimensionale System kategorisiert. Wenn diese Informationen korrelierte Ereignisse verschiedener oder auch der gleichen Dimensionen enthalten, werden diese abgespeichert und gelernt. So lange zusätzlichen, störenden Signalen (random events) keine Aufmerksamkeit geschenkt wird, verläuft das Lernen im multidimensionalen System störungsresistent. Wenn aber gleichzeitig mehrere aufmerksamkeitsabhängige Ereignisse ausgeführt werden sollen, kommt es zu Interferenzen. Damit bieten Keele et al. einen alternativen Erklärungsansatz für Doppeltätigkeitsinterferenzen. Sie begründen diese nicht, wie die meisten der bisher vorgestellten Theorien, mit Kapazitätslimitierungen, sondern damit, dass die Bildung von Assoziationen zwischen korrelierten Stimuli gestört wird. Aber auch wenn mehrere Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden, ist die automatische Entstehung von Assoziationen möglich, wenn das Signal der einen Aufgabe im konkreten Zusammenhang mit dem Signal einer anderen Aufgabe steht, dieses also zuverlässig vorhersagen kann. In diesem Fall spricht man von cross-dimensionalem Lernen, welches nur im multidimensionalen System möglich ist, da Stimuli unterschiedlicher Dimensionen miteinander assoziiert werden (Keele et al., 2003, S. 316–317). In diesem Aspekt sehen Keele und Kollegen einen großen Vorteil ihres Modells:

When considered together, the two systems provide the basis for a powerful sequence-learning device. Each unidimensional module is able to extract regularities along a single dimension even when information on other dimensions is not predictive. However, when reliable cross-dimensional contingencies are available, a second, parallel system can extract these correlations as long as both dimensions are attended. (Keele et al., 2003, S. 318)

Zumal das unimodale System aufmerksamkeitsunabhängig funktioniert, ist es nicht bewusst zugänglich und kann somit nur implizit lernen. Wie bereits erwähnt, ist für das multimodale System eine bewusste Aufmerksamkeitslenkung notwendig, so dass es bewusst zugänglich ist und explizite Lernprozesse möglich sind. Es wird aber auch angenommen, dass die Assoziationsbildung, sobald Informationen Zugang zu diesem System erhalten haben, automatisch und infolgedessen auch implizit ablaufen kann (Keele et al., 2003, S. 317–326).

Empirisch basiert das Konzept von Keele und Kollegen auf Untersuchungen mit verschiedenen Versionen der SRT-Aufgabe. Bei dieser Aufgabe werden den Versuchspersonen visuelle oder akustische Signale präsentiert, auf die möglichst schnell mit einer entsprechenden Antworthandlung, bspw. dem Drücken einer bestimmten Taste, reagiert werden soll. Um den Lernerfolg zu überprüfen, werden die Reaktionszeiten der zu erlernenden Sequenz mit den Reaktionszeiten (reaction times = RT) einer randomisierten Abfolge von Signalen verglichen. In Abhängigkeit davon, ob den Probanden die Regelmäßigkeit der präsentierten Signale und somit die wiederkehrende Sequenz bewusst wird oder nicht, gehen die Autoren von implizitem oder explizitem Lernen und somit einer Repräsentationsausbildung im unimodalen oder multimodalen System aus (Keele et al., 2003, S. 316).

Den Ausgangspunkt bilden dabei drei Experimente von Curran und Keele (1993), bei denen die Versuchspersonen eine aus sechs Elementen bestehende Sequenz erlernen sollten. Der Ablauf des Experimentes und die Ergebnisse sind in Abb. 11 dargestellt. In den ersten zwei Blöcken musste auf eine randomisierte Reihenfolge der visuellen Stimuli reagiert werden (Random-Blöcke sind in der Abbildung mit einem „R“ gekennzeichnet), während gleichzeitig eine Ton-Zähl-Aufgabe bewältigt werden musste. In der anschließenden Übungsphase wurden sechs Blöcke der SRT-Aufgabe unter Single-Task-Bedingung, also ohne die zusätzliche Ton-Zähl-Aufgabe, durchgeführt. In fünf dieser Blöcke wurde die zu erlernende Sequenz präsentiert (in der Abbildung mit „S“ gekennzeichnet) und im siebten Block wurden randomisierte Stimuli dargeboten. Die letzten vier Blöcke wurden wieder unter Dual-Task-Bedingung durchgeführt: Auf randomisierte Signale (Block 9, 11 und 12) bzw. die erlernte Sequenz musste reagiert werden, während zeitgleich die Ton-Zähl-Aufgabe bewältigt werden musste. Die Versuchspersonen wurden in drei Gruppen eingeteilt: Eine Probandengruppe (*Intentional*) wurde zuvor darüber informiert, dass in der Übungsphase eine regelmäßig wiederkehrende Sequenz präsentiert wird. Alle anderen Probanden wurden vorausgehend nicht darüber aufgeklärt, aber im Anschluss an die Untersuchung gefragt, ob ihnen die wiederkehrende Sequenz aufgefallen

war und dementsprechend den Gruppen *More Aware* oder *Less Aware* zugeteilt (Curran & Keele, 1993, S. 190–191; Keele et al., 2003, S. 318).

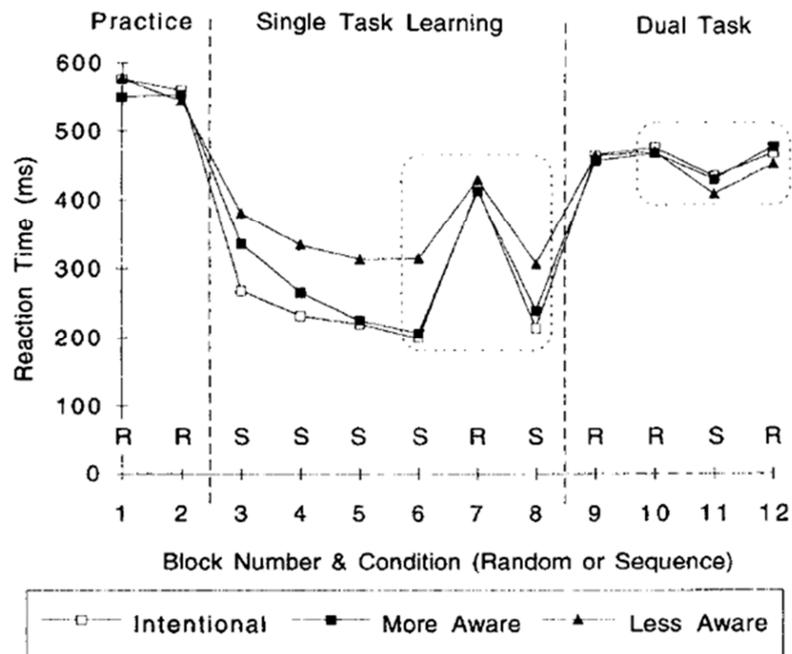


Abb. 11. Ergebnisdarstellung des ersten Experiments von Curran und Keele (1993) (modifiziert nach Curran & Keele, 1993, S. 192).

Als Maß für die Sequenz-Lernleistung unter der Single-Task-Bedingung ziehen die Autoren die Differenz zwischen dem eingeschobenen Random-Block (Block 7) und dem Mittelwert des vorausgehenden und anschließenden Sequenz-Blocks (Blocks 6 und 8) heran. Dabei fällt auf, dass alle Gruppen unter randomisierten Bedingungen zwar langsamer reagierten, sich bei der Ausführung der Sequenz jedoch signifikant unterschieden. Die Gruppen, denen die Regelmäßigkeit der Sequenz bewusst geworden oder zuvor mitgeteilt worden war, zeigten deutlich stärkere Lernleistungen, in Form von kürzeren Reaktionszeiten, als die *Less Aware*-Gruppe. Unter Dual-Task-Bedingung wurde die Sequenz-Lernleistung ähnlich berechnet, indem die Differenz zwischen dem Sequenz-Block (Block 11) und dem Mittelwert der vorausgehenden und anschließenden Random-Blocks (Blocks 10 und 12) kalkuliert wurde. Ein Lerneffekt konnte zwar in allen Gruppen statistisch abgesichert werden, jedoch zeigten sich unter Doppeltätigkeit keine Gruppenunterschiede. Darüber hinaus konnte für alle Gruppen eine stärkere Sequenz-Lernleistung unter Single-Task-

Bedingung im Vergleich zur Dual-Task-Bedingung ausgemacht werden (Curran & Keele, 1993, S. 192; Keele et al., 2003, S. 318). Diese Ergebnisse werden als Bestätigung für die Existenz zweier parallel lernender Systeme angesehen. Durch den Einsatz der Sekundäraufgabe wird die Lern- und Kontrollaktivität des multidimensionalen Systems blockiert, so dass die unter Dual-Task-Bedingungen messbaren Lernleistungen dem unidimensionalen System zuzuschreiben sind. Ohne die Sekundäraufgabe können beide Systeme parallel lernen. Somit sind die kürzeren Reaktionszeiten unter Single-Task-Bedingungen durch die gleichzeitige Aktivität beider Systeme begründet. Der Unterschied zwischen der Leistung unter Dual-Task- und Single-Task-Bedingung liegt im Lernerfolg des multidimensionalen Systems begründet, welches dem Bewusstsein zugänglich ist und sowohl explizit, als auch implizit lernen kann. Die Autoren gehen davon aus, dass ein Teil der Lernleistung den impliziten und ein weiterer Teil den expliziten Lernprozessen des multidimensionalen Systems zugeschrieben werden kann. Somit lässt sich auch die geringere Leistung der *Less Aware*-Gruppe erklären, da diese nicht auf die zusätzlichen expliziten Vorgänge zurückgreifen konnte (Curran & Keele, 1993, S. 191–193; Keele et al., 2003, S. 318).

In ihrem zweiten Experiment ließen Curran und Keele die Sequenz von zwei Versuchsgruppen unter Einzel- bzw. Doppelaufgabenbedingungen erlernen, bevor die Lernleistung in einer anschließenden Testphase unter Doppelaufgabenbedingungen überprüft wurde. Die Gruppe, welche die Sequenz unter Einzelaufgabenbedingung gelernt hatte, zeigte während ihrer Aneignungsphase zwar stärkere Leistungen, fiel jedoch in der Testphase auf das Niveau der Gruppe ab, die unter Dual-Task-Bedingung geübt hatte. Dies deutet darauf hin, dass der Einsatz der Sekundäraufgabe nicht nur das Erlernen im multidimensionalen System verhindert, sondern auch den Einsatz der erlernten Repräsentation blockiert (Curran & Keele, 1993, S. 193–195; Keele et al., 2003, S. 319).

Im dritten Experiment sollten die Versuchspersonen die Sequenz unter Dual-Task-Bedingungen ausführen, um isolierte Lernprozesse im unidimensionalen System zu provozieren. In einer anschließenden Testphase, in der die Sekundäraufgabe entfernt wurde, konnte eine ähnliche Leistungssteigerung beobachtet werden, wie zuvor unter Doppelaufgabenbedingungen. Die Autoren nehmen

deshalb an, dass auch nach Entfernung der Sekundäraufgabe weitere Lernprozesse nur im Rahmen des unidimensionalen Systems stattfanden (Curran & Keele, 1993, S. 195–196; Keele et al., 2003, S. 319).

Weitere Untersuchungen bekräftigen diese Annahmen, wie die Studie von Schmidtke und Heuer (2003), welche das Modell von Keele und Kollegen darüber hinaus um Erklärungen für cross-dimensionale Lernprozesse im multidimensionalen System und Ursachen von Doppeltätigkeitsinterferenzen erweitert. Dafür mussten die Probanden zeitgleich eine visuelle und eine akustische Sequenz erlernen. Bestand ein regelhafter Zusammenhang zwischen den beiden Sequenzen, so konnten Lernprozesse im uni- und im multidimensionalen System nachgewiesen werden. Mussten die beiden Sequenzen jedoch zeitlich versetzt abgerufen werden, zeigten sich Leistungsreduktionen, obwohl die intrasequentielle Reihenfolge bestehen blieb. Als Begründung geben die Autoren an, dass durch die Verschiebung der Sequenzen die im multidimensionalen System abgespeicherten, cross-dimensionalen Assoziationen verloren gingen, so dass nur noch die in den Modulen des unidimensionalen Systems vorhandenen Repräsentationen verwendet werden konnten. Waren die beiden zu erlernenden Sequenzen von Beginn an nicht miteinander korreliert, so konnte keine Aktivität im multidimensionalen System festgestellt werden. Als Ursache von Doppeltätigkeitsinterferenzen sehen Schmidtke und Heuer demnach keine Kapazitätslimitierungen, sondern die Störung der Korrelationen assoziierter Stimuli durch die Sekundäraufgabe (Keele et al., 2003, S. 322–324; Schmidtke & Heuer, 1997, S. 55–71).

Neben diesen verhaltensbasierten Studien untermauern auch einige neurophysiologische Untersuchungen, die vorrangig dem Forschungsfeld des impliziten Lernens zuzuordnen sind, das von Keele et al. entwickelte Konzept. Zum Beispiel führten Grafton, Hazeltine und Ivry (1995) ein SRT-Experiment durch, kombinierten dieses aber mit einer Positronen-Emissions-Tomographie (PET), um die regionale Kortexdurchblutung (regional cerebral blood flow = rCBF) zu erfassen und somit die Aktivität verschiedener Hirnregionen mit bestimmten Verhaltensweisen in Zusammenhang bringen zu können. Es wurden ähnliche Primär- und Sekundäraufgaben verwendet, wie in den zuvor vorgestellten Stu-

dien. Für diese Untersuchung führten die Versuchspersonen die SRT-Aufgabe in zwei Übungsblöcken, zunächst unter Dual-Task- und anschließend unter Single-Task-Bedingung, durch (Grafton, Hazeltine & Ivry, 1995, S. 497–499; Keele et al., 2003, S. 319). Die zentralen Ergebnisse des PET-Scans sind in Abb. 12 dargestellt.

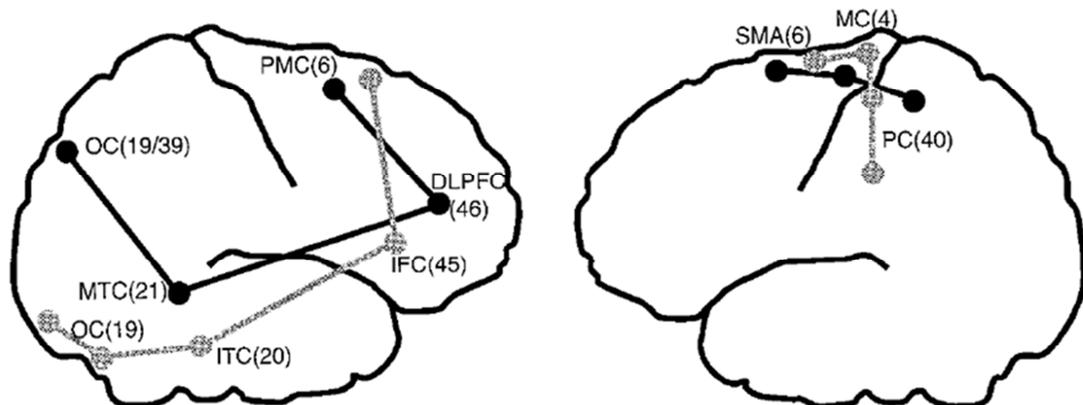


Abb. 12. Die wichtigsten Kortexregionen, die unter Einzeltätigkeit (links) und Doppelaufgabenbedingungen (rechts) eine erhöhte Durchblutung zeigten. Schwarze Linien: visuell-räumlichen Sequenz nach Grafton, Hazeltine & Ivry, 1995; Graue Linien: Farbsequenz nach Hazeltine, Grafton & Ivry, 1997; Die Ziffern in Klammern benennen die Brodmann-Areale (modifiziert nach Keele, Mayr, Ivry, Hazeltine & Heuer, 2003, S. 320, sowie Müller & Blischke, 2009, S. 173).

Die Kortexregionen, die unter Single-Task-Bedingung eine erhöhte Durchblutung zeigten, sind links dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung sind die Areale zu sehen, die bei der gleichzeitigen Durchführung der Sequenz und der Ton-Zähl-Aufgabe verstärkt durchblutet wurden. Die schwarzen Linien beziehen sich auf die vorliegende Untersuchung von Grafton et al. (1995). Die grauen Linien stellen die Ergebnisse eines ähnlichen Experimentes von Hazeltine, Grafton und Ivry (1997) dar, die eine farblich kodierte SRT-Aufgabe anstelle der räumlich kodierten Sequenz-Lernaufgabe verwendeten (Hazeltine, Grafton & Ivry, 1997, S. 123–126; Keele et al., 2003, S. 319–320).

Die Hirnregionen, die eine erhöhte Aktivierung unter Single-Task-Bedingungen aufweisen (in der Abbildung links), sind dem multidimensionalen, also dem ventralen System zuzuordnen. Diese sind vor allem in der rechten Hemisphäre verortet und betreffen im hinteren Kortexbereich verschiedene Anteile des Occipital- (OC) und Temporallappens (ITC und MTC), sowie im frontalen Kortex die laterale prämotorische Rinde (PMC) und verschiedene Anteile des präfron-

talen Kortex (DLPFC und IFG). Die neuronalen Korrelate des unidimensionalen, dorsalen Systems weisen eine erhöhte Aktivität unter Dual-Task-Bedingungen auf (in der Abbildung rechts) und liegen grundsätzlich weiter oben. Speziell sind vor allem die in der linken Hemisphäre verorteten Anteile des Parietallappens (PC), des SMA und der primärmotorischen Rinde (MC oder M1) zu nennen (Keele et al., 2003, S. 319–321). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen deuten darauf hin, dass beide Systeme zwar unter Single-Task-Bedingungen parallel lernen, jedoch nicht zeitgleich handlungsleitend sein können, so dass sie um die Ausführungskontrolle konkurrieren (Keele et al., 2003, S. 321).

Auch weitere PET-Untersuchungen, sowie Studien mit der transkraniellen Magnetstimulation (TMS) untermauern die Verortung des multidimensionalen Systems in frontalen und posterioren Kortexbereichen, wenn auch die exakte Position der neuronalen Korrelate je nach experimentellem Design variiert. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Befunde zur Lokalisation der Aktivität im hinteren Kortex eher inkonsistent sind (Keele et al., 2003, S. 321). Ebenfalls etwas weniger eindeutig ist die Beteiligung subkortikaler Regionen am dorsalen und ventralen System: Einige Befunde deuten darauf hin, dass der Hippocampus am ventralen, multidimensionalen System beteiligt ist (Keele et al., 2003, S. 330–331). Die Basalganglien scheinen jedoch eine wichtige Rolle für die Prozeduralisierung in beiden Sequenz-Lernsystemen zu spielen (Keele et al., 2003, S. 331–332). Unter dem aus der Psychologie stammenden Begriff der Prozeduralisierung wird „die Ablösung einer bewusst kontrollierten, detailbezogenen und schrittweisen, wissensbasierten Aufgabenbearbeitung durch eine globale und ganzheitliche, handlungsbezogene Vorgehensweise, die in ihren Details nicht mehr bewusst zugänglich ist“, verstanden (Müller & Blischke, 2009, S. 198). Es kann also angenommen werden, dass die Basalganglien als Ausgangspunkt für motorische Automatisierungsprozesse dienen.

Die neuronalen Strukturen, die in den vorausgehenden Absätzen dem dorsalen und ventralen System zugeordnet wurden, stimmen größtenteils mit denen überein, die mit frühen bzw. späten Lernphasen in Verbindung gebracht werden. Bezogen auf den Lernprozess, wie er in Kapitel 2.1.1 beschrieben ist, geht man von einem Übergang der multidimensionalen hin zur unidimensionalen

Ausführungskontrolle aus (Müller & Blischke, 2009, S. 172–206). In diesem Zusammenhang werden somit auch Ähnlichkeiten zwischen dem Konzept von Keele et al. und dem *parallel neural network model* deutlich: Die zu Beginn des Lernprozesses handlungsleitenden, räumlich kodierten Bewegungsrepräsentationen sind laut Hikosaka et al. vorrangig in einem Regelkreis aus präfrontalen Kortextbereichen, die im direkten Kontakt mit bestimmten Anteilen der Basalganglien und des Kleinhirns stehen, zu verorten. Dem multidimensionalen System werden ebenfalls frontale und präfrontale, sowie darüber hinaus posteriore Kortextbereiche (Teile des Occipital- und Temporallappens) zugeschrieben. Die motorische Kodierung, welche in späten Lernphasen handlungsleitend wird, ist, neben den Basalganglien und dem Kleinhirn, dem Motorkortex und der primärmotorischen Rinde zugeordnet. Das unidimensionale System ist ebenfalls in den motorischen Zentren (bspw. primärmotorische Rinde), aber auch dem SMA und Parietalkortex lokalisiert. Im Gegensatz zum Modell von Keele et al., fokussiert das *parallel neural network model* vorrangig den Übergang der beiden Kontrollmodi, welche durch die motorischen Areale SMA, preSMA und PMC vermittelt werden. Wie auch im *parallel neural network model* werden den Basalganglien im dorsalen und auch dem ventralen System eine wichtige Bedeutung beigemessen. Beide Systeme greifen also auf ähnliche neuronale Strukturen zurück. Die zentralen Unterschiede beziehen sich vielmehr auf die konkrete Funktion und Charakteristik der beiden Kontrollsysteme. Hikosaka et al. thematisieren zentral den Übergang der Repräsentationskodierungen, die parallel lernen und sich im Lernverlauf gegenseitig ablösen. Keele und Kollegen gehen ebenfalls von einem parallelen Lernprozess aus, nehmen jedoch an, dass beide Systeme um die Ausführungskontrolle konkurrieren und nicht gleichzeitig aktiv sein können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Modelle von einem lernbedingten Wechsel im Kontrollmodus ausgehen, der mit ähnlichen neuronalen Korrelaten untermauert wird.

An dieser Stelle setzt auch das anschließende Kapitel an, welches sich globaler mit den strukturellen Veränderungen der Hirnaktivitäten während des Lernprozesses auseinandersetzt.

### 2.2.2.8 Neuronale Korrelate des motorischen Lernens und der Automatisierung

Im Lernverlauf kommt es nicht nur zu den in Kapitel 2.1 angedeuteten Verhaltensänderungen. Diese werden, wie in den vorangegangenen zwei Kapiteln bereits ersichtlich geworden ist, durch Prozesse der strukturellen Fokussierung und Verlagerung von Aktivität in bestimmten Bereichen des Gehirns begleitet: Zu Beginn des motorischen Lernens zeigen sich vor allem Aktivitäten in den Bereichen, welche unter anderem mit den Funktionen des Neulernens, der Integration sensorischer Reize und der bewussten Bewegungskontrolle assoziiert werden. Vor allem der (dorsolaterale) präfrontale Kortex (dorsolateral prefrontal cortex = DLPFC), welcher mit Arbeitsgedächtnisvorgängen in Verbindung gebracht wird, und die Hippocampus-Region zeigen in frühen Lernstadien eine verstärkte Aktivierung, die sich im Lernverlauf reduziert. Im weiteren Lernprozess kommt es zu einer Verschiebung der Aktivität hin zu motorischen Kortexarealen, wie dem SMA und dem primär-motorischen Kortex (M1). Diese Hirnareale spielen eine entscheidende Rolle bei der Planung und Kontrolle von Bewegungen und der Speicherung motorischer Repräsentationen. Nach sehr großen Übungsumfängen zeigt sich außerdem eine dauerhafte Beteiligung subkortikaler Strukturen bei der Bewegungsvorbereitung und Ausführungskontrolle. Besonders beim Erlernen von Sequenzen nehmen die Basalganglien eine immer stärker werdende Kontrollfunktion ein (Lohse, Wadden, Boyd & Hodges, 2014; Müller & Blischke, 2009, S. 170–171). Die bei der Aneignung motorischer Aufgaben noch hohe Aktivität im Kleinhirn ist nur in frühen Lernphasen zu beobachten. Nur bei räumlichen, zeitlichen und dynamischen Anpassungsaufgaben, wie bspw. präzisen Reich- und Wurfbewegungen bleiben bestimmte Anteile des Kleinhirns dauerhaft aktiv. Für den speziellen Fall der ballistischen Fertigkeiten werden in späteren Lernphasen verstärkt Aktivitäten im Hirnstamm, Mittelhirn und Kleinhirn beobachtet (Lindquist & Guadagnoli, 2008, S. 168; Müller & Blischke, 2009, S. 171). In sehr späten Lernphasen zeigt sich eine ganzheitliche Reduktion der Kortexaktivität, die anscheinend durch eine effektivere Konnektivität des motorischen neuronalen Netzwerks möglich wird. Über den gesamten Lernverlauf betrachtet, kommt es also zu einer Verlagerung von prä-

rontalen zu motorischen Kortextarealen, sowie von kortikalen, der bewussten Bewegungskontrolle zugeordneten Hirnbereichen, hin zu subkortikalen Arealen und von dort ausgehenden Netzwerken (Magill, 2014, S. 290–291; Wu, Chan & Hallett, 2008, S. 4302). Wie bereits angedeutet, unterscheiden sich diese Aktivitätsverschiebungen jedoch in Abhängigkeit vom Aufgabentyp relativ stark (Müller & Blischke, 2009, S. 171).

Eine Zusammenfassung der vielen, teilweise widersprüchlichen Befunde liefern Doyon, Ungerleider und Kollegen (2002, 2003 und 2009), die ein Modell vorstellen, welches sie in mehreren Studien mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (functional magnetic resonance imaging = fMRI) erarbeitet haben. Dieser Theorie entsprechend haben zwei kortikal-subkortikale Netzwerke und deren assoziierte neuroplastische Vorgänge die entscheidende Funktion beim motorischen Lernen. Das Konzept differenziert ein kortiko-striatales (Kortex - Basalganglien - Thalamus - Kortex) und ein kortiko-zerebelläres System (Kortex - Kleinhirn - Thalamus - Kortex), deren wichtigste kortikale und subkortikale Strukturen, sowie deren Vernetzung in Abb. 13 dargestellt sind (Doyon, Penhune & Ungerleider, 2003, S. 252–253; Doyon & Ungerleider, 2002, S. 225–227): Zu Beginn des Bewegungslernens werden Strukturen beider Systeme rekrutiert: Das Striatum, das Kleinhirn, der präfrontale und parietale Kortex, sowie motorische Kortextareale und der Hippocampus. In Abhängigkeit vom Aufgabentyp werden im weiteren Lernverlauf jedoch unterschiedliche Areale beansprucht: Bei motorischen Adaptationsaufgaben (motor adaption = MA) lässt sich in frühen Lernphasen eine Aktivitätsverschiebung innerhalb des Kleinhirns hin zu tiefer liegenden zerebellären Nuclei feststellen. In frühen Stadien des Sequenz-Lernens (motor sequence learning = MSL) kommt es hingegen zu einer Verlagerung innerhalb des Striatums von assoziativen hin zu sensomotorischen Bereichen. Im Zuge der Konsolidierung und anschließenden Automatisierung verschärft sich diese Verlagerung: „At this stage, Doyon’s model suggests that for MA, the striatum is no longer necessary for the retention and execution of the acquired skill; regions representing the skill are now involving the cerebellum and related cortical regions” (Doyon et al., 2009, S. 72).

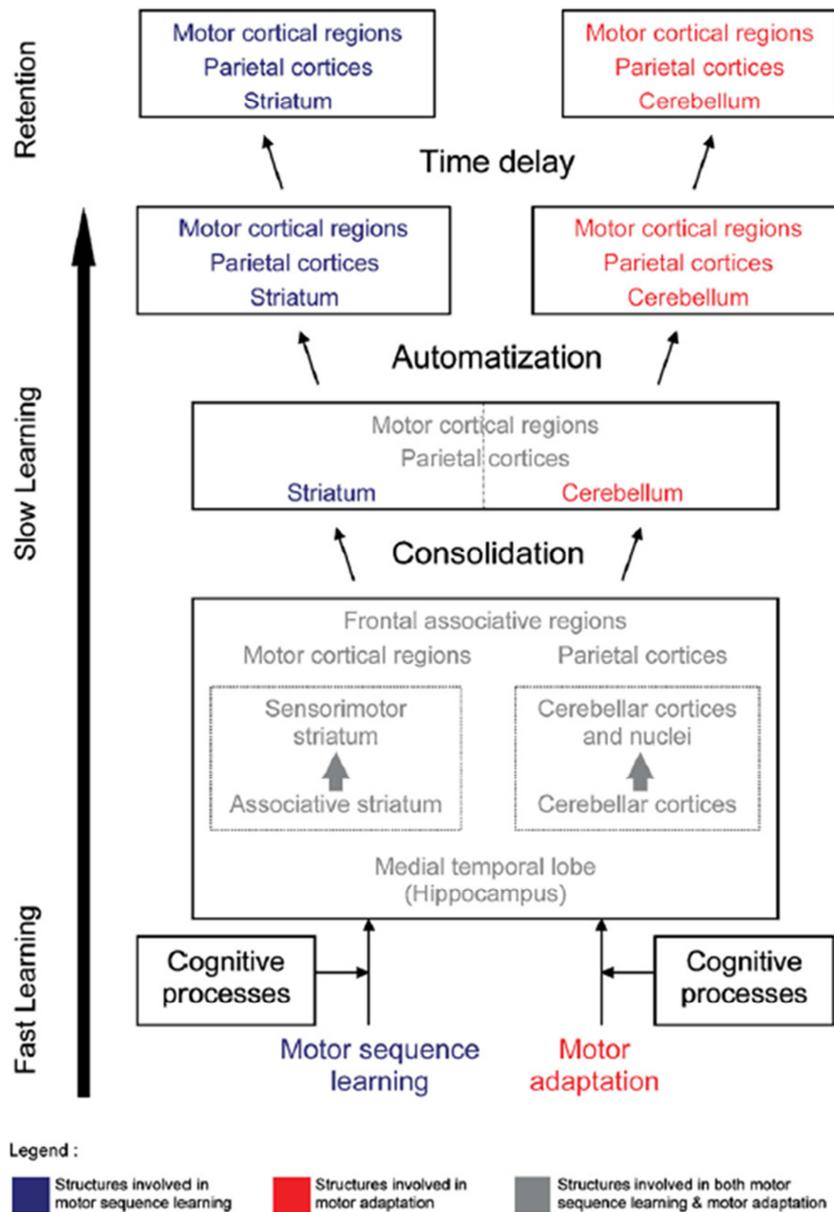


Abb. 13. Modell des motorischen Lernens nach Doyon et al. (2002, 2003, 2005 & 2009). Darstellung der zerebralen Plastizität innerhalb des kortiko-striatalen und kortiko-zerebellären Systems beim Neulernen einer Bewegungssequenz (motor sequence learning) in blau markiert und bei der motorischen Adaptation (motor adaption) in rot markiert (modifiziert nach Doyon et al., 2009, S. 72).

Ein umgekehrtes Muster zeigt sich beim Sequenz-Lernen, welches nun nur noch in den Basalganglien und assoziierten motorischen Zentren verortet ist und keine Kleinhirnaktivität mehr beansprucht. Die motorische Repräsentation lässt sich somit in einem finalen Lernstadium, in Abhängigkeit vom Aufgabentyp, entweder dem kortiko-zerebellären oder kortiko-striatalen Netzwerk zuord-

nen (Doyon et al., 2009, S. 71–73; Doyon et al., 2003, S. 259–261; Doyon & Ungerleider, 2002, S. 226–234).

Dieses Modell von Doyon et al. weist somit mehrere Ähnlichkeiten zum *parallel neural network model* auf, da beide Theorien von kortikal-subkortikalen Kreisläufen ausgehen, deren zentrale subkortikale Areale das Kleinhirn und das Striatum bzw. die Basalganglien bilden. Das Konzept von Hikosaka und Kollegen nimmt allerdings an, dass die Aneignung einer Bewegungssequenz gleichzeitig in zwei separaten Systemen parallel erlernt wird. Im Sinne von Doyon et al. werden zwei Systeme für zwei verschiedene Arten von Aufgaben (Sequenz-Lernen oder motorische Adaptation) eingesetzt. Der Übergang im Lernprozess geschieht fließend innerhalb eines der beiden Systeme. Dennoch beziehen sich beide Modelle und, auf einer grundsätzlichen Ebene auch die Theorie von Keele et al., auf ähnliche neuronale Korrelate und Aktivitätsverschiebungen im Lernverlauf.

Ein weiteres Modell, welches keine aufgabentypabhängigen sondern lernverlaufsabhängigen Plastizitätsvorgänge in drei unterschiedlichen neuronalen Netzwerken postuliert, wurde 2012 von Chein und Schneider vorgestellt. Die Autoren nehmen die Existenz einer hierarchisch organisierten Lernarchitektur mit drei spezifischen Lernsystemen, die im Lernverlauf unterschiedlichen Plastizitätsvorgängen unterliegen, an (siehe Abb. 14).

Die Systeme greifen synergistisch ineinander und ermöglichen erst durch ihre kombinierte und kontinuierliche Interaktion die komplexen menschlichen Lernprozesse (Chein & Schneider, 2012, S.78–79). Das metakognitive System ist für die Ausbildung neuer Repräsentationen zu Beginn des Lernens und für die Vorbereitung, Initiierung und Überwachung bereits erlernter Handlungen verantwortlich. Es ist primär in der Aneignungsphase (acquisition) aktiv und wird neurophysiologisch frontalen Hirnregionen, unter anderem dem anterioren präfrontalen Kortex und den anterioren Anteilen des Temporallappens, sowie dem anterioren cingulären Kortex (anterior cingulate cortex = ACC) und dem Claustrum, zugeordnet. Des Weiteren fungiert das metakognitive System als Kontrollinstanz für das zweite Lernsystem, welches als kognitives Kontrollnetzwerk

bezeichnet wird. Diesem wird die Funktion der Aufmerksamkeitslenkung, sowie zielgerichteten Steuerung und Kontrolle bereits akquirierter Handlungsroutrinen zugeschrieben. Es ist für die Verarbeitung relativ komplexer Informationen zuständig, greift direkt auf die Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses zurück und wird dem Übergang von vorrangig kontrollierter, hin zu primär automatischer Verarbeitung zugeordnet. Das kognitive Kontrollnetzwerk ist im DLPFC, dem ACC, dem posterioren Parietalkortex und einigen subkortikalen Strukturen, unter anderem dem Thalamus und den Basalganglien lokalisiert.

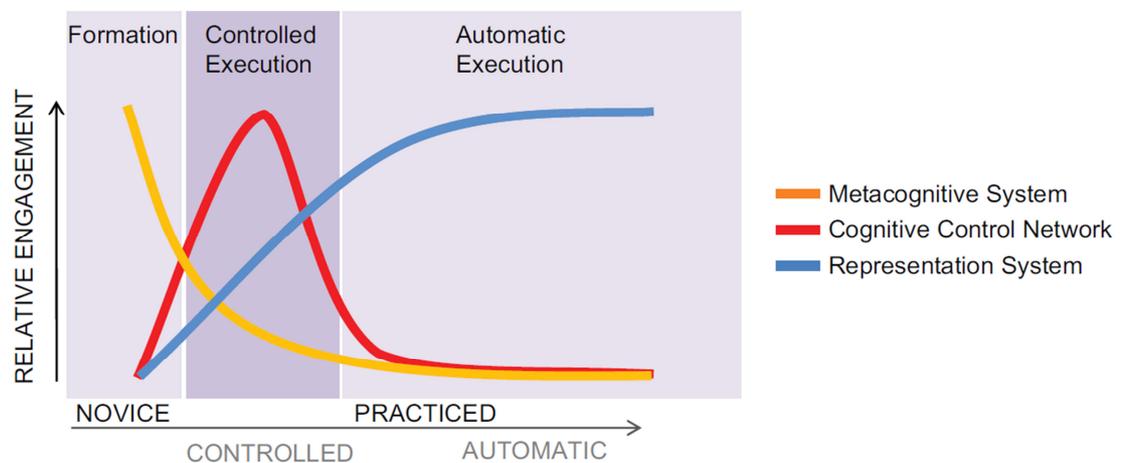


Abb. 14. Beteiligung der drei Lernsysteme (metakognitives System, kognitives Kontrollnetzwerk und Repräsentationssystem) im Lernverlauf (modifiziert nach Chein & Schneider, 2012, S. 79).

Das dritte Lernsystem, das Repräsentationssystem, speichert Erinnerungen und grundlegendes Wissen mit Hilfe einfacher Assoziationen langfristig ab. Dieses System lernt nur langsam, damit nur regelmäßig wiederkehrende Muster und keine Einzelfälle abgespeichert werden. Es bezieht vielzählige Kortextbereiche mit ein und wird beim Lernen durch den Hippocampus und die Basalganglien unterstützt. Die bedeutendste Eigenschaft dieses Systems liegt darin, dass es zur nicht-attentionalen Informationsverarbeitung fähig ist und somit eine automatische Verarbeitung ermöglicht (Chein & Schneider, 2012, S.79–83).

Wie in Abb. 14 dargestellt, spielt das metakognitive System zu Beginn des Lernprozesses die bedeutendste Rolle für die Durchführung einer neu zu erlernenden Handlung. Sobald die Handlung kontrolliert ausgeführt werden kann, wird das kognitive Kontrollnetzwerk handlungsleitend, um mit Hilfe attentionaler

Prozesse die Informationsverarbeitung zu steuern. Nach einer hinreichenden Assoziationsbildung übernimmt das Repräsentationssystem die Handlungskontrolle, welche dann automatisch ablaufen kann (Chein & Schneider, 2012, S.83).

Darüber hinaus existieren zahlreiche weitere Untersuchungen, die sich mit lernbedingten Verlagerungen der Hirnaktivität beschäftigt haben und sich aufgrund der methodischen Unterschiede und der detaillierten Ergebnisse nur schwer zusammenfassen lassen. Als gemeinsamer Tenor dieser Untersuchungen lässt sich jedoch resümieren, dass sich im Lernverlauf in der Regel eine Aktivitätsverschiebung von kortikalen hin zu subkortikalen Strukturen, sowie von präfrontalen hin zu motorischen Kortexarealen beobachten lässt. Die Ergebnisse einiger Untersuchungen (Debaere, Wenderoth, Sunaert, van Hecke & Swinnen, 2004; Doyon et al., 2009; Doyon et al., 2003; Doyon & Ungerleider, 2002; Hikosaka et al., 1999; Hikosaka et al., 2002; Keele et al., 2003; Lohse, Wadden, Boyd & Hodges, 2014) unterstützen die Annahme, dass in frühen und späten Lernphasen verschiedene kortikal-subkortikale Kreisläufe beteiligt sind. Zu Beginn des Lernprozesses, wenn die Informationsverarbeitung noch hauptsächlich aufmerksamkeitsabhängig vonstatten geht, sind vorrangig präfrontale Kortexregionen aktiv, wie bspw. der DLPFC, welche als wesentliche Lokalisation für Arbeitsgedächtnisvorgänge angesehen werden. Zum Ende des Lernverlaufes, wenn die Aufgaben nahezu automatisch und mit geringstem Aufmerksamkeitsbedarf ausgeführt werden können, liegt die Aktivierung hauptsächlich in motorischen Kortexbereichen, sowie dem Putamen bzw. Globus pallidus, die als Teil des Striatums zu den Basalganglien gehören (Beck, Blischke & Abler, 2012; Debaere et al., 2004; Doyon et al., 2009; Lindquist & Guadagnoli, 2008; Magill, 2014, S. 214; Poldrack et al., 2005; Puttemans, Wenderoth & Swinnen, 2005): „The observed activation changes account for the transition from highly attention-demanding task performance, involving processing of sensory information and corrective action planning, to automatic performance based on memory representations and forward control“ (Debaere et al., 2004, S. 855).

Ergänzend kann an dieser Stelle bereits vorweggenommen werden, dass Automatisierungsprozesse im direkten Zusammenhang mit domaninerg modulier-

ten Plastizitätsvorgängen im Bereich des Striatums, also den Basalganglien, zu stehen scheinen. Die phasische Aktivierung der Dopaminneuronen im Mittelhirn wird anscheinend durch einen Vorhersagefehler ausgelöst, so dass nur unerwartet erfolgreiche Bewegungsausführungen gelernt und automatisiert werden. Demnach wird davon ausgegangen, dass „dem dopaminerg reflektierten Vorhersagefehler im Rahmen der Automatisierung zielgerichteter Willkürbewegungen möglicherweise eine *Türöffnerfunktion* zukommt“ (Beck et al., 2012, S. 277). Detaillierter widmet sich das Kapitel 2.3.2 diesem Thema, da es im direkten Zusammenhang mit der Feedback-Valenz steht.

#### 2.2.2.9 Zusammenfassung und kritische Betrachtung

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die geläufigsten Automtizitätstheorien entsprechend ihrer historischen Entwicklung vorgestellt. Den aktuellen Auffassungen entsprechend wird Automatisierung als Verschiebung des Kontrollmodus im Lernverlauf von aufmerksamkeitsabhängigen hin zu weniger attentionalen Verarbeitungsmechanismen verstanden, welche mit einer Aktivitätsverlagerung in entsprechenden zentralnervösen Strukturen einhergeht (Blischke, 2000, S. 3; Müller & Blischke, 2009, S. 203).

Darüber hinaus existieren zahlreiche weitere Automtizitätstheorien, die ein ähnliches Grundverständnis von Automtizität haben, dieses jedoch etwas anders ausdifferenzieren und aus diesem Grund für den Zweck dieser Arbeit keinen entscheidenden Mehrwert haben und daher nicht vorgestellt wurden. Dazu gehört unter anderem das von Kahnemann (2011) vorgestellte Konzept, das bereits angesprochene SAS von Norman und Shallice (1986) oder das am Prinzip des „parallel distributed processing“ (PDP) orientierte, theoretische Modell von Cohen, McClelland & Dunbar (1990) (Cohen et al., 1990; Magill, 2014, S. 214; Müller & Krummenacher, 2003, S. 140).

Scharfe Kritik erhielten die gängigen Automtizitätstheorien besonders durch Odmar Neumann, dessen Einwände gegen die Ressourcenmodelle der Aufmerksamkeit bereits in Kapitel 2.2.1.5 dargestellt wurden. Auf den dort vorgestellten Kritikpunkten basiert auch sein Automtizitätsverständnis, welches er nicht mit reduziertem Kapazitäts-/Aufmerksamkeitsbedarf in Verbindung bringt,

sondern mit dem Niveau der notwendigen Kontrolle. Demnach sind bei geübten Personen Parameterspezifikationen für bestimmte Handlungen in Form von *skills* im Langzeitgedächtnis abgespeichert. Weitere Parameterspezifikationen ergeben sich aus den situativen Informationen des Handlungsumfeldes. Wenn alle Parameter hinreichend spezifiziert sind, läuft die Handlungskontrolle automatisch ab. Automtizität entwickelt sich nicht, Neumanns Auffassung entsprechend, in Folge eines Prozesses, sondern ist viel mehr etwas, das passiert, wenn die Bedingungen passend sind. Sind einige Parameter nicht spezifiziert, sind attentionale Mechanismen notwendig, die wiederum für Interferenzen verantwortlich gemacht werden können und zu einer bewussten Wahrnehmung führen können. Automatisierung ist demnach der Prozess der Aneignung der entsprechenden *skills* (Müller & Krummenacher, 2003, S. 141–142; Neumann, 1984, S. 282; Styles, 2008, S. 193–195). Müller und Krummenacher ziehen daraus den Schluss, dass „die meisten für ‚automatisch‘ gehaltenen Prozesse bestenfalls partiell automatisch sind und dass automatische Verarbeitung in einem engeren (komplexen) Zusammenhang zu bewusst-intentionalen Prozessen stehen als ursprünglich, im Rahmen von strengen Zwei-Prozess-Theorien, angenommen“ (Müller & Krummenacher, 2003, S. 142).

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit soll Automatisierung, wie zu Beginn dieses Kapitels definiert, jedoch als Verschiebung des Kontrollmodus‘ im Lernverlauf von aufmerksamkeitsabhängigen, hin zu weniger attentionalen Verarbeitungsmechanismen, verstanden werden, die mit einer Aktivitätsverlagerung in entsprechenden zentralnervösen Strukturen einhergeht. Automtizität wird dabei als Zustand verschiedener möglicher Automtizitätsgrade auf einem Kontinuum ohne klare Endpunkte angesehen, wohingegen die Automatisierung als Prozess der Verlagerung auf diesem Kontinuum, hin zum weniger attentional kontrollierten Ende, verstanden wird.

### 2.2.3 *Automtizität messen*

Um Automtizität zu messen, wird in der Regel die Dual-Task-Methodik eingesetzt. Dabei werden zwei Aufgaben gleichzeitig ausgeführt, um herauszufinden, wie hoch die Ressourcenanforderungen sind, die eine Bewegung an das Ar-

beitsgedächtnis stellt. Dabei wird die Aufgabe, deren Kapazitätsbedarf erhoben werden soll als Primäraufgabe (primary task) bezeichnet. Die zweite Aufgabe, die zusätzlich parallel ausgeführt werden soll, nennt sich Sekundäraufgabe (secondary task) (Abernethy, 1988, S. 102–103; Abernethy, 2001, S. 55; Abernethy et al., 2007, S. 248–249; Magill, 2014, S. 208; Ogden, Levine & Eisner, 1979, S. 529–536).

Eine schematische Darstellung dieses Prinzips ist in Abb. 15 zu sehen. Zum einfacheren Verständnis ist die Arbeitsgedächtniskapazität dabei in Form eines Containers dargestellt, obwohl für diese Arbeit, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, von einem modularen Aufbau des Arbeitsgedächtnisses ausgegangen wird.

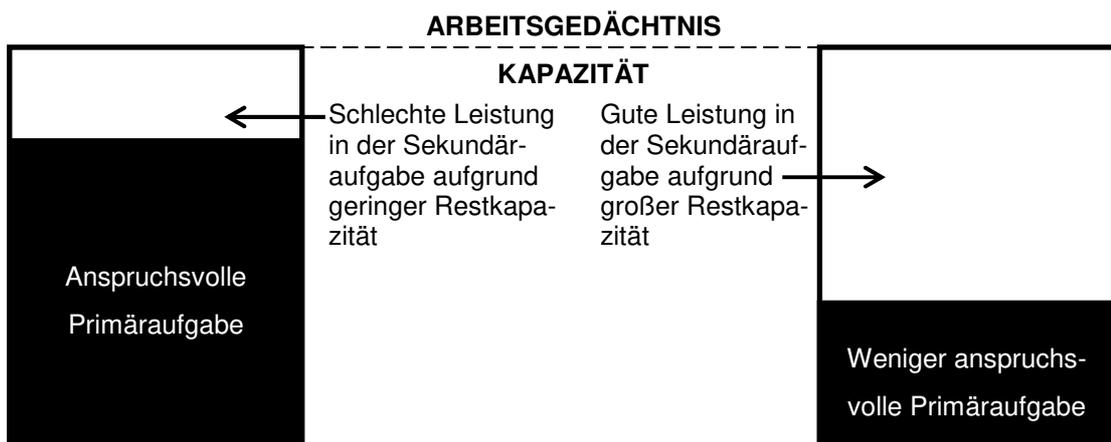


Abb. 15. Schematische Darstellung des grundlegenden Prinzips der Leistung in der Sekundäraufgabe als Indikator für die Aufmerksamkeitsanforderungen der Primäraufgabe (modifiziert nach Abernethy, 1988, S. 103).

Im linken Teil der Abbildung ist zu sehen, dass eine eher anspruchsvolle Primäraufgabe einen großen Teil der verfügbaren Arbeitsgedächtnisressourcen beansprucht. Somit ist nur noch wenig Kapazität übrig, um die Sekundäraufgabe auszuführen, die infolgedessen höchstwahrscheinlich mit reduzierter Leistung ausgeführt werden kann. Rechts in der Abbildung ist der Ressourcenbedarf durch eine weniger anspruchsvolle Primäraufgabe dargestellt. Diese beansprucht deutlich weniger Arbeitsgedächtniskapazitäten, so dass ein großer Teil der Ressourcen für die Bearbeitung der Sekundäraufgabe zurückbleibt.

In Abhängigkeit von der Priorisierung der Aufgaben gibt es verschiedene Varianten der Dual-Task-Methodik. Eine häufig verwendete Form ist das *Secondary-Task-Paradigm*. Dabei wird die Priorität auf die Primäraufgabe gelegt, damit die Leistung dieser, unter Einzel- und Doppeltätigkeit, stabil bleibt und somit die Leistung der Sekundäraufgabe herangezogen wird, um die Kapazitätsanforderungen der Primäraufgabe zu erheben. Im Sinne des *Secondary-Task-Paradigms* wird der Ressourcenbedarf einer Primäraufgabe also indirekt über die Restkapazität des Arbeitsgedächtnisses mit Hilfe der Sekundäraufgabe erfasst. Diese wird ermittelt, indem die Leistung der Sekundäraufgabe unter Doppeltätigkeit mit der Leistung unter Einzeltätigkeit verglichen wird. Das daraus resultierende Verhältnis nennt man Doppeltätigkeitskosten (DTK). Dabei ist es wichtig, dass die Priorität bei der gleichzeitigen Ausführung beider Aufgaben auf der Primäraufgabe liegt, damit diese unter Einzel- und Doppeltätigkeit auf einem vergleichbaren Leistungsniveau ausgeführt wird. Nur dann können die Doppeltätigkeitskosten, die als Maß für den Automatisierungsgrad herangezogen werden, vollständig auf Seiten der Sekundäraufgabe gemessen werden. Diese Priorisierung wird verwendet, wenn das Forschungsinteresse auf den Aufmerksamkeitsbedarf der Primäraufgabe gerichtet ist. (Abernethy, 1988, S. 102–116; Abernethy, 2001, S. 55; Abernethy et al., 2007, S. 248–249; Ogden et al., 1979, S. 529–536). Kommt es unter diesen Bedingungen zu einem Ausbleiben von Doppeltätigkeitskosten so wird dies interpretiert als: „the primary task is performed automatically, requiring none of the available processing capacity“ (Abernethy, 2001, S. 55).

Eine weitere Variante der Dual-Task-Methodik ist das *Dual-Task-Paradigm*, bei dem die Versuchspersonen instruiert werden beide Aufgaben unter Doppelaufgabenbedingungen gleichzeitig so gut wie möglich auszuführen. In diesem Fall ist damit zu rechnen, dass die Aufmerksamkeit zwischen beiden Aufgaben gewechselt wird (Abernethy, 1988, S. 102; Abernethy, 2001, S. 55). Daraus ergibt sich jedoch die Schwierigkeit, dass die Doppeltätigkeitskosten auf beide Aufgaben verteilt werden und diese miteinander verrechnet werden müssen. Diese Methode wird dann angewendet, wenn nicht der Kapazitätsbedarf der Primäraufgabe im Zentrum des Forschungsinteresses steht, sondern vielmehr die

Fähigkeit des Individuums die Aufmerksamkeit zwischen den Aufgaben schwenken zu lassen (Abernethy, 1988, S. 102–103; Abernethy, 2001, S. 55; Ogden et al., 1979, S. 529–530). Unklar bleibt bei der Berechnung der Doppeltätigkeitskosten, ob es durch das Wechseln des Aufmerksamkeitsfokus‘ von einer zur anderen Aufgabe zu zusätzlichem Ressourcenaufwand in Form von sogenannten „switch-costs“ kommt.

Für die konkrete Umsetzung der Dual-Task-Methodik müssen, neben der Wahl für das *Dual-Task-Paradigm* oder das *Secondary-Task-Paradigm*, einige spezifische methodische Entscheidungen getroffen werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Aufgabenauswahl zu. Als Primäraufgabe wird für gewöhnlich die Aufgabe verwendet, deren Automatisierungsgrad erhoben werden soll. Die Auswahl der Sekundäraufgabe geschieht in Abhängigkeit von der gewünschten Kontinuität und der notwendigen strukturellen Interferenz. Eine kontinuierliche Sekundäraufgabe beansprucht konstant Aufmerksamkeit und ist somit gut geeignet, um die globalen Kapazitätsanforderungen der Primäraufgabe abzubilden. Diskontinuierliche bzw. diskrete Aufgaben hingegen sind vorteilhaft, wenn die Aufmerksamkeitsschwankungen in bestimmten Phasen der Primäraufgabe identifiziert werden sollen und werden vor allem dann angewendet, wenn die präzise Terminierung bestimmter Ressourcenanforderungen ermittelt werden soll (Abernethy, 1988, S. 113; Abernethy, 2001, S. 56; Abernethy et al., 2007, S. 248–249). Darüber hinaus sollte entschieden werden, ob durch die Sekundäraufgabe eine strukturelle Interferenz provoziert oder verhindert werden soll. Die strukturelle Interferenz bezieht sich dabei auf die in den Kapiteln 2.2.1.3 und 2.2.1.4 vorgestellten modularen Aufmerksamkeitstheorien. Diese verstehen Aufmerksamkeit als untergliedert in verschiedene Verarbeitungssysteme mit eigenen Ressourcenpools. Demnach entstehen Doppeltätigkeitskosten nur, wenn zwei Aufgaben auf die gleichen Verarbeitungssysteme zurückgreifen und gemeinsam das spezifische Kapazitätslimit übersteigen. Um den Automatisierungsgrad einer Aufgabe mit Hilfe der Dual-Task-Methodik zu messen, ist demnach eine strukturell ähnliche Sekundäraufgabe notwendig, welche die gleichen Verarbeitungskapazitäten beansprucht wie die Primärauf-

gabe (Abernethy, 1988, S. 113–114; Abernethy, 2001, S. 56; Underwood & Everatt, 1996, S. 191).

Die konkrete Auswahl der Sekundäraufgabe hängt also von der spezifischen Struktur der Primäraufgabe ab. Für die meisten motorischen Primäraufgaben sind Sekundäraufgaben mit einer visuellen oder räumlichen Struktur eine günstige Wahl. Im Sinne des Arbeitsgedächtnismodells von Baddeley würden die Primär- und Sekundäraufgabe dann gleichsam auf die Kapazitäten des *visuospatial sketchpad*s zurückgreifen. Wie bereits dargestellt, lassen sich aber auch die Subkomponenten des Arbeitsgedächtnisses, das *visuospatial sketchpad* und der *phonological loop*, in weitere Repräsentationskomponenten dissoziieren. Die Wahl der Sekundäraufgabe ist demnach abhängig von der spezifischen Beanspruchung der Arbeitsgedächtnis-Anteile durch die Primäraufgabe. Auch im Sinne von Wickens sollte darauf geachtet werden, dass die motorische Primär- und die ausgewählte Sekundäraufgabe auf ähnliche Ressourcenpools zurückgreifen, indem sie zum Beispiel bezüglich der Verarbeitungscodes gleiche Ressourcen beanspruchen. In Bezug zum *parallel neural network model* würden Interferenzen mit einer räumlichen Sekundäraufgabe vor allem in frühen bis mittleren Lernphasen deutlich, da in diesem Fall Primär- und Sekundäraufgabe räumlich kodiert sind und in gleichen neuronalen Regelkreisen verarbeitet werden (Agethen & Krause, 2012, S. 9).

Ogden warnt jedoch vor dem Phänomen der „physischen Störung“. In diesem Fall würden Interferenzen zwischen zwei Aufgaben auftreten, weil sie die gleichen sensorischen und motorischen Systeme beanspruchen und nicht die gleichen Aufmerksamkeitsressourcen. Motorische Störungen würden bspw. dann auftreten, wenn derselbe Effektor, bspw. die rechte Hand bzw. der rechte Arm, für die Durchführung der Primäraufgabe, wie auch für die Eingabe der Sekundäraufgabe eingesetzt würde. Sensorische Störungen könnten auftreten, wenn sich bspw. die visuellen Informationen einer Primäraufgabe in einem Flugsimulator mit den visuellen Informationen einer Sekundäraufgabe überlagern würden (Ogden et al., 1979, S. 535–537).

Auch wenn eine geeignete Sekundäraufgabe ausgewählt wurde, kann es zu einer Reduktion von Doppeltätigkeitskosten kommen, ohne dass die Primäraufgabe automatisiert wurde. Als alternative Erklärung für die Reduktion von Doppeltätigkeitskosten wird, nach Manzey (1988, 1993), die integrative Aufgabebearbeitung angesehen. Dabei handelt es sich um ein geschicktes Wechseln des Aufmerksamkeitsfokus zwischen den beiden gleichzeitig auszuführenden Aufgaben (Agethen & Krause, 2012, S. 9–13; Blischke, 2000, S. 4–5; Blischke, Zehren, Utter & Brückner, 2011, S. 27–28; Hirst, Spelke, Reaves, Caharack & Neisser, 1980; Manzey, 1988; Manzey, 1993; Ruthruff, Selst, Johnston & Remington, 2006, S. 138; Spelke, Hirst & Neisser, 1976; Underwood & Everatt, 1996, S. 191). Zu einer integrierten Aufgabebearbeitung kann es kommen, wenn die beiden Tätigkeiten bereits in der Übungsphase unter Doppeltätigkeit ausgeführt werden, oder ein Doppeltätigkeitstest häufig wiederholt wird. Dadurch kann es zur Integration beider Aufgaben zu einer gemeinsamen Super-Aufgabe mit spezifischen Aufgabenwechselstrategien kommen. Die infolgedessen reduzierten Doppeltätigkeitskosten sind jedoch auf den spezifischen Kontext, also die exakte Aufgabenkombination, beschränkt und verschwinden, wenn eine der beiden Aufgaben in einem anderen Doppelaufgabenkontext angewendet wird. Aus diesem Grund sollte bei der Anwendung der Dual-Task-Methodik darauf geachtet werden, dass Doppeltätigkeitstests nur so häufig wie nötig durchgeführt und möglichst durch Kontrollgruppen oder einen Transfer-test, in dem die Primäraufgabe mit einer anderen Sekundäraufgabe kombiniert wird, kontrolliert werden (Agethen & Krause, 2012, S. 9–13; Blischke, 2000, S. 4–5; Blischke, Zehren, Utter & Brückner, 2011, S. 27–28; Manzey, 1988; Manzey, 1993).

### **2.3 Motorisches Lernen durch Feedback**

Unabhängig davon welche Bewegung erlernt werden soll, laufen fremdinformationsgestützte motorische Lernprozesse, bezogen auf die informationellen und zeitlichen Aspekte, nach einem bestimmten Muster ab, welches in Abb. 16 schematisch dargestellt ist (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 191–192).

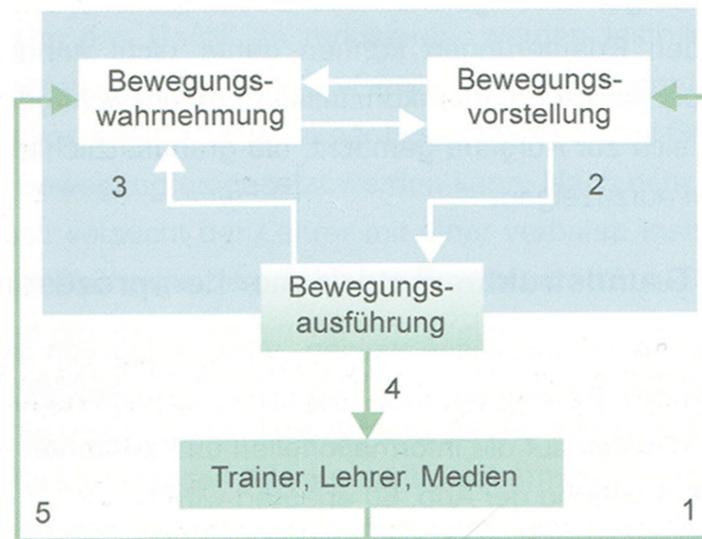


Abb. 16. Grundstruktur motorischer Lernprozesse (aus Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 192).

Als Voraussetzung für eine Bewegungsausführung muss der Lernende zunächst eine Vorstellung von der auszuführenden Bewegung haben. Diese Bewegungsvorstellung kann durch Fremdinformationen (Pfeil 1) veranlasst und gefördert werden. Davon ausgehend wird die anschließende Bewegungsausführung (Pfeil 2) vollzogen, deren Wahrnehmung (Pfeil 3) integrativ mit vorhandenen Gedächtnisinhalten zur Bewegungswahrnehmung verarbeitet wird. Die Wahrnehmung der Ausführung durch einen Beobachter (Pfeil 4) kann mit Hilfe von Fremdinformationen die eigene Bewegungswahrnehmung (Pfeil 5) oder die Bewegungsvorstellung beeinflussen (Pfeil 1). Der Beobachter kann bspw. ein Lehrer oder Trainer sein. Es ist aber auch möglich, dass Medien diese Rolle der Erstellung von Fremdinformationen übernehmen (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 191–194). Die Fremdinformationen können entweder vergangenheitsorientiert als (augmented) Feedback oder zukunftsorientiert als Instruktion vermittelt werden (Magill, 2014, S. 344; Marschall & Daus, S. 281–282; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 194–195). Einer der bedeutendsten Einflussfaktoren des motorischen Lernens ist das Feedback, wie Schmidt und Wrisberg betonen: „One of the most important ways practitioners can influence the learning process is by providing people with feedback about their actions” (Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 276). Dabei wird zwischen ergebnisorientiertem (knowledge of results = KR) und verlaufsorientiertem Feedback (know-

ledge of performance = KP) unterschieden. Die ergebnisorientierten Rückmeldungen (KR) enthalten Informationen über das (Teil-)Ergebnis einer Bewegungsausführung, wie zum Beispiel die Wurfweite beim Speerwurf. Die verlaufsorientierte Rückmeldung (KP) gibt Auskunft über Charakteristika des Bewegungsverlaufes, die zu dem entsprechenden Bewegungsergebnis geführt haben (Magill, 2014, S. 345–346; Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 195). Darüber hinaus werden quantitatives und qualitatives Feedback unterschieden. Unter quantitativem Feedback wird eine Rückmeldung über das genaue Ergebnis bzw. die Höhe des Fehlers verstanden. Vermittelt die Rückmeldung hingegen Informationen über die Richtigkeit des Bewegungsergebnisses, so wird von qualitativem Feedback gesprochen (Lee & Carnahan, 1990, S. 779). Nach einer Rückmeldung kommt es beim Lernenden, durch die integrative Verarbeitung der Feedbackinformationen mit den Eigeninformationen, zu einer Einschätzung des aktuellen Ist-Zustandes. Dieser wird mit dem gewünschten Soll-Zustand in Beziehung gesetzt und ergibt somit die aktuelle Fehlerhöhe, die der Lernende in den anschließenden Bewegungsausführungen zu reduzieren versucht. Feedback hat somit eine fehlerreduzierende Funktion, indem Informationen über die vergangene Bewegungsausführung rückgemeldet und anschließend verarbeitet werden (Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 276). Ein Großteil der Feedbackforschung hat sich bisher diesem informationellen Ansatz gewidmet. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass Feedback das motorische Lernen nicht nur auf informationeller, sondern auch auf motivationaler Ebene beeinflussen kann und dieser Faktor in der Forschungslandschaft ebenfalls berücksichtigt werden sollte (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 738–739; Magill, 2014, S. 347; Thorndike, 1927; Wulf, Chiviacowsky & Lewthwaite, 2010a, S. 425; Wulf et al., 2010b, S. 75). Dies ist bisher jedoch kaum geschehen, da bis vor Kurzem davon ausgegangen wurde, dass die Motivation den Lernprozess nur indirekt beeinflussen kann (Schmidt & Lee, 2011, S. 425–426): „motor learning researchers have somewhat neglected the motivational aspects of feedback, perhaps because motivation is often assumed to exert only temporary effects on performance or to have, at best, indirect effects on learning through increased practice” (Wulf et al., 2010a, S. 425). Durch Untersuchungen

der Arbeitsgruppe von Wulf wurde jedoch deutlich, dass sich das motorische Lernen auch direkt durch verschiedene motivationale und affektive Faktoren beeinflussen lässt (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 738–739; Wulf et al., 2010a, S. 425). Wulf, Shea und Lewthwaite fordern in einem Überblicksartikel deshalb: „Feedback should not merely be viewed as ‘neutral’ information that is processed – without any affective connotation – with the goal of minimising errors. Rather, the valence of feedback appears to have an influence on motivational processes that, in turn, affect learning” (Wulf et al., 2010b, S. 80). In diesen Kontext von Motivation, Emotion und Affekt lässt sich also auch die Feedback-Valenz einordnen, die häufig mit Hilfe eines qualitativen Feedbacks operationalisiert wird. Die Valenz wird in der Psychologie als Wertigkeit oder auch Gewichtigkeit mit den Ausprägungsformen positiv bzw. negativ definiert (Könneker, 2017; Wirtz, 2017). Da der Begriff Valenz oder auch Feedback-Valenz in der sportwissenschaftlichen Literatur bisher aber nur selten verwendet wurde, ist es zunächst notwendig, sich dem Begriff auf einer theoretischen Ebene anzunähern. Zu diesem Zweck dient das nächste Kapitel (2.3.1), in dem die entsprechenden psychologischen Konstrukte differenziert vorgestellt werden und in Zusammenhang mit Anknüpfungspunkten aus der Motorikforschung gebracht werden. Darauf aufbauend werden in Kapitel 2.3.2 die entsprechenden neuronalen Korrelate und empirischen Befunde vorgestellt, die den direkten Einfluss der Feedback-Valenz auf das motorische Lernen aufzeigen (Kapitel 2.3.3).

### *2.3.1 Feedback-Valenz*

Wie bereits angedeutet, existieren in der sportwissenschaftlichen Literatur kaum Untersuchungen, geschweige denn Modelle zum direkten Einfluss der Feedback-Valenz auf das motorische Lernen. Aus diesem Grund sind, im Vergleich zu den bereits beschriebenen Modellen der Aufmerksamkeit oder Automatisität, nur wenige theoretische Konstrukte in diesem Forschungsfeld zu finden, die sich namentlich mit Valenz beschäftigen. Wie bereits erwähnt, stammt der Begriff Valenz aus der Psychologie und wird in diesem Fachbereich im Kontext von Motivation und Affekt verwendet.

Der Grundlagenliteratur entsprechend beschreibt Motivation das menschliche Streben nach einem Ziel und entsteht durch eine „Interaktion von situativen Anreizen und dispositionellen Eigenschaften“ (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 3–43). Die dispositionellen Eigenschaften sind stabile, in der Persönlichkeit des Individuums verankerte Eigenschaften, die interindividuelle Verhaltensunterschiede erklären können. Zu diesen personenbezogenen Eigenschaften zählen zum einen universelle menschliche Bedürfnisse, wie bspw. Hunger, Durst oder auch das Streben nach Wirksamkeit. Zum anderen gehören explizite Motive, also bewusste und verbalisierbare Ziele, sowie implizite Motive, die als emotional getönte Präferenzen zu verstehen sind, zu den dispositionellen Eigenschaften. Die situationsbedingten Einflussfaktoren werden als Anreiz oder Anforderungscharakter bezeichnet und umfassen alles Positive oder Negative, das eine Situation einem Individuum verheißt oder andeutet. Es geht also um die Erwartungen, die eine Person an die Handlungsausführung, das Ergebnis und dessen Folgen stellt (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 3–6). Motivation ist also immer zukunftsorientiert (Eder & Brosch, 2017, S. 188).

Im Kontext der Motivationspsychologie wurde der Begriff Valenz vor allem durch Lewin und seine Theorie der resultierenden Valenz geprägt, die er 1944 mit seinen Kollegen Dembo, Festinger und Sears entwickelt hat. Die Theorie der resultierenden Valenz ist, wie auch die meisten anderen Motivationstheorien, den Erwartungs-Wert-Theorien zuzuordnen. Sie bietet Erklärungen dafür, warum eine bestimmte Aufgabe aus einem Pool mehrerer möglicher Aufgaben zur Ausführung ausgewählt wird. Dabei spielen sowohl der situative Anreiz, als auch die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung eine Rolle (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 127). Die Theorie der resultierenden Valenz von Lewin et al. basiert dabei auf Untersuchungen von Hoppe (1930) zum Anspruchsniveau. Das daraus entstandene Konzept widmet sich vor allem interindividuellen Unterschieden, beschreibt aber auch, wann ein erzieltes Ergebnis als Erfolg oder Misserfolg wahrgenommen wird und bietet somit einen konkreten Ansatzpunkt für das Verständnis von Valenz bzw. Feedback-Valenz: Ob ein Ergebnis als Erfolg oder Misserfolg bewertet wird, hängt laut Hoppe vorrangig vom zuvor selbst gestellten Anspruchsniveau ab. Wird dieses mit der anschließenden

Handlungsausführung übertroffen, wird der Versuch als Erfolg bewertet. Bleibt die Leistung hinter dem Anspruchsniveau zurück, wird die Leistung als Misserfolg eingeschätzt. Für die eigentliche Leistungsbewertung ist also die sogenannte Zielerreichungsdiskrepanz relevant, welche die positive oder negative Differenz zwischen Anspruchsniveau und der erreichten Leistung darstellt. (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 130). Eine positive Bewertung der Zielerreichungsdiskrepanz ist also ein Erfolg und hat folglich eine positive Valenz. Hingegen wird eine negative Bewertung der Zielerreichungsdiskrepanz als Misserfolg interpretiert und hat somit eine negative Valenz.

Im Anschluss an die Leistungsbewertung kommt es zu einer Anpassung des Anspruchsniveaus für die nächste Handlungsausführung, welche stark von der Intensität des erlebten Erfolgs bzw. Misserfolgs abhängt. Es gibt also nicht nur die Gegensätze Erfolg oder Misserfolg, sondern diese sind in ihrer Stärke differenziert zu betrachten (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 130). In diesem Sinne ist also auch die Valenz nicht als dichotom mit den zwei Ausprägungsformen positiv und negativ zu verstehen, sondern eher als bipolares Kontinuum mit unterschiedlichen Valenzstärken. Entsprechend der zuvor dargestellten Theorie müsste diese Valenzstärke dann von der Höhe der Zielerreichungsdiskrepanz und deren subjektiver Bewertung abhängen.

Dabei muss stets bedacht werden, dass das Anspruchsniveau ein individuelles und kein objektives bzw. externes Leistungsziel ist. Somit basiert auch die resultierende Zielerreichungsdiskrepanz und infolgedessen auch die anschließende Leistungsbewertung auf diesem zuvor selbst festgelegten Leistungsziel (Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 130). Dennoch ist es möglich die subjektive Valenzeinschätzung durch externe Faktoren zu beeinflussen. Dies ist bspw. durch Feedback möglich, da es in Form von KR das eigentliche Handlungsergebnis darstellt und somit die Kalkulation der Zielerreichungsdiskrepanz überhaupt erst möglich macht. Wird dem Feedback zusätzlich eine Valenz gegeben, lässt sich darüber hinaus auch die subjektive Leistungseinschätzung beeinflussen, die wiederum einen Einfluss auf die Anpassung des Anspruchsniveaus für den nächsten Handlungsversuch hat.

Über diesen rein motivationspsychologischen Ansatz hinaus hat der Begriff Valenz auch im Bereich der Emotionspsychologie eine große Bedeutung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Emotion und Motivation voneinander abzugrenzen sind. Wie bereits erwähnt, ist die Motivation zukunftsorientiert. Die Emotion hingegen kann sowohl zukunfts- als auch vergangenheitsorientiert sein (Eder & Brosch, 2017, S. 188). „Die Trennlinie zwischen Emotion und Motivation verwischt jedoch zunehmend, wenn Emotionen Ereignisse als Bezugsobjekt haben, die eintreten könnten (z. B. Furcht vor einem möglichen Misserfolg). In diesem Fall dienen Emotionen auch als Motivatoren“ (Eder & Brosch, 2017, S. 188). Somit können Emotionen nicht auf motivationale Zustände reduziert werden. Eder und Brosch definieren Emotion folgendermaßen: „Eine Emotion ist eine auf ein bestimmtes Objekt ausgerichtete affektive Reaktion, die mit zeitlich befristeten Veränderungen des Erlebens und Verhaltens einhergeht“ (Eder & Brosch, 2017, S. 188). Durch die Ergänzung des Begriffes Affekt wird deutlich, dass es sich um Gefühle bzw. Empfindungen handelt, die im Konzept der Motivation nicht unbedingt vorhanden sein müssen. Eine Gemeinsamkeit ist jedoch der Begriff Valenz, der sowohl im Motivationskontext (wie zuvor beschrieben), als auch im Zusammenhang mit Affektivität eine sehr ähnliche Bedeutung hat. Im Zuge ihrer Definition von Affektivität (Gefühlscharakter) schreiben Eder und Brosch: „Charakteristisch für die Phänomenologie von emotionalen Erlebnissen ist ihre Valenz, d. h., ihre Angenehmheit oder Unangenehmheit“ (Eder & Brosch, 2017, S. 188). Dimensionale Emotionsmodelle greifen die Valenz als Dimension emotionaler Zustände auf. Sie gehen davon aus, dass sich emotionales Erleben aus Partialgefühlen zusammensetzt, die je nach Kombination in bestimmten Emotionen, wie bspw. Traurigkeit, Überraschung, Freude, etc., resultieren. Eine positive Valenz steht in diesem Zusammenhang mit angenehmen Gefühlen in Verbindung, während eine negative Valenz mit unangenehmen Gefühlen verbunden wird. In diesen Konzepten wird Valenz aber als bipolares Kontinuum angesehen, in dem auch eine neutrale Valenz ohne Wertigkeit möglich ist (Eder & Brosch, 2017, S. 193–194).

Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass Emotionen oft eine verhaltensmotivierende Funktion haben, da sie sowohl die situativen Anreize, als auch die dispo-

sitionellen Eigenschaften beeinflussen können. Menschen suchen häufig Situationen auf, die positive Emotionen auslösen. Hingegen werden Situationen, die eher negative Emotionen auslösen, häufig gemieden (Eder & Brosch, 2017, S. 197–199). Die Wahrnehmung von unterschiedlich starken positiven und negativen Valenzen kann also Emotionen auslösen, die bestimmte Verhaltensweisen zur Folge haben können, wie bspw. das Vermeiden oder Aufsuchen bestimmter Situationen.

Zusammenfassend lässt sich für diese Arbeit also folgende Definition von Feedback-Valenz aufstellen: Die Feedback-Valenz ist die Wertigkeit des Feedbacks mit den verschiedenen Stärken der Ausprägungsformen positiv oder negativ, die sowohl die subjektive Leistungsbewertung und infolgedessen die Anspruchsniveausetzung, als auch das emotionale Empfinden und entsprechend bestimmte Verhaltensweisen, beeinflussen kann.

In der Sport- bzw. Trainingspraxis ist die Feedback-Valenz allgegenwärtig. In Form von verbalem Lob oder Kritik, wie bspw. „Gut gemacht!“ oder „Das war nichts!“, geben Trainer und Therapeuten sehr häufig Bewertungen bezüglich der Leistung ihrer Schützlinge ab und versuchen damit deren Entwicklung zu beeinflussen. Darüber hinaus werden durch nonverbale Signale, wie bspw. ein Lächeln oder ein wütendes Gestikulieren, weniger Informationen, die konkret zur Fehlerreduktion genutzt werden können, vermittelt, sondern vorrangig Valenzen. Hinzu kommen Leistungsbewertungen durch Mitspieler oder Zuschauer. Valenz-Rückmeldungen sind in Trainings- und Wettkampfsituationen also omnipräsent (Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 284). Trainer versuchen Lob und Kritik, in Form eines qualitativen Feedbacks in der Regel gezielt einzusetzen, um ein korrektes Verhalten positiv zu verstärken, oder weniger wünschenswerte Bewegungshandlungen durch kritische Hinweise zu korrigieren. Lob wird dabei vorrangig verwendet, um den Übenden darin zu bestärken, dass die erfolgte Bewegungsausführung richtig war und auch in weiteren Versuchen ähnlich ausgeführt werden sollte. Der Trainer versucht somit das Leistungsniveau des Athleten zu steigern, indem er signalisiert, dass keine weiteren Korrekturen notwendig sind. Im Gegensatz dazu wird Kritik eher dann verwendet, wenn die Bewegungsausführung noch fehlerhaft ist und weiter modifiziert werden sollte.

Auch wenn Trainer Kritik „gut gemeint“ einsetzen, um die Leistung langfristig einem Sollwert anzunähern, wird diese vor allem Bewegungskorrekturen und weniger eine Leistungsstabilität bewirken. Für die Leistungssteigerung scheint daher, auf der Ebene dieser ganz naiven Überlegungen, eine positive Feedback-Valenz gegenüber einer negativen Feedback-Valenz überlegen zu sein. Aber auch für Automatisierungsprozesse, die mit einer Verlagerung hin zu einer eher aufmerksamkeitsunabhängigen Bewegungskontrolle einhergehen, müsste Kritik, welche eher eine bewusste Auseinandersetzung mit den gemachten Fehlern und deren Korrektur bewirken müssten, Nachteile bieten. Lob könnte hingegen eine korrekte Bewegungsausführung belohnen und unterstützen, so dass die erfolgreiche Handlung wiederholt wird, ohne attentionale Ressourcen für das Überdenken der konkreten Ausführung zu investieren.

Aus diesem Grund sollte der Einfluss der Feedback-Valenz auf das motorische Lernen und dabei speziell auf die beiden Teilaspekte der Leistungssteigerung und der Automatisierung motorischer Fertigkeiten erforscht werden, um konkrete Trainingsempfehlungen geben zu können.

Im weiteren Umfeld des (motorischen) Lernens wurde die Feedback-Valenz zumindest teilweise, jedoch mit verschiedenen Bezeichnungen, aufgegriffen. Am bekanntesten sind in diesem Kontext neben dem Begriff Valenz die Bezeichnungen „Reinforcement learning“ oder „reward-related learning“. Unter diesen Begriffen wird die Verstärkung eines Verhaltens durch eine Belohnung oder Bestrafung verstanden (Luft, Caroline Di Bernardi, 2014, S. 358; Schmidt & Wrisberg, 2004, S. 283–284). Erste Ansätze finden sich im Kontext des Konditionierens. Im Rahmen der behavioristischen Lerntheorien wurden verschiedene Formen der Feedback-Valenz bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts umfangreich untersucht und später in die sogenannten „stimulus-response“-Theorien (SR-Theorien) integriert (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 161–167). Dabei wird ein erwünschtes Verhalten gezielt durch Belohnung oder Bestrafung verstärkt. Wird auf die Präsentation eines Stimulus (S) mit einem passenden Verhalten reagiert (Reaktion = R), bewirkt dies einen entsprechenden Effekt (E). Im Falle des Belohnungstrainings wird ein gewünschtes Verhalten mit einem angenehmen Effekt positiv verstärkt, indem bspw. in Tierexperi-

menten Futter angeboten wird. Beim Fluchttraining wird das gewünschte Verhalten gezielt gefördert, indem ein unangenehmer Effekt entfernt wird. Im Bestrafungstraining wird versucht ein Verhalten zu unterdrücken, indem entweder eine Belohnung entfällt oder eine Bestrafung hinzugefügt wird (Olivier, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 161–166). Bei den verschiedenen Experimenten zeigte sich, dass durch die Verstärkung gelungener Versuche Lernfortschritte erreicht werden können, da die Assoziationen zwischen Stimulus, Reaktion und Effekt zunehmend gefestigt werden (Müller & Blischke, 2009, S. 190–191). Aufbauend auf diesen grundlegenden Erkenntnissen untersuchten Schultz und Kollegen die zu Grunde liegenden neurophysiologischen Prozesse und fanden dabei heraus, dass die Effekte positiver und negativer Valenzen auf unterschiedliche Mechanismen zurückzuführen sind (Schultz, Apicella & Ljungberg, 1993; Schultz, Dayan & Montague, 1997; Schultz, 2002). Diese und darauf aufbauende neurophysiologische Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel vorgestellt, um die anzunehmende Wirkungsweise der Feedback-Valenz besser verstehen zu können.

### 2.3.2 *Neurophysiologische Erkenntnisse zur Feedback-Valenz*

Auf neurophysiologischer Ebene lassen sich einige Untersuchungen finden, die den direkten Einfluss von Valenzen bzw. Feedback-Valenzen auf das motorische Lernen thematisieren. Eine besondere Bedeutung scheint dabei dem Einfluss der Dopamin-Neuronen im Mittelhirn zuzukommen, welche kurze phasische Aktivierungen im Zusammenhang mit Belohnungen zeigen (Reynolds, Hyland & Wickens, 2001, S. 68). Zu ersten Erkenntnissen auf diesem Gebiet gelangten Schultz, Apicella und Ljungberg 1993 durch ein Tier-Experiment mit Affen. Diese lernten eine einfache Reaktions-Aufgabe auszuführen: Wenn sie auf ein Signal (stimulus) hin den linken von zwei Hebeln (response) betätigten, erhielten sie dafür eine Belohnung in Form von Apfelsaft (reward). Anfänglich agierten die Affen unsystematisch und betätigten den richtigen Hebel eher aus Zufall. Infolgedessen zeigten die Dopamin-Neuronen eine starke Reaktion zum Zeitpunkt der Belohnung. Nachdem die Affen die Aufgabe durchschaut und sich die Systematik angeeignet hatten, wählten sie sehr häufig den richtigen Hebel.

Infolgedessen blieben jedoch die Dopamin-Ausschüttungen zum Belohnungszeitpunkt aus (Colombo, 2014, S. 59; Glimcher, 2011, S. 15650; Schultz, Apicella & Ljungberg, 1993, S. 901–908; Schultz, Dayan & Montague, 1997, S. 1594). In weiteren Untersuchungen wurde herausgefunden, dass diese Ergebnisse als neuronale Kodierung des sogenannten *reward prediction error* (RPE) angesehen werden können. Dieses Phänomen, welches wörtlich als Belohnungs-Vorhersage-Fehler übersetzt werden kann, wurde erstmals 1951 von Bush und Mosteller vorgestellt. Der RPE beschreibt dabei die Diskrepanz zwischen einer erwarteten und der realen Belohnung. Kommt es also zu einem positiven RPE, einer unerwarteten Belohnung, reagieren die Dopamin-Neuronen des Mittelhirns mit phasischen Aktionspotentialen, wie es zu Beginn des Experimentes von Schultz et al. zu beobachten war. Da im Lernverlauf das Handlungsergebnis für die Affen vorhersehbar wurde, nahm der RPE und infolgedessen auch die zeitlich an die Belohnung gekoppelte Dopamin-Ausschüttung ab. Diese verschob sich hingegen zum Zeitpunkt der Stimulus-Präsentation. Ein negativer RPE, also das Ausbleiben einer eigentlich erwarteten Belohnung, führte hingegen zu einem Abfall des Dopamin-Spiegels unter das tonische Ausgangsniveau zum Zeitpunkt der erwarteten Belohnung (Colombo, 2014, S. 59–61; Glimcher, 2011, S. 15650; Schultz, 2002, S. 242–243; Schultz et al., 1997, S. 1594). Schultz, Dayan und Montague fassen in ihrem Artikel von 1997 zusammen:

Dopamine neurons are therefore excellent feature detectors of the ‘goodness’ of environmental events relative to learned predictions about those events. They emit a positive signal (increased spike production) if an appetitive event is better than predicted, no signal (no change in spike production) if an appetitive event occurs as predicted, and a negative signal (decreased spike production) if an appetitive event is worse than predicted. (Schultz et al., 1997, S. 1594)

Für das motorische Lernen haben der RPE und damit verbundene Schwankungen des Dopamin-Spiegels im Mittelhirn nach Glimcher folgende Bedeutung: „If any movement is followed by a positive prediction error, then the entire topographic map is transiently bathed in the global prediction error signal carried by dopamine into this area“ (Glimcher, 2011, S. 15653). In Folge eines positiven RPE kommt es sozusagen zu einer „Dopamin-Dusche“ im Bereich der Basalganglien, die kortikostriatale Plastizitätsprozesse fördern und somit die

Synapsen der an der Bewegungssteuerung beteiligten Neuronen permanent stärken. Infolgedessen werden die erfolgreich ausgeführten Bewegungsmuster abgespeichert bzw. gelernt. Bei der Gestaltung motorischer Lernprozesse müssen also Rahmenbedingungen geschaffen werden, die positive RPEs zulassen bzw. hervorrufen, da ohne eine gewisse Ergebnisunsicherheit kein Lernen möglich ist (Glimcher, 2011, S. 15649–15653; Heckhausen & Heckhausen, 2010, S. 265–266; Reynolds & Wickens, 2002, S. 517–518; Schultz, 2002, S. 244–245). Den starken Einfluss der durch positive RPEs ausgelösten Dopamin-Ausschüttungen stellen Reynolds und Kollegen, im Vergleich zu dem Effekt anderer Stimuli, heraus: „However, bursts induced by other types of stimuli are of a lower intraburst frequency, release less striatal dopamine and do not induce a net change in synaptic efficacy” (Reynolds & Wickens, 2002, S. 517–518). Diese hohe Bedeutung des RPE für das motorische Lernen zeigen auch andere Autoren wie bspw. Izawa und Shadmehr (2011). Sie nehmen an, dass beim motorischen Lernen hauptsächlich das Ziel verfolgt wird, Bewegungshandlungen auszuführen, die möglichst große Belohnungen bewirken (Seidler, Kwak, Fling & Bernard, 2013, S. 35). Zahlreiche weitere Untersuchungen liefern zusätzliche Belege dafür, dass die phasischen Entladungen der basalen Dopamin-Neuronen als neurophysiologisches Korrelat des RPE-Signals angesehen werden können und kortikostriatale Plastizitätsvorgänge bewirken (Bayer & Glimcher, 2005; Graybiel, 1995; Lega, Kahana, Jaggi, Baltuch & Zaghoul, 2011; Reynolds et al., 2001; Reynolds & Wickens, 2002; Schultz, 2002; Thut et al., 1997; Zaghoul et al., 2009).

Bezogen auf die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Theorien zeigen sich einige Parallelen: Der von Hoppe verwandte Begriff Anspruchsniveau beschreibt die Erwartung an die Höhe der eigenen Leistung bei der nächsten Aufgabenausführung. Die Differenz zwischen dem Anspruchsniveau und der tatsächlich erzielten Leistung wird als Zielerreichungsdiskrepanz bezeichnet. Diese wird anschließend bezüglich ihrer Richtung und ihrer Stärke bewertet, so dass sich eine unterschiedlich stark ausgeprägte positive oder negative Valenz ergibt. Diese subjektive Leistungsbewertung beeinflusst eine Anpassung des Anspruchsniveaus für den nächsten Ausführungsversuch. Im Kontext des RPE

entspricht das Anspruchsniveau also der erwarteten Belohnung. Wird die Zielerreichungsdiskrepanz positiv bewertet (positive Valenz), also das zuvor gesetzte Anspruchsniveau übertroffen, so handelt es sich um einen positiven RPE. Wird das Anspruchsniveau unterschritten (negative Valenz), ist die resultierende negative Zielerreichungsdiskrepanz mit einem negativen RPE gleichzusetzen. Wird die Zielerreichungsdiskrepanz durch das Feedback vermittelt bzw. durch die Feedback-Valenz bereits mit einer Wertigkeit versehen, so kann angenommen werden, dass auch die Feedback-Valenz über einen positiven bzw. negativen RPE die Dopamin-Aktivierung im Mittelhirn bewirken und infolgedessen eine Langzeit-Potenzierung entsprechender Synapsen, und somit das Erlernen erfolgreicher Bewegungsmuster, verursachen kann.

Diese Annahme wird durch mehrere Studien untermauert. Unter anderem konnten zwei Experimente von Lega et al., sowie von Zaghoul und Kollegen den postulierten Einfluss der Feedback-Valenz auf die Aktivität der Dopamin-Neuronen des ventralen Striatums bzw. der Substantia nigra bei menschlichen Individuen in vivo nachweisen (Lega et al., 2011; Zaghoul et al., 2009).

Eine Zusammenfassung der Studien, die sich bis 1995 mit dem Einfluss von Valenz, Feedback-Valenz bzw. Belohnungen auf das Lernen beschäftigt haben, bietet Graybiel in einem Review zur Funktion der Basalganglien für das Lernen und das Gedächtnis. Als zentrales Ergebnis werden zwei kortikobasale Regelkreise identifiziert und beschrieben, die für Lern- und Kontrollprozesse verantwortlich und in Abb. 17 dargestellt sind (Graybiel, 1995, S. 733–735).

Im linken Teil der Abbildung (Grafik a) ist der Regelkreis zu sehen, der laut Graybiel beim Neulernen aktiv ist. Dieser kann als Erweiterung des von Doyon et al. für Sequenz-Lernprozesse verantwortlich gemachten kortikostriatalen Systems, welches in Kapitel 2.2.2.8 vorgestellt wurde, angesehen werden, indem es den Einfluss von Belohnungen (reward) und die Ausführungsinitiierung ergänzt. Dementsprechend werden zunächst kognitive Informationen, wie bspw. Intentionen und bereits abgespeicherte Handlungsrepräsentationen, im präfrontalen und prämotorischen Kortex verarbeitet, welche an das Striatum und speziell den Nucleus caudatus weitergeleitet werden. Dort werden die In-

formationen integrativ mit den Bewertungs- und Belohnungsinformationen aus dem limbischen System und der Substantia nigra (SNc) verarbeitet. Darauf aufbauend werden mögliche Handlungskomponenten ausgewählt, deren Ausführung durch pallidonigral-subthalamische Kreisläufe (GPe, GPi, SNr, STN) an die Großhirnrinde sowie handlungsgestaltende Bereiche im Hirnstamm und dem Rückenmark vermittelt werden. Die Bedeutung von Valenzen spiegelt sich dabei im Zusammenhang mit der bewertenden und belohnungsverarbeitenden Funktion der Substantia nigra und des Striatums wider, die, wie auch im Kontext des RPE und des Modells von Doyon et al., kortikostriatale Plastizitätsvorgänge anregen (Graybiel, 1995, S. 733–735).

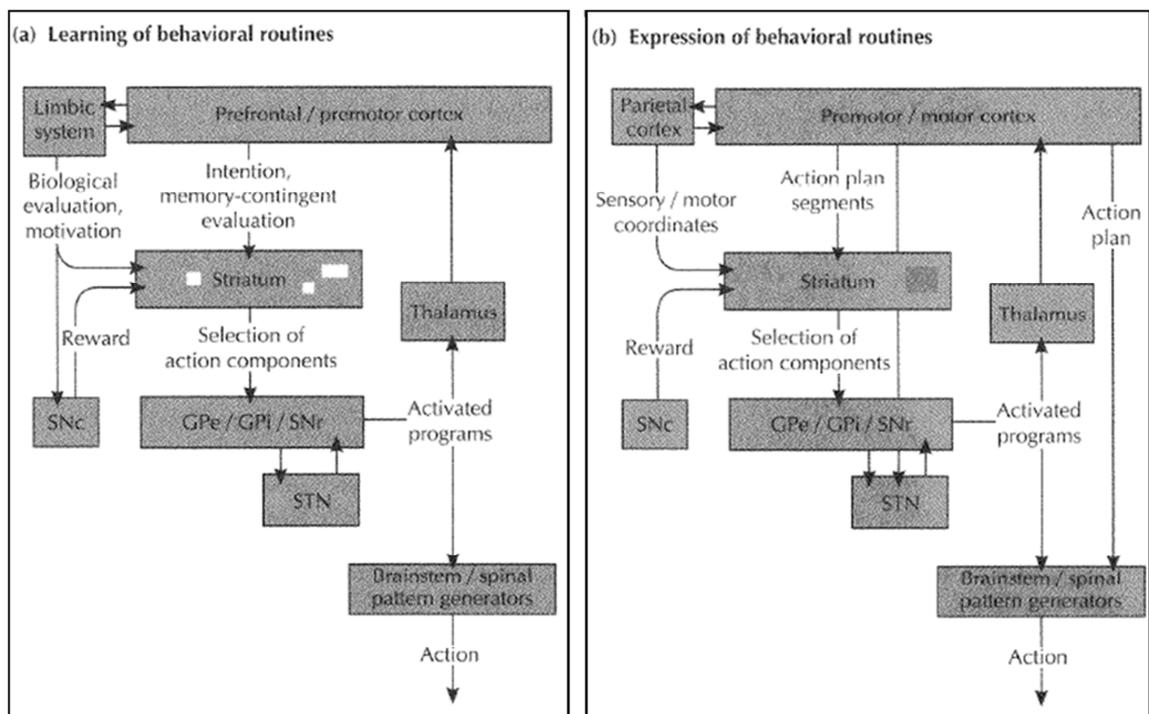


Abb. 17. Kortikobasale Regelkreise, die beim Lernen (a) bzw. bei der Kontrolle (b) von Handlungsabläufen aktiv sind (SNc = Substantia nigra pars compacta; GPe = Globus pallidus pars externa; GPi = Globus pallidus pars interna; SNr = Substantia nigra pars reticulata; STN = Nucleus subthalamicus) (modifiziert nach Graybiel, 1995, S. 735).

Dieser Lern-Regelkreis wird durch das von Doya (1999) entwickelte Modell unterstützt, welches den neuroanatomischen Strukturen verschiedene Funktionssweisen zuordnet: „There is currently enough anatomical, physiological, and theoretical evidence to support the hypotheses that the cerebellum is a specialized organism for supervised learning, the basal ganglia are for reinforcement

learning, and the cerebral cortex is for unsupervised learning” (Doya, 1999, S. 961). Der Autor nimmt an, dass das Kleinhirn vorrangig für die Bewegungskontrolle und eine neutrale Fehlerverarbeitung, die Basalganglien für das Reinforcement-Lernen und der Kortex für die bewusste Verarbeitung, und somit Lernsituationen ohne Feedback, verantwortlich sind. Da sich diese drei Dinge im normalen Verhaltenskontext jedoch gegenseitig bedingen, ist eine empirische Differenzierung der einzelnen Systeme oft schwierig (Doya, 1999, S. 961–962). Dennoch konnten weitere Experimente, welche die durch Feedback-Valenz induzierten neurophysiologischen Veränderungen beim Menschen mit Hilfe nicht-invasiver Methoden untersuchten, die bereits genannten Befunde im Großen und Ganzen bestätigen (Bischoff-Grethe, Hazeltine, Bergren, Ivry & Grafton, 2009; Lutz, Pedroni, Nadig, Luechinger & Jäncke, 2012; Seidler et al., 2013; Thut et al., 1997).

Die Forschungsgruppen um Lutz und Thut konnten überdies zeigen, dass die interne Valenz, die der subjektiven Selbstbewertung entspricht, im Vergleich zur externen Valenz, die im Sinne der Feedback-Valenz zu verstehen ist, unterschiedliche neurophysiologische Auswirkungen hat. Die positive Feedback-Valenz, die in beiden Untersuchungen durch Geldgewinne induziert wurde, führte zu stärkeren Aktivierungen der Areale, die auch bei internen, positiven Valenzen dominant sind. Thut et al. fanden zudem heraus, dass die Feedback-Valenz zusätzliche Aktivierungen im präfrontalen Kortex zur Folge hat, die durch eine verstärkte Verarbeitung der finanziellen Belohnungsreize erklärt wird (Lutz et al., 2012; Thut et al., 1997).

Besonders interessant im Zusammenhang mit der Frage nach der Automatisierung motorischer Fertigkeiten ist das Review von Seidler und Kollegen (2013), in dem die neurokognitiven Mechanismen der Fehlerentdeckung und -korrektur zusammengefasst werden. Seidler et al. unterstützen die Verortung des Lernens durch Belohnungen bzw. positive Valenzen in den Basalganglien und kortikostriatalen Regelkreisen. Diese Strukturen sind hauptsächlich unbewussten Verarbeitungsprozessen zuzuordnen, während die neuronalen Korrelate negativer Valenzen mit bewussten, aufmerksamkeitsmodulierenden Prozessen in Verbindung gebracht werden. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammen-

hang der ACC, der vorrangig kognitive Kontrollfunktionen hat und somit die Anpassung an veränderte Umgebungsbedingungen realisieren kann. Er ist im Kontext des Bewegungslernens hauptsächlich für die Fehlerentdeckung und -verarbeitung zuständig. Dies konnte durch Studien aufgezeigt werden, welche die Spannungsveränderungen des Gehirns mit Hilfe der Elektroenzephalografie (EEG) untersuchten. Dabei konnte eine fehlerbezogene Negativierung des EEG-Signals entdeckt werden, die als *error-related negativity* (ERN) bezeichnet wird (Seidler et al., 2013, S. 39–43): „The error-related negativity (ERN) is an event-related brain potential observed when subjects receive feedback indicating errors or monetary losses“ (Hajcak, Holroyd, Moser & Simons, 2005, S. 161). Die ERN ist also als neuronales Korrelat der Fehlerentdeckung durch das Individuum zu verstehen und hat seinen Ursprung im ACC. Es wird angenommen, dass die RPEs durch das dopaminerge System des Mittelhirns an den präfrontalen Kortex und den ACC vermittelt werden. Dort wird dann anscheinend die ERN ausgelöst, sowie eine verstärkte Beteiligung kognitiver Kontrolle mit dem Ziel der Leistungsverbesserung angestoßen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Höhe des gemachten Fehlers mit der Höhe der ERN zusammenhängt (Seidler et al., 2013, S. 40–41). Weitere Untersuchungen, die sich mit dem Einfluss der Feedback-Valenz auf die ERN beschäftigt haben, bestätigen diese Erkenntnisse (Hajcak et al., 2005; Hajcak, McDonald & Simons, 2003; Holroyd & Coles, 2002). Allerdings bezieht sich die ERN auf die reine Selbsteinschätzung des gemachten Fehlers, ohne zusätzliche Feedbackinformationen. Der Einfluss des Feedbacks wird durch die *feedback-related negativity* (FRN) dargestellt. Die FRN tritt im Falle eines unerwarteten Feedbacks auf und ist demnach mit einem geringen ERN verbunden. Je größer die FRN, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für anschließende Bewegungskorrekturen. Eine kleine FRN tritt in der Regel mit einem hohen ERN auf, da der Bewegungsfehler bereits durch interne Entdeckungsprozesse identifiziert wurde und das negative Feedback infolgedessen nicht mehr unerwartet ist (Di Luft, 2014, S. 357). Es wird angenommen, dass die FRN, wie auch die ERN, durch einen RPE ausgelöst wird. Ob sich der RPE im ERN oder FRN zeigt, hängt davon ab, ob der Vorhersagefehler bereits durch die Eigeninformationen des Individuums, oder

erst durch das Feedback aufgedeckt wird. Derzeit wird davon ausgegangen, dass ERN und FRN im frontalen Kortex bzw. dem ACC generiert und als Fehler-signal an die Dopaminneuronen des Mittelhirns weitergeleitet werden. Somit kann die Sensitivität des FRN sowohl für negative, als auch positive RPEs erklärt werden (Di Luft, 2014, S. 360–361; Nieuwenhuis, Slagter, Geusau, Heslenfeld & Holroyd, 2005).

Auch in einer fMRI-Untersuchung konnten durch extrinsische Fehler-Signale verstärkte Aktivierungen im Bereich des ACC, preSMA, Thalamus und posterioren frontomedianen Kortex aufgezeigt werden, welche als die für bewusste Verarbeitung zuständigen Areale angesehen werden (Volz, Schubotz & Cramon, 2005).

Diese Ergebnisse zeigen, dass positive Feedback-Valenz eher zu höheren Aktivitäten in den Bereichen des Gehirns führt, die mit einer unbewussten Kontrolle in Verbindung stehen. Sie fungieren als Bestätigungssignal und könnten Automatisierungsprozesse somit begünstigen. Feedback mit einer negativen Valenz hingegen bewirkt verstärkt Aktivierungen in den Gehirnarealen, die mit bewussten Verarbeitungsprozessen in Zusammenhang gebracht werden. Sie sorgen für strategische Verhaltensänderungen, um die Leistung zu verbessern, was für die Automatisierung motorischer Fertigkeiten jedoch hinderlich sein könnte (Seidler et al., 2013, S. 50–51; Volz et al., 2005, S. 564): „Negative feedback signals for a behavioral or strategic change, whereas positive feedback serves as a ‘keep-at-it’ signal and thus leads to the development of a preference for one option over time” (Volz et al., 2005, S. 564).

Diese Lokalisationen sind besonders interessant, weil sie sich stark mit den neuronalen Korrelaten des motorischen Lernens und speziell den Automatisierungsprozessen (siehe Kapitel 2.2.2.8) sowie teilweise auch den Hirnstrukturen, die mit dem Übergang im Kontrollmodus einhergehen (siehe Kapitel 2.2.2.6 und 2.2.2.7), überschneiden.

Die konkrete Bedeutung lernrelevanter Dopamin-Ausschüttungen im Mittelhirn für die Automatisierung motorischer Fertigkeiten thematisierten Beck, Blichke und Abler erstmals 2012. Sie stellten heraus, dass der phasischen Aktivierung

der Dopamin-Neuronen im Mittelhirn, die durch unerwartet erfolgreiche Leistungen im Sinne eines positiven RPE hervorgerufen werden, quasi eine Türöffnerfunktion für die Automatisierung zukommt. Dadurch werden wiederum Plastizitätsvorgänge im Striatum ausgelöst, die Lern- bzw. Automatisierungsprozesse herbeiführen. Infolgedessen werden nur als erfolgreich wahrgenommene Bewegungsausführungen in das motorische Gedächtnis aufgenommen und zunehmend automatisiert. Ein negativer RPE führt zu einem Ausbleiben der Aktivierung der Dopamin-Neurone und verhindert somit das Erlernen der Bewegungen, die zu diesem RPE geführt haben (Beck et al., 2012, S. 276–277).

Zusammenfassend zeigen sich anscheinend Vorteile positiver (Feedback-)Valenz global für das motorische Lernen und auch speziell für die Automatisierung. Dabei scheinen vor allem positive RPEs, die auf verschiedene Weise vermittelt werden können, eine wichtige Bedeutung für das Erlernen und Automatisieren erfolgreich ausgeführter Bewegungsmuster zu haben. Positive Feedback-Valenzen rufen zudem Aktivitäten in Hirnarealen hervor, die der unbewussten Verarbeitung zugeschrieben sind und demnach günstige Voraussetzungen für Automatisierungsprozesse schaffen könnten. Negative Feedback-Valenzen scheinen hingegen kognitive Kontrollprozesse zur bewussten Fehlerkorrektur zu initiieren, die einer Langzeit-Potenzierung entsprechender Synapsen und Automatisierung im Wege stehen könnten. Um den konkreten Einfluss der Feedback-Valenz, die auf viele verschiedene Weisen operationalisiert werden kann, auf motorische Lernprozesse zu beschreiben, wird im nächsten Kapitel die aktuelle Befundlage der verhaltensbasierten Untersuchungen dargestellt.

### 2.3.3 *Motorisches Lernen und Feedback-Valenz*

Die Feedback-Valenz kann auf vielen verschiedenen Wegen operationalisiert werden. Im vorangegangenen Kapitel wurde die Valenz des Feedbacks hauptsächlich durch Symbole oder Belohnungen vermittelt, die nach erfolgreichen bzw. misslungenen Versuchen entsprechend dargeboten wurden. Jedoch hat auch die Methode der Valenz-Vermittlung einen Einfluss auf das motorische Lernen. In den folgenden Unterkapiteln werden daher die verschiedenen Mög-

lichkeiten, Feedback-Valenzen zu induzieren und deren Einfluss auf das Lernen entsprechend ihrer historischen Entwicklung vorgestellt.

### 2.3.3.1 Selbstkontrolliertes Feedback

Die ersten Untersuchungen, die sich mit den Effekten der Feedback-Valenz, wie sie in dieser Arbeit verstanden wird, auf das motorische Lernen beschäftigten, sind Experimente zum selbstkontrollierten Feedback. Dabei dürfen die Versuchspersonen selber entscheiden, ob sie nach einem Versuch Feedback erhalten möchten oder nicht. Die erste Studie in diesem Kontext wurde von Janelle, Kim und Singer (1995) durchgeführt. Die Probanden sollten innerhalb von 40 Versuchen erlernen, eine einfache Wurf Aufgabe möglichst präzise auszuführen. Nach zehnminütiger Pause wurde ein Post-Test ohne Feedback durchgeführt. Die Versuchsgruppe, die selbst über ihren Feedbackplan bestimmen konnte, zeigte eine signifikant bessere Leistung im Abschlusstest als die anderen Feedback-Gruppen, deren Feedbackplan fremdbestimmt war. Bedeutend ist in diesem Zusammenhang vor allem der Vergleich mit einer sogenannten Yoked-Gruppe. Die Probanden dieser Gruppe erhielten Rückmeldungen nach dem identischen Muster, wie ein jeweiliger Forschungszwilling aus der Selbstkontroll-Gruppe. Die Häufigkeit und Verteilung des Feedbacks stimmte in diesen beiden Gruppen also komplett überein. Der Unterschied bestand lediglich darin, dass die Yoked-Gruppe nicht selber über den Zeitpunkt des Feedbacks entscheiden konnte (Janelle, Kim & Singer, 1995). Diese Ergebnisse konnten 1997 mit einer ähnlichen Aufgabe und selbstkontrolliertem KP repliziert werden (Janelle, Barba, Frehlich, Tennant & Cauraugh, 1997). Der lernförderliche Effekt selbstkontrollierten Feedbacks konnte in weiteren Untersuchungen mit verschiedenen Bewegungsaufgaben bestätigt und erweitert werden (Bund & Wiemeyer, 2005, S. 10–14; Carter & Patterson, 2012; Chiviawowsky & Wulf, 2002; Chiviawowsky & Wulf, 2005; Chiviawowsky, Wulf, Medeiros, Kaefer & Tani, 2008; Grand et al., 2015; Patterson & Carter, 2010). Die Vorteile selbstkontrollierten Feedbacks ließen sich dabei unabhängig von der Aufgabenschwierigkeit nachweisen (Patterson & Carter, 2010). Allerdings scheinen nur Kinder und junge Erwachsene, nicht aber ältere Menschen, von diesen lernförderlichen

Effekten zu profitieren (Carter & Patterson, 2012; Chiviacowsky et al., 2008). Überdies wird motorisches Lernen anscheinend ebenfalls begünstigt, wenn den Übenden andere Selbstkontrollentscheidungen, wie bspw. über den Einsatz von Gerätehilfen, die Aufgabenschwierigkeit oder Instruktionen, überlassen werden (Andrieux, Boutin & Thon, 2016; Wulf, 2007, S. 98–99; Wulf & Mornell, 2008, S. 16). Einschränkungen dieses Effektes zeigten sich lediglich bei komplexen Selbstentscheidungsaufgaben, die möglicherweise zu hohe kognitive Anforderungen an den Übenden stellen und Lerneffekte somit beeinträchtigen können (Andrieux et al., 2016; Krause, 2012, S. 287; Laughlin et al., 2015).

Die Analyse der Versuche, in denen die Probanden Feedback anforderten, ergab, dass Rückmeldungen, unabhängig von der Aufgabenschwierigkeit, vorrangig nach gelungenen Versuchen angefragt wurden (Chiviacowsky & Wulf, 2002, S. 408; Patterson & Carter, 2010, S. 214; Wulf & Mornell, 2008, S. 17). Die Versuchspersonen verfolgten also eine spezifische Strategie bei der Feedbackwahl, die somit genauer auf den Lernenden und seine Bedürfnisse abgestimmt ist, als wenn der Feedbackplan fremdgesteuert wird (Bund & Wiemeyer, 2005, S. 17; Chiviacowsky & Wulf, 2002, S. 413; Wulf & Mornell, 2008, S. 17). Diese Auffassung steht allerdings im Widerspruch zu den Annahmen der Guidance-Hypothese, die besagt, dass Feedback vor allem nach fehlerhaften Versuchen notwendig ist, um den Lernenden an die korrekte Bewegungsausführung heranzuführen (Salmoni, Schmidt & Walter, 1984). Im Sinne dieser Theorie ist Feedback nach gelungenen Versuchen weniger bedeutend für den Lernprozess (Chiviacowsky & Wulf, 2002, S. 413). Chiviacowsky und Wulf erklären den lernförderlichen Effekt der Auswahl gelungener Versuche für die Feedback-Präsentation folgendermaßen: „Thus, feedback informing them that their performance was poor would appear to be redundant. In contrast, feedback after a good trial could be used either as information that the movement was correct or to help fine tune the movement” (Chiviacowsky & Wulf, 2002, S. 413–414). Nach einer misslungenen Bewegungsausführung ist kein Feedback nötig, da die Versuchspersonen den Fehler bereits aufgrund der Eigeninformationen wahrgenommen haben. Das Feedback von als wahrscheinlich erfolgreich eingeschätzten Versuchen ist anscheinend deshalb besonders interes-

sant, da es zum Abgleich der Eigenwahrnehmung mit der Realität genutzt und somit als Bestätigung oder zur Feinabstimmung der Bewegung herangezogen wird. Feedback scheint nach Versuchen, über deren Ausgang die Versuchsperson unsicher ist, den optimalen Informationswert zu haben (Schmidt & Lee, 2011, S. 425). Betrachtet man diesen Erklärungsansatz im Kontext der Theorie des Anspruchsniveaus, dann wird Feedback vor allem nach Versuchen benötigt, in denen die Zielerreichungsdiskrepanz als eher klein, und somit die Aufgabenbewältigung als Erfolg, eingeschätzt wurde.

Diese Annahme lässt sich durch eine Untersuchung von Grand et al. unterstützen, welche die FRN zwischen selbstkontrollierten und fremdbestimmten Feedbackbedingungen verglichen. Dabei zeigte sich, dass die FRN nur bei der Selbstkontroll-Gruppe auftrat, was nahe legt, dass diese Probanden intrinsische Informationen stärker verarbeiteten, wodurch sie Erwartungen an das Bewegungsergebnis bzw. Feedback stellten (Grand et al., 2015, S. 29). Diese effektivere Verarbeitung der Eigeninformation und die aktive Einbeziehung des Lernenden wurde bereits von Wulf und Mornell, sowie von Bund und Wiemeyer als möglicher Erklärungsansatz genannt (Bund & Wiemeyer, 2005, S. 16; Wulf & Mornell, 2008, S. 17).

In einem Experiment von 2005 verglichen Chiviawosky und Wulf zwei selbstkontrollierte Versuchsgruppen, die sich nur bezüglich des Zeitpunkts der Feedbackwahl unterschieden. Die Probanden, die sich nach der Handlungsausführung für oder gegen eine Rückmeldung entscheiden mussten, zeigten Lernvorteile gegenüber den Versuchspersonen, die bereits vor dem Versuch wählen mussten, ob sie anschließend Feedback erhalten wollten oder nicht. Dieses Ergebnis deutet ebenfalls darauf hin, dass die Bewertung der erzielten Leistung ein kritischer Faktor für die lernförderlichen Effekte selbstkontrollierter Feedbackbedingungen ist (Chiviawosky & Wulf, 2005, S. 45–47; Schmidt & Lee, 2011, S. 418–419).

Eine Veränderung der Lernstrategie in Folge der Selbstkontrolle des Feedbacks konnte in der Untersuchung von Carter und Patterson (2012) beobachtet werden. Die Probanden, die selbst entscheiden konnten, ob sie nach einem Ver-

such Feedback erhalten wollten, wählten zu Beginn des Lernprozesses sowohl gute, als auch schlechte Versuche und insgesamt häufiger die Feedbackoption. Im weiteren Lernverlauf reduzierten sie die Feedbackhäufigkeit und bezogen sich dabei hauptsächlich auf erfolgreiche Versuche. Es wird angenommen, dass die anfänglich größere Feedbackhäufigkeit dem Informationsbedürfnis der Versuchspersonen geschuldet war, um in frühen Lernphasen eine grobe Lösung der Bewegungsaufgabe zu realisieren. Der Strategiewechsel geht, nach Meinung der Autoren, mit einem Fortschreiten zu späteren Lernphasen einher, in denen ein grober Handlungsplan bereits vorhanden ist und der Fokus eher auf einer konsistenten Leistungserbringung liegt (Carter & Patterson, 2012, S. 1464–1470).

Als weiterer Erklärungsansatz werden motivationale Gründe aufgeführt, die Lerneffekte indirekt durch eine stärkere Auseinandersetzung und Einsatzbereitschaft oder direkt durch verstärkte intrinsische Motivation beeinflussen könnten (Bund & Wiemeyer, 2005, S. 17; Chiviawowsky & Wulf, 2002, S. 414).

### 2.3.3.2 Feedback nach guten bzw. schlechten Versuchen

Die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels deuten darauf hin, dass Feedback von den Versuchspersonen vorrangig nach erfolgreichen Versuchen erwünscht wird und lernförderliche Effekte haben kann. Die Frage, ob externe Rückmeldungen sich eher auf fehlerhafte oder gelungene Handlungen beziehen sollten, wird stark diskutiert (Magill, 2014, S. 351). Um die Bedeutung fremdgesteuerter Rückmeldungen nach erfolgreichen Versuchen mit Feedback nach misslungenen Versuchen zu vergleichen, wurden einige Untersuchungen durchgeführt, die im Vergleich zu den Experimenten des vorherigen Kapitels auf die Selbstkontrollaspekte verzichteten.

Zwei Untersuchungen von Saemi et al. (2012), sowie Chiviawowsky und Wulf (2007), bei denen die Versuchspersonen eine Wurfaufgabe mit der nicht-dominanten Hand erlernen sollten, konnten Lernvorteile durch Feedback nach erfolgreichen Versuchen gegenüber Feedback zu schlechteren Leistungen aufzeigen. Als Erklärung für diese Effekte werden vorrangig motivationale Gründe und speziell das Empfinden von Erfolgserlebnissen angeführt. Darüber hinaus

wird angenommen, dass Feedback nach gelungenen Versuchen die Lernenden dazu animiert, die erfolgreichen Bewegungsmuster zu wiederholen und somit eine stabilere Bewegungsrepräsentation auszubilden. Feedback nach weniger gelungenen Versuchen scheint hingegen Bewegungskorrekturen zu induzieren, die statt zu einer Leistungsverbesserung zu *maladaptive short-term corrections* führen könnten. Dies sind Versuche der Übenden sogar kleine Ausführungsfehler, die ggf. nur auf die natürlichen Schwankungen des motorischen Systems zurückzuführen sind, zu korrigieren und infolgedessen die Entwicklung einer stabilen Bewegungsrepräsentation verhindern (Chiviacowsky & Wulf, 2007; Saemi, Porter, Ghotbi-Varzaneh, Zarghami & Maleki, 2012). Wie auch im Falle des selbstkontrollierten Lernens, stehen diese Befunde ebenfalls im Kontrast zu der Guidance-Hypothese, welche die Informationsfunktion des Feedbacks als ausschlaggebenden Faktor für Lernprozesse und die Motivationsfunktion eher als indirekt lernförderlich ansieht (Chiviacowsky & Wulf, 2007, S. 46; Saemi et al., 2012, S. 381). Den hemmenden Effekt der Rückmeldung schlechter Leistungen erklären sich Wulf, Shea und Lewthwaite aber auch durch möglicherweise ausgelöste Bedenken und Sorgen bezüglich der eigenen Leistung: „Thus, feedback indicating errors may not only be redundant, but it can also heighten concerns about the self that may hamper learning“ (Wulf et al., 2010b, S. 79).

Bei all diesen Interpretationen muss aber auch berücksichtigt werden, dass es sich bei der verwendeten Feedbackform um das sogenannte Summary-KR handelt. Dabei wird den Probanden erst nach einem Block von Versuchen, in diesem Fall sechs, eine Rückmeldung gegeben. Dies kann dazu führen, dass die intrinsischen Informationen vergessen oder durch Eigeninformationen folgender Versuche „überschrieben“ werden, bevor das Feedback zu den jeweiligen Versuchen präsentiert wird. Die Rückmeldungen verlieren infolgedessen den direkten Bezug zu den Eigeninformationen, so dass eine konkrete Kalkulation der Zielerreichungsdiskrepanz und eine anschließende Bewertung dessen als Erfolg oder Misserfolg nicht mehr möglich ist. In den beiden genannten Experimenten wurden den Versuchspersonen erst im Anschluss an die sechs Bewegungen eines Blocks die Ergebnisse der drei besten bzw. schlechtesten Versuche präsentiert. Eine integrative Verarbeitung von Eigen- und Fremdinforma-

tionen könnte in diesem Fall erschwert sein. Durch die Rückmeldung der schwächeren Versuche werden somit größere Fehlerwerte präsentiert, die, auch ohne dass sie im Zusammenhang mit dem jeweiligen Versuch betrachtet werden, schon per se stärkeren Anlass für Bewegungskorrekturen geben.

Die lernförderlichen Effekte von Feedback nach erfolgreichen Versuchen konnten in weiteren Untersuchungen mit anderen Bewegungsaufgaben wie bspw. dem Golf-Putt, Volleyball-Aufschlag oder einer Kraftproduktionsaufgabe unabhängig vom Alter der Versuchspersonen repliziert werden. In allen Experimenten wurde ebenfalls Summary-KR verwendet (Ahmadi, Sabzi, Heirani & Hasanvand, 2011; Badami, Kohestani & Taghian, 2011; Badami, VaezMousavi, Wulf & Namazizadeh, 2011; Badami, VaezMousavi, Wulf & Namazizadeh, 2012; Chiviacowsky, Wulf, Wally & Borges, 2009). Die Gruppe, die Feedback zu den zwei besten Versuchen eines Blocks erhielt, zeigte sogar bessere Leistungen als eine Gruppe, die zwei Feedback-Versuche selbst auswählen durfte (Ahmadi et al., 2011). Um die Ursachen für diese Effekte näher zu ergründen, erhoben Badami et al. (2011) zusätzlich verschiedene Motivationsparameter mit Hilfe von Fragebögen. Die Gruppen unterschieden sich dabei nur hinsichtlich der Subskala „wahrgenommene Kompetenz“. Die Autoren verstehen diese motivationalen Aspekte als Mediator für die unterschiedlichen Lernleistungen durch Feedback nach guten oder schlechten Versuchen (Badami et al., 2011): „positive feedback has been shown to encourage participants to raise their goals and expectancies for future performance (Singer & McCaughan, 1978), while negative feedback provides negative competence information and, therefore, decreases intrinsic motivation“ (Badami et al., 2011, S. 361). Die als größer wahrgenommene Kompetenz könnte, wie von Chiviacowsky und Wulf (2007) postuliert, durch das verstärkte Empfinden von Erfolgserlebnissen in der Gruppe, die Feedback zu ihren besten Versuchen rückgemeldet bekam, herbeigeführt worden sein.

In einer darauf aufbauenden Studie wurden 2012 ergänzend Angstzustände und das Selbstbewusstsein durch einen Fragebogen, sowie die Erregung mit Hilfe der Hautleitfähigkeit erhoben. Die stärkeren Lernerfolge der Gruppe, die Feedback nach erfolgreichen Versuchen erhalten hatte, erklären die Autoren

durch ein stärkeres Selbstbewusstsein, das sich als Folge von größerer Kompetenzwahrnehmung entwickelt hatte. Nach Annahme der Autoren scheint das bessere aufgabenbezogene Selbstbewusstsein das Bedürfnis für die Zuwendung attentionaler Ressourcen zur Selbstregulierung negativer Gedanken oder Gefühle reduziert zu haben, so dass diese Kapazitäten für die Aufgabenbewältigung eingesetzt werden konnten. Die höheren Aktivierungen im Falle positiver Rückmeldungen unterstützen diese Annahme (Badami et al., 2012). Ergänzend dazu fanden Koehn et al. (2008) heraus, dass Feedback nach fehlerhaften Versuchen größere kognitive Anforderungen an die Arbeitsgedächtniskapazitäten stellt, als Feedback nach erfolgreichen Versuchen (Koehn, Dickinson & Goodman, 2008).

In all diesen Untersuchungen wurden die Versuchspersonen nicht darüber aufgeklärt, dass sich das Feedback auf ihre besten/schlechtesten Versuche bezog. Den Einfluss der Kenntnis darüber (*awareness*) untersuchten Patterson und Azizieh (2012) ebenfalls mit Hilfe des Summary-KR. Die Versuchspersonen, die über die Auswahl ihrer Rückmeldungen in Kenntnis gesetzt worden waren (*aware*), erzielten bessere Leistungen im Retentions-Test als diejenigen, die nicht wussten, ob sich das Feedback auf gute oder schlechte Versuche bezog (*unaware*). Möglicherweise lässt sich der lernförderliche Effekt dadurch erklären, dass die *awareness* eine wichtige Referenz für die eigene Leistungsbewertung bietet. Somit könnte nicht nur der informationelle Wert des Feedbacks gesteigert (Patterson & Azizieh, 2012), sondern auch die subjektive Bewertung der Zielerreichungsdiskrepanz beeinflusst worden sein. Die Motivationsparameter, die mit Hilfe eines Fragebogens erhoben wurden, zeigten keine Gruppenunterschiede. Die unterschiedlichen Effekte lassen sich somit nicht auf motivationaler Ebene begründen (Patterson & Azizieh, 2012, S. 1456–1458), sondern eher durch die zusätzliche „Hilfestellung“ bei der Bewertung der eigenen Leistung als Erfolg oder Misserfolg, durch die *awareness*. Die ausbleibenden Effekte in den *unaware*-Gruppen werden damit begründet, dass die verwendete Lernaufgabe den Probanden, im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Untersuchungen, vollkommen unbekannt war und somit auf keine Vorerfahrungen zurückgegriffen werden konnte. Dies zeigt sich auch dadurch, dass die *unaware*-Gruppen

nicht erkannten, dass ihnen Feedback nur zu den erfolgreichsten bzw. schlechtesten Versuchen rückgemeldet wurde (Patterson & Azizieh, 2012, S. 1456–1458). Die Verarbeitung von Eigeninformation und die intrinsischen Fehlerentdeckungsmechanismen scheinen somit noch nicht stark genug ausgebaut gewesen zu sein, um die Rückmeldungen, ohne die *awareness*, sinnvoll verarbeiten zu können.

Einen gegensätzlichen Befund stellten Kelley und McLaughlin (2012) vor: Sie fanden lernförderliche Effekte durch Feedback nach fehlerhaften Versuchen für eine komplexe kognitive Entscheidungsaufgabe. Bei einfacheren Aufgabenbedingungen zeigten sich keine Unterschiede bezüglich der Lernleistungen aller Versuchsgruppen. Die Forscher fanden jedoch heraus, dass das Feedback nach fehlerhaften Versuchen mehr als doppelt so lange betrachtet wurde, wie nach korrekten Antworten. Die Autoren nehmen für den Fall ihrer kognitiven Entscheidungsaufgabe an, dass bewusste Verarbeitungsprozesse besonders bei schwierigeren Aufgaben notwendig sind (Kelley & McLaughlin, 2012): „In this view, a more difficult task would benefit from providing information about being incorrect because it may increase hypothesis testing and problem solving“ (Kelley & McLaughlin, 2012, S. 2431). Im Kontext des motorischen Lernens und speziell des Teilaspektes der Automatisierung scheinen solche Prozesse jedoch hinderlich zu sein, wie die Theorie des impliziten und expliziten Lernens thematisiert (Masters & Maxwell, 2004, S. 212–213), deren zentrale Annahmen und Befunde im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

### 2.3.3.3 Implizites und explizites Lernen und die Theorie des errorless learning

Die Begriffe implizit und explizit werden im Kontext der Sportmotorik einerseits im Zusammenhang mit dem Gedächtnis und andererseits in Bezug zu Lernprozessen verwendet. An sportmotorischen Lernprozessen sind sowohl das implizite (unbewusste), als auch das explizite (bewusste) Gedächtnis beteiligt (Oliver, Rockmann-Rüger & Krause, 2013, S. 158–159). Das im expliziten Gedächtnis abgelegte Wissen besteht aus Fakten und Regeln, die bewusst zugänglich und artikulierbar sind (Masters, 1992, S. 343). Im Gegensatz dazu steht das implizite Wissen: „Implicit knowledge is made up of that which we ‚know‘ yet are

not aware of and thus cannot articulate“ (Masters, 1992, S. 343). Es ist also nicht bewusstseinsfähig und kann weder durch Sprache vermittelt noch ausgedrückt werden.

Beim expliziten Lernen wird explizites Wissen erworben, indem „der Lernende die bewusste Intention hat, die in Frage stehende Fertigkeit zu erlernen, dazu zielgerichtete Übungsversuche absolviert und sich dabei die der Aufgabenlösung zugrunde liegenden Regelhaftigkeiten in einer verbal explizierbaren Form“ aneignet (Müller & Blischke, 2009, S. 170). Implizites Lernen findet statt, wenn Lernerfolge auch unabhängig von aufwändigen (effortful), bewussten (conscious) und verbalisierbaren (verbalizable) Vorgängen erreicht werden können (Müller & Blischke, 2009, S. 170; Shea, Wulf, Whitacre & Park, 2001, S. 841). Das explizite Lernen kommt primär zu Beginn des motorischen Lernens vor (Kapitel 2.1.1) und lässt sich kaum mit Automatisierungsprozessen vereinbaren (Müller & Blischke, 2009, S. 170). Explizites Lernen kann in verschiedenen Formen geschehen, wie unter anderem dem *expliziten Hypothesen-Testen* (explicit hypothesis-testing), bei dem unter Rückgriff auf Arbeitsgedächtnisressourcen Hypothesen aufgestellt und modifiziert werden: Der Übende stellt vor einem Durchgang eine Hypothese über den möglichen Handlungsausgang auf. Nach der Ausführung wird die Hypothese auf Basis des erzielten Ergebnisses für den nächsten Versuch modifiziert und wiederum getestet. Somit werden, vor allem durch fehlerhafte Bewegungsergebnisse, Hypothesen angepasst und explizite Regelhaftigkeiten erarbeitet (Masters & Maxwell, 2004, S. 212–213; Raab et al., 2009, S. 414–415).

Den Großteil des motorischen Lernens machen jedoch implizite Lernprozesse aus, deren Anteil mit fortschreitendem Lernprozess zunimmt und die vorrangig späteren Lernphasen zugeordnet werden (Masters, 1992, S. 343; Müller & Blischke, 2009, S. 170). Einige Befunde zeigen, dass die frühen, kognitiven Lernphasen übersprungen und explizite Lernprozesse somit gezielt unterdrückt werden können. Das Lernen geschieht somit implizit, was eine größere Behaltensstabilität und Störresistenz gegenüber Druckbedingungen zur Folge hat (Magill, 2014, S. 334; Müller & Blischke, 2009, S. 170). Masters und Maxwell (2008) entdeckten, dass man unter Druck dazu neigt, auch hochgeübte Fertig-

keiten, unter Rückgriff auf explizites, verbalisierbares Wissen, zu kontrollieren, wenn ursprünglich explizit gelernt wurde. Diese als *reinvestment* bezeichnete Form des Rückfalls zu einer bewussten Bewegungskontrolle behindert automatische Kontrollprozesse und führt infolgedessen zu Leistungseinbrüchen. Es scheint daher sinnvoll, implizite Lernprozesse den expliziten vorzuziehen, um einem möglichen *reinvestment* vorzubeugen (Magill, 2014, S. 334; Masters & Maxwell, 2008; Masters & Maxwell, 2004, S. 208–210).

Der Bezug zum Thema Feedback-Valenz wird deutlich, wenn man die Anwendungsformen impliziten Lernens genauer betrachtet. Allen voran steht dabei die Methode des *errorless learning*, die im Kontext des motorischen Lernens vor allem durch die Forschergruppe um Masters und Maxwell vertreten wird. Beim *errorless learning* geht es darum, schon zu Beginn des motorischen Lernens Übungsbedingungen zu schaffen, in denen möglichst wenige Fehler passieren bzw. zurückgemeldet werden. Diese Methode baut auf den Grundannahmen von Baddeley und Wilson (1994) auf, die postulieren, dass der Versuch, im Lernverlauf auftretende Fehler zu korrigieren, zu expliziten Lernprozessen führt (Baddeley & Wilson, 1994). Diese Annahme wird durch Ohlsson (1996) gestützt, der explizite Prozesse als Voraussetzung für das Lernen durch Fehler ansieht (Ohlsson, 1996): „Typically, when errors occur the learner will conceive and trial hypotheses about how to correct them“ (Masters & Maxwell, 2004, S. 212). Das durch die Wahrnehmung von Fehlern ausgelöste *explizite Hypothesen-Testen* findet mit Rückgriff auf bewusst zugängliche Arbeitsgedächtnisressourcen statt und führt zu einer Generierung expliziten Wissens über die Aufgabe (*errorful learning*). Wenn im Lernprozess jedoch kaum oder gar keine Fehler passieren, ist ein *Hypothesen-Testen* unwahrscheinlich, da die erfolgreichen Bewegungsergebnisse keinen Anlass für Korrekturen geben (*errorless learning*). Infolgedessen müsste es zu vorrangig impliziten Lernprozessen kommen, die ohne Einbeziehung des Arbeitsgedächtnisses ablaufen und anschließend gesteuert werden können (Masters & Maxwell, 2004, S. 212–213; Maxwell, Masters, Kerr & Weedon, 2001).

Ob ein Bewegungsergebnis als Fehler wahrgenommen wird, steht in engem Zusammenhang mit den in Kapitel 2.3.1 thematisierten Grundlagen der Feed-

back-Valenz. Ein Fehler wird, im Sinne des *errorless learning*, gleichbedeutend mit einer als Misserfolg bewerteten Zielerreichungsdiskrepanz angesehen. Das Feedback wird in beiden Kontexten genutzt, um die Zielerreichungsdiskrepanz zu kalkulieren und anschließend als Fehler/Misserfolg bzw. gelungenen Versuch/Erfolg zu bewerten. Die Rückmeldung von Fremdinformationen ist dabei besonders bedeutend, da sie einerseits integrativ mit den Eigeninformationen verarbeitet wird und somit die Leistungsbewertung beeinflussen kann. Andererseits kann dominantes Feedback die Eigeninformationen sogar überschreiben (Masters & Maxwell, 2004, S. 213–214). Die Wahrnehmung von Fehlern/Misserfolgen kann also durch die Übungsbedingungen und besonders das Feedback beeinflusst werden, so dass fremdgesteuerte explizite Lernprozesse unterdrückt und implizites Lernen provoziert werden kann.

Einen beeindruckenden, empirischen Beleg dieser Annahmen lieferten Maxwell, Masters, Kerr und Weedon (2001) durch ein Experiment, in dem die Versuchspersonen einen Golf-Putt erlernen sollten. Eine *errorless*-Gruppe puttete jeweils 50 Versuche in acht Übungsblocks mit ansteigenden Entfernungen vom Ziel. Sie starteten bei einer Distanz von 25 cm zum Loch und endeten bei 2 m Entfernung. Die *errorful*-Gruppe puttete ebenfalls 50 Mal von denselben acht Distanzen. Diese Gruppe startete aber bei der größten Entfernung zum Loch (2 m) und arbeitete sich von Block zu Block näher an das Loch heran. Eine *random*-Gruppe absolvierte die acht Übungsblocks in verteilter Reihenfolge (Maxwell et al., 2001, S. 1049–1053). Die Autoren nahmen an, dass es in der *errorful*-Gruppe zu expliziten Lernprozessen kommen würde: „Errorful learners were expected to adopt an explicit, hypothesis-testing strategy to correct errors during learning, thereby accruing a pool of verbalizable rules and exhibiting performance breakdown under dual-task conditions” (Maxwell et al., 2001, S. 1049). Maxwell et al. erwarteten für die *errorless*-Gruppe insgesamt weniger Bewegungsfehler und infolgedessen implizite Lernprozesse, die sich in einer geringeren Anzahl verbalisierbarer Bewegungsregeln und einer stabileren Leistung bei der gleichzeitigen Ausführung einer Sekundäraufgabe zeigen sollte (Maxwell et al., 2001, S. 1049). Die Ergebnisse bestätigen diese Annahmen. Die *errorless*-Gruppe machte weniger Fehler als die anderen beiden Gruppen

und zeigte im Retentions-Test eine signifikant bessere Leistung. In Bezug zur Automatisierung ist besonders interessant, dass die Leistung der *errorless*-Gruppe bei der gleichzeitigen Ausführung einer Zusatzaufgabe stabil blieb, während sich die Leistung der anderen beiden Gruppen unter Doppeltätigkeit verschlechterte (Maxwell et al., 2001, S. 1054–1055). Das letzte Ergebnis muss zwar mit Vorsicht betrachtet werden, da in diesem Experiment kein Eingangstest durchgeführt wurde, dennoch kann es als Hinweis für automatisierungsfördernde Effekte durch *errorless learning*-Bedingungen angesehen werden: „The *errorless* conditions utilized here may have promoted the transition into automatic processing, which has been associated with lower attentional demand” (Maxwell et al., 2001, S. 1066). Die Rückmeldung von Fehlern scheint hingegen explizite, attentionale Prozesse hervorzurufen, die Automatisierungsprozesse hemmen könnten (Maxwell et al., 2001, S. 1067). Auf diesen Erkenntnissen aufbauend konnten Poolton, Maxwell und Masters in einem weiteren Experiment zeigen, dass implizite Lernprozesse vor allem zu Beginn des motorischen Lernens wichtig sind, wenn das Generieren expliziten Wissens verhindert werden soll (Poolton, Masters & Maxwell, 2005). Das Hervorrufen impliziter Lernprozesse durch *errorless learning*-Bedingungen konnte in einer weiteren Studie bestätigt werden (Lam, Maxwell & Masters, 2010). Auch die Robustheit implizit erlernter Fertigkeiten gegenüber Druckbedingungen wurde in mehreren Studien repliziert (Lam et al., 2010; Mullen, Hardy & Oldham, 2007). Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass in den meisten *errorless learning*-Untersuchungen vor allem frühe Retentions-Tests, nach weniger als 24 Stunden Pause, durchgeführt wurden und die Aussagekraft für relativ überdauernde Lernleistungen somit eingeschränkt zu interpretieren ist.

Diese Erkenntnisse könnten als weiterer Erklärungsansatz für die Effekte des Feedbacks nach erfolgreichen Versuchen, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden, herangezogen werden. Das auf weniger gelungene Versuche bezogene Feedback stellt Bewegungsfehler dar, die Anlass zu Bewegungskorrekturen, *explizitem Hypothesen-Testen* und infolgedessen expliziten Lernprozessen bieten. Feedback zu erfolgreichen Versuchen hingegen weist

kaum Korrekturbedarf auf, so dass in erster Linie anscheinend implizite Lernprozesse ausgelöst werden.

Mit Rückblick auf die zu Beginn dieser Arbeit thematisierten Aufmerksamkeitsmodelle und Zwei-Prozess-Theorien bieten sich an dieser Stelle einige Anknüpfungspunkte. Zunächst muss differenziert werden, dass es sich beim *controlled* und *automatic processing* um gegensätzliche Kontrollprozesse handelt und beim expliziten und impliziten Lernen um Lernprozesse, die auch parallel ablaufen können (Vidoni & Boyd, 2007, S. 148). Ein für das motorische Lernen typischer Übergang im Kontrollmodus von eher bewusst zu automatisch kontrolliert, wird von einer Zunahme impliziter Lernprozesse begleitet. Explizites und implizites Lernen sind somit gleichzeitig möglich, wobei explizite Lernprozesse auch unterdrückt werden können. Dies ist bspw. durch *errorless learning*-Bedingungen möglich, so dass Lernen in diesem Fall vorrangig implizit von staten geht. In Bezug zum in Kapitel 2.2.2.7 vorgestellten Modell von Keele et al. gehen Maxwell und Kollegen davon aus, dass durch *errorless learning* ein implizites Lernen im uni- und multidimensionalen System gefördert wird, wohingegen *errorfull-learning* explizite Lernprozesse nur im multidimensionalen System verursacht (Maxwell et al., 2001, S. 1066). Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass es beim impliziten Lernen, auch wenn dieses vorrangig unbewusst abläuft, trotzdem zur partiellen Ausbildung von explizitem Wissen kommen kann. Des Weiteren spielt die Aufmerksamkeit auch für implizite Lernvorgänge eine bedeutende Rolle. Sie wird zwar nicht auf konkrete Merkmale und Regelmäßigkeiten gerichtet, wendet sich aber, eher wie ein Scheinwerfer, auf die Aspekte der Lernumgebung, die relevante Merkmale und Regelbeziehungen enthalten, aber selbst nicht entdeckt werden (Kibele, 2001, S. 57–143). Wie den Phasenmodellen des motorischen Lernens (Kapitel 2.1.1) und den Theorien zum Übergang im Kontrollmodus (Kapitel 2.2.2.6 und 2.2.2.7) zu entnehmen ist, können anfangs explizit erlernte Fertigkeiten im späteren Lernverlauf zumindest durch hohe Übungsumfänge ebenfalls automatisiert werden.

Neben dem *errorless learning* existiert eine Vielzahl weiterer impliziter Lernmethoden. Zum Beispiel soll implizites Lernen, wie bei den Experimenten von Curran und Keele (1993), durch das gleichzeitige Ausführen einer Sekundäraufga-

be in der Übungsphase hervorgerufen werden (siehe Kapitel 2.2.2.7). Darüber hinaus konnten implizite Lernprozesse mit subliminalem Feedback, das unter der Wahrnehmungsschwelle liegt, oder Analogie-Lernen in Verbindung gebracht werden. Für den Zweck dieser Arbeit sind aber nicht die Methoden impliziten Lernens, sondern die vorgestellten Erklärungsmechanismen für die Lernvorteile durch fehlerreduziertes Lernen von Interesse, so dass an dieser Stelle auf eine Vorstellung weiterer Methoden impliziten Lernens verzichtet wird.

#### 2.3.3.4 Bandbreiten-Feedback

Das Bandbreiten-Feedback ist eine Methode, die Rückmeldungen nach jedem Übungsversuch präsentiert und dabei unterschiedliche Anteile quantitativen und qualitativen Feedbacks kombiniert. Zu diesem Zweck werden Fehler in Abhängigkeit von ihrem Verhältnis zur zuvor definierten Bandbreite unterschiedlich rückgemeldet. Liegt das erzielte Bewegungsergebnis außerhalb der Bandbreite, so wird ein quantitatives Feedback über die genaue Fehlerhöhe gegeben. Ergebnisse, die innerhalb der Bandbreite liegen, werden in Form eines qualitativ positiven Feedbacks zurückgemeldet, welches die Richtigkeit des Ergebnisses ohne weitere Informationen zur genauen Fehlerhöhe angibt (Agethen, 2015, S.82–83; Marschall, Bund & Wiemeyer, 2007, S. 76; Swinnen, 1996, S. 46; Wulf & Shea, 2004, S. 129). Somit wird also eine positive Feedback-Valenz induziert, wenn der Fehler innerhalb der Bandbreite liegt, da das Bewegungsergebnis als „richtig“ bewertet wird und keine Korrekturen notwendig sind. Die Rückmeldung der außerhalb der Bandbreite liegenden Fehler ist eine Kombination aus negativer Feedback-Valenz mit zusätzlichen, quantitativen Informationen über die Fehlerhöhe (Swinnen, 1996, S. 46).

Einige Untersuchungen konnten Vorteile von Bandbreiten-Feedback bezüglich der Ergebniskonstanz (Sherwood, 1988; Lee & Carnahan, 1990) und des absoluten konstanten Fehlers (Lee & Maraj, 1994) bei frühen Retentions-Tests finden. Diese Vorteile zeigten sich gegenüber Gruppen, die nach jedem Versuch ein quantitatives Feedback erhielten (Sherwood, 1988) bzw. gegenüber zweier Yoked-Gruppen (Lee & Carnahan, 1990), die ein quantitatives Feedback zum gleichen Zeitpunkt erhielten, wie ein Forschungszwilling aus der jeweiligen

Bandbreiten-Gruppe (Agethen, 2015, S.84–87; Swinnen, 1996, S. 46–47; Wulf & Shea, 2004, S.129-130). Vor allem der Vergleich zwischen den Bandbreiten- und jeweiligen Yoked-Gruppen zeigt, dass sich die Lernvorteile durch bandbreiten-Feedback nicht nur auf die Reduktion der Feedbackhäufigkeit zurückführen lassen, denn in der Yoked-Gruppe blieben die qualitativ positiven Rückmeldungen für Versuche, deren Fehlerwert innerhalb der Bandbreite lag, aus. Diese scheinen jedoch bei den Bandbreiten-Gruppen zu einer positiven Verstärkung zu führen und eine reduzierte Bewegungskorrektur zu implizieren (Agethen, 2015, S. 85–87; Lee & Carnahan, 1990, S. 785-789; Marschall, Bund & Wiemeyer, 2007, S. 84). Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese Effekte nur in frühen Retentions-Tests überprüft wurden. Lediglich in den Experimenten von Butler und Fischman (1996) wurden späte Retentions-Tests durchgeführt, in denen jedoch die Effekte, welche in frühen Retentions-Tests noch gefunden wurden, nicht mehr nachweisbar waren (Agethen, 2015, S. 87; Butler & Fischman, 1996).

Dennoch fassen Wulf und Shea zusammen, dass die Vorteile des Bandbreiten-Feedbacks darin liegen, dass es die Steigerung der Ergebniskonstanz in Aneignungsphasen, sowie eine stabilere Leistung in Retentionstests begünstigt, da es zu einem reduzierten Auftreten von *maladaptive short-term corrections* führt (Wulf & Shea, 2004, S.129).

In einer neueren Untersuchung konnten darüber hinaus automatisierungsförderliche Effekte einer Bandbreiten-Gruppe gegenüber einer Yoked-Gruppe aufgezeigt werden. Die Vorteile des Bandbreiten-Feedbacks schreiben die Autoren der Kombination aus reduzierter Häufigkeit quantitativen Feedbacks und positivem qualitativem Feedback zu (Agethen, 2015; Agethen & Krause, 2016). Für diese Arbeit ist vor allem interessant, dass die Bandbreiten-Gruppen gegenüber den Yoked-Gruppen, von denen sie sich nur durch das zusätzliche qualitativ positive Feedback unterscheiden, Lernvorteile bezüglich der Ergebniskonstanz und der Automatisierung zeigen.

### 2.3.3.5 Normatives Feedback

Eine weitere Möglichkeit dem Feedback eine positive oder negative Valenz zu geben, ist das sogenannte normative bzw. social-comparative Feedback. Dabei wird den Versuchspersonen, ergänzend zur gewöhnlichen Fehlerrückmeldung, ein normativer Referenzwert mitgeteilt. Dieser stellt in der Regel die Leistung einer Peer-Gruppe zum gleichen Lernzeitpunkt dar und gibt den Probanden somit die Möglichkeit, ihre eigene Leistung mit der Anderer zu vergleichen. Im Kontext der Anspruchsniveausetzung könnte der Referenzwert also die Bewertung der Zielerreichungsdiskrepanz und die darauf aufbauende Anpassung des Anspruchsniveaus beeinflussen. In den vorliegenden Untersuchungen wurde dieser Referenzwert jedoch nicht wahrheitsgemäß zurückgemeldet, sondern manipuliert, um gezielt positive oder negative Valenzen zu erzeugen. In der Regel wird der Bezugswert auf Basis der individuellen Leistung der Versuchsperson so berechnet, dass er über oder unter dieser liegt. Die Probanden der worse-Gruppen bekommen also regelmäßig die Rückmeldung, dass ihre eigene Leistung schlechter ist, als die der Referenzgruppe. Den Teilnehmern der better-Gruppen wird eine positive Valenz rückgemeldet, indem ihnen suggeriert wird, dass ihre eigene Leistung überdurchschnittlich ist. Diese Valenzmanipulation scheint einen direkten Effekt auf die Leistungsentwicklung und tendenziell auch auf Automatisierungsprozesse zu haben (Wulf et al., 2010b, S. 79–80).

Den Einfluss normativen Feedbacks auf das motorische Lernen untersuchten erstmals Lewthwaite und Wulf (2010) anhand einer Gleichgewichtsaufgabe. In diesem Experiment sollten die Versuchspersonen lernen, eine instabile Plattform gerade zu halten. Als Feedback wurde den Probanden ein Fehlerscore rückgemeldet, der Aufschluss über die Abweichungen von der Horizontalen gab. In den zwei normativen Gruppen (better und worse) wurde zusätzlich ein Referenzwert genannt, der 20% höher bzw. niedriger als der tatsächliche individuelle Fehlerscore der jeweiligen Versuchsperson lag. Den Probanden in der better-Gruppe wurde somit suggeriert, dass sie überdurchschnittlich gut waren. Die Probanden in der worse-Gruppe wurden dadurch so manipuliert, dass sie ihre Leistung als unterdurchschnittlich einschätzten. Im Retentions-Test erzielte die better-Gruppe eine bessere Leistung als die worse- und Kontroll-Gruppe.

Frequenzanalysen zeigten zudem mehr hochfrequente Ausgleichsbewegungen, bei gleichzeitig geringerer Amplitude, der better-Gruppe im Vergleich zu beiden anderen Versuchsgruppen (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 738–744). Die Autoren interpretieren dies als größeren Anteil automatischer Prozesse an der Bewegungskontrolle: „The better group evidenced higher MPFs in retention, indicative of more automatic movement adjustments, than did worse group participants“ (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 744). Bezüglich der mit Hilfe eines Fragebogens erhobenen Motivationsparameter zeigten die Gruppen keine signifikanten Unterschiede (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 743–744).

Die lern- und speziell automatisierungsfördernden Effekte normativ positiven Feedbacks erklären Lewthwaite und Wulf auf motivationaler Ebene, obwohl die Fragebögen keine Unterschiede bezüglich der erhobenen Motivationsparameter feststellen konnten. Sie gehen davon aus, dass negativ normiertes Feedback zu aufgabenbezogenen kognitiven Prozessen führt, die Lern- und Automatisierungsvorgänge hemmen: „Knowing that one’s performance was above average may have alleviated individuals’ performance-related concerns and reduced their active intervention into control processes, thereby allowing automatic processes to govern their balance more effectively“ (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 746). Im Gegensatz dazu scheint das normativ negative Feedback den Aufmerksamkeitsfokus eher auf das Selbst und seine unterdurchschnittliche Leistung gerichtet zu haben (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 746).

Diese Effekte konnten in einem weiteren, ähnlich aufgebauten Experiment repliziert werden. Zusätzlich zeigte dabei die better-Gruppe in einem Transfer-Test unter Dual-Task-Bedingungen ebenfalls bessere Gleichgewichtsleistungen als die worse-Gruppe (Wulf et al., 2010b, S. 80). Wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt, wird mit Doppeltätigkeitstests versucht, den Anteil automatischer Kontrollprozesse zu erheben. Diese Ergebnisse unterstützen also die Annahme, dass nicht nur die Leistungssteigerung, sondern auch Automatisierungsprozesse durch normativ positives Feedback begünstigt werden. Wulf, Shea und Lewthwaite fassen die Befundlage zum normativen Feedback daher folgendermaßen zusammen: „Positive feedback may have a facilitatory effect on learning. Alternatively, negative normative feedback, or no comparison information

(control condition), may trigger thoughts about the self and engage ensuring selfregulatory activities that hamper learning of the primary task“ (Wulf et al., 2010b, S. 80).

Weitere Untersuchungen konnten diese Effekte mit anderen Lernaufgaben und verschiedenen Altersgruppen replizieren (Ávila, Chiviawosky, Wulf & Lewthwaite, 2012; Wulf et al., 2010a; Wulf, Chiviawosky & Lewthwaite, 2012). Wulf und Lewthwaite erklären die lernbegünstigenden Effekte durch verstärkt wahrgenommene Kompetenz, verringerte Bedenken, geringere Nervosität, stärkere Zufriedenheit mit der eigenen Leistung, Lernmotivation und positiven Affekten in Folge normativ positiven Feedbacks (Wulf & Lewthwaite, 2016, S. 1386). Darüber hinaus gehen sie davon aus, dass das normativ negative Feedback selbst-regulatorische Prozesse initiiert, die Aufmerksamkeitskapazitäten für die Verarbeitung selbstzweifelnder Gedanken und negativer Affekte verbrauchen, die dann bei der Verarbeitung aufgabenbezogener Informationen fehlen und Leistungseinbußen zur Folge haben (Wulf et al., 2010a, S. 427).

Diese Argumente bleiben jedoch nur oberflächliche Erklärungsansätze, welche die zu Grunde liegenden Mechanismen unberücksichtigt lassen. Zieht man allerdings die Theorien des impliziten Lernens und des Anspruchsniveaus heran, so lassen sich konkretere Begründungen für die lern- und automatisierungsfördernden Effekte normativ positiven Feedbacks finden: Zunächst einmal kann das normative Feedback dabei helfen, die eigene Leistung zu bewerten (Wulf & Lewthwaite, 2016, S. 1385). Die Theorie des Anspruchsniveaus besagt, dass die Zielerreichungsdiskrepanz anschließend als Erfolg oder Misserfolg bewertet wird und somit Einfluss auf die Anpassung des Anspruchsniveaus für den nächsten Versuch hat. Das Feedback in Form von KR wird genutzt, um die Diskrepanz zwischen Anspruchsniveau und realisierter Leistung zu kalkulieren. Der zusätzliche normative Referenzwert greift an der Stelle der Bewertung dieser Differenz ein und kann, sofern das Feedback ernst genommen wird, positive und negative Valenzen induzieren. Wie bereits dargestellt, gibt die Einschätzung der eigenen Leistung als Misserfolg oder Fehler Anlass für Bewegungskorrekturen. Diese können durch negative Valenzen in Folge negativ normierten Feedbacks herbeigeführt werden. Diese Korrekturbedürftigkeit führt wiederum

zu bewussten Kontroll- und expliziten Lernprozessen, die in der Regel mit *explizitem Hypothesen-Testen* einhergehen und zu *maladaptive short-term corrections* führen können. Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, scheinen diese Prozesse sowohl pauschal für motorisches Lernen, als auch speziell für Automatisierungsprozesse hinderlich zu sein. Das normativ positive Feedback hingegen vermittelt eine positive Valenz, da die Zielerreichungsdiskrepanz als nicht korrekturbedürftig eingeschätzt wird. Die als Erfolg wahrgenommene Bewegungsleistung gibt keinen Anlass für Unzufriedenheit oder explizite Verarbeitungsprozesse zur Fehlerkorrektur. Es entstehen keine zweifelhaften Gedanken über die eigene Leistung, so dass vorrangig implizite, unbewusste Verarbeitungsprozesse in Gang gesetzt werden, die motorisches Lernen in Form von Leistungssteigerungen und Automatisierungsprozessen begünstigen müssten.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.3.2 dargestellten neurophysiologischen Erkenntnisse zur Feedback-Valenz müssten durch die positive Valenz in Folge des normativ positiven Feedbacks somit positive RPEs ausgelöst werden, die wiederum zu Lern- und speziell auch Automatisierungseffekten führen. Die Bedingung für positive RPEs ist allerdings ein unerwartetes Übertreffen der Leistungsvorhersagen. In den vorgestellten Untersuchungen lag der normative Bezugswert jedoch immer unter bzw. über der Leistung der Versuchspersonen. Demnach müsste es an der Stelle im Lernprozess, wo die positiven Rückmeldungen „nur noch“ den Erwartungen entsprechen, zu einem Deckeneffekt kommen und sich keine weitere Leistungssteigerung mehr einstellen. Für eine weitere Leistungssteigerung wäre es günstiger, Lernbedingungen zu schaffen, in denen eine gewisse Ungewissheit über die Normativität bestehen bliebe.

## 2.4 Zusammenfassung und Ableitung der allgemeinen Forschungshypothesen

Aus den bisher vorgestellten theoretischen Grundlagen wird deutlich, dass sowohl die Leistungssteigerung, als auch die Automatisierung, bedeutende Teilaspekte des motorischen Lernens sind (siehe Kapitel 2.1.3). Hochgradig automatisierte Fertigkeiten können aufmerksamkeitsunabhängig kontrolliert werden (siehe Kapitel 2.2.2), so dass gleichzeitig andere, kognitiv anspruchsvolle Aufgaben ausgeführt werden können. Die parallele Ausführung einer zweiten Aufgabe wird daher auch bei der Messung von Automatizität genutzt. Mit Hilfe der Dual-Task-Methodik werden somit die Anforderungen einer Primäraufgabe an die Aufmerksamkeitsressourcen (siehe Kapitel 2.2.1) erhoben (siehe Kapitel 2.2.3). Durch den Prozess der Automatisierung kommt es zu funktionellen Verlagerungen zentralnervöser Aktivitäten und einer zunehmend verringerten Beanspruchung attentionaler Ressourcen für die Bewegungskontrolle (siehe Kapitel 2.2.2.6 bis 2.2.2.8). Motorische Lernprozesse scheinen stark von den Übungsbedingungen abhängig zu sein. Ein bedeutender Faktor ist in diesem Zusammenhang das Feedback, welches im Kontext der Leistungssteigerung bereits intensiv untersucht wurde und auch für Automatisierungsprozesse ausschlaggebend zu sein scheint (siehe Kapitel 2.3). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Rückmeldungen nicht nur auf informationeller, sondern auch auf motivationaler Ebene Einfluss nehmen können, wie Wulf, Shea und Lewthwaite (2010) darstellen: „feedback should not merely be viewed as ‘neutral’ information that is processed – without any affective connotation – with the goal of minimising errors. Rather, the valence of feedback appears to have an influence on motivational processes that, in turn, affect learning” (Wulf et al., 2010b, S. 80). Die Valenz des Feedbacks, welche als die Wertigkeit des Feedbacks mit den Ausprägungsformen positiv und negativ verstanden wird, scheint ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor motorischer Lernprozesse zu sein (siehe Kapitel 2.3.1): Durch die Feedback-Valenz kann die subjektive Leistungsbewertung und die anschließende Anpassung des individuellen Anspruchsniveaus beeinflusst werden. Neurophysiologische Erkenntnisse deuten darauf hin, dass durch positive Valenzen verstärkt erfolgreiche Bewegungsmuster gelernt und in

zentralnervösen Strukturen gespeichert werden, die der automatischen Bewegungskontrolle zugeordnet sind. Negative Valenzen hingegen scheinen bewusste Kontrollprozesse zur gezielten Fehlerkorrektur anzuregen, welche wiederum Lernprozesse behindern (siehe Kapitel 2.3.2). Diese Annahmen konnten durch verhaltensbasierte Untersuchungen bestätigt werden, die Lernvorteile in Form von Leistungssteigerungen durch positiv behaftetes Feedback nachweisen (siehe Kapitel 2.3.3). Diese Studien konnten auch tendenziell automatisierungsfördernde Effekte positiver Feedback-Valenzen aufzeigen. Der direkte Einfluss der Feedback-Valenz auf die Automatisierung motorischer Fertigkeiten wurde bisher jedoch noch nicht untersucht. Wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt, sollte jedoch, um motorisches Lernen in seiner Gesamtheit abbilden zu können, nicht nur das primäre Kriterium der Leistungssteigerung, sondern noch ein weiteres Kriterium herangezogen werden. Aus diesem Grund soll in der folgenden Untersuchung das motorische Lernen sowohl bezüglich des klassischen Kriteriums der Leistungssteigerung, als auch hinsichtlich der Automatisierung untersucht werden. Die dafür herangezogenen, allgemeinen Forschungshypothesen lauten:

*Allgemeine Forschungshypothese I (FH\_I): Üben mit positiver Feedback-Valenz führt zu einer Leistungssteigerung motorischer Fertigkeiten, welche stärker ausfällt, als durch Üben mit negativer Feedback-Valenz.*

*Allgemeine Forschungshypothese II (FH\_II): Üben mit positiver Feedback-Valenz führt zu einer Automatisierung motorischer Fertigkeiten, welche stärker ausfällt, als durch Üben mit negativer Feedback-Valenz.*

### **3 Empirische Untersuchung**

In der vorliegenden Untersuchung soll mit Hilfe der zuvor vorgestellten Forschungshypothesen überprüft werden welchen Einfluss die Feedback-Valenz auf das Erlernen einer beispielhaften motorischen Fertigkeit hat. Als Teilaspekte des motorischen Lernens werden die Automatisierung und die Leistungssteigerung untersucht. Da es sich bei dieser Untersuchung um mehrere aufeinander aufbauende Experimente handelt, wird in Kapitel 3.1 zunächst die allgemeine Untersuchungsmethodik, die übergreifend für alle Experimente gilt, beschrieben und begründet. Das Kapitel 3.2 thematisiert darauf aufbauend das spezielle Untersuchungsdesign. Die für alle Experimente geltenden statistischen Vorüberlegungen, wie bspw. Voraussetzungsprüfungen, Adjustierungen und Drop-Outs, werden in Kapitel 3.3 erörtert. In diesem Zusammenhang werden auch die bei Verwendung der Dual-Task-Methodik spezifischen Voraussetzungen zur Interpretation von Doppeltätigkeitskosten berücksichtigt (Kapitel 3.3.6). Die drei aufeinander aufbauenden Experimente werden in den drei anschließenden Kapiteln 3.4, 3.5 und 3.6 vorgestellt und diskutiert. Eine übergreifende Diskussion der Ergebnisse aller Experimente findet in Kapitel 4 statt.

#### **3.1 Übergreifende Untersuchungsmethodik**

Da sich die drei aufeinander aufbauenden Experimente bezüglich ihrer unabhängigen Variablen und somit auch hinsichtlich der Stichproben und der operationalisierten Forschungshypothesen unterscheiden, werden in den folgenden Unterkapiteln zunächst nur die übergreifenden und in allen Experimenten verwendeten Methoden Aspekte thematisiert.

##### *3.1.1 Lernaufgabe*

Für das vorliegende Experiment wurde eine Armbewegungssequenz mit drei Umkehrpunkten (UKP) als Lernaufgabe ausgewählt, deren Ablauf in Abb. 18 schematisch dargestellt ist. Die zu erlernende Primäraufgabe ist eine Ellenbogen-Extensions-Flexions-Bewegung. Während der gesamten Bewegungssequenz liegt der Unterarm auf einem Armhebel, der in Kapitel 3.1.2 näher be-

schrieben wird. Die Startposition, in welcher der Unterarm parallel zur Schulterachse der Versuchsperson positioniert wird, ist mit  $\alpha = 0^\circ$  definiert. Von dort aus sollen drei Umkehrpunkte angesteuert werden, die bei  $\alpha = 70^\circ$  für den ersten Umkehrpunkt,  $\alpha = 20^\circ$  für den zweiten und  $\alpha = 70^\circ$  für den dritten Umkehrpunkt liegen. Die Bewegungssequenz wird beendet, indem die Endposition, die ebenfalls bei  $\alpha = 0^\circ$  liegt, ohne anzuhalten durchlaufen wird.

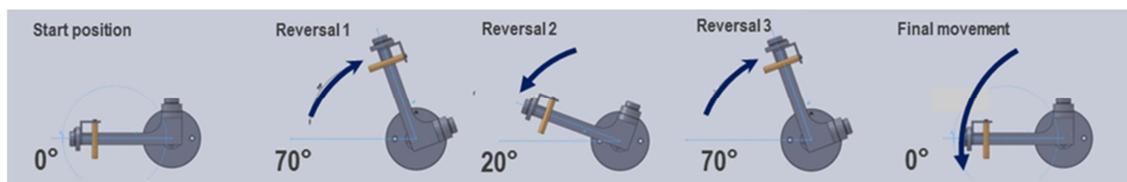


Abb. 18. Schematische Darstellung der Armbewegungssequenz mit der Start- und Endposition bei  $\alpha = 0^\circ$  und den Umkehrpunkten bei  $\alpha = 70^\circ$  (UKP1),  $\alpha = 20^\circ$  (UKP2) und  $\alpha = 70^\circ$  (UKP3) (modifiziert nach Krause et al., 2015, S. 127–128).

Als Zielstellung wird eine möglichst präzise Ansteuerung der Umkehrpunkte angegeben, sowie eine Bewegungsrealisation in unter 1,2 Sekunden. Während der gesamten Aufgabenausführung wird die visuelle Kontrolle der Bewegung durch den Versuchsaufbau mit Hilfe einer Maskierung verhindert (siehe Kapitel 3.1.2) (Agethen & Krause, 2016, S. 75).

Diese Aufgabe wurde aus mehreren Gründen ausgewählt: Das Interesse dieser Untersuchung gilt dem Erlernen von motorischen Fertigkeiten. Deshalb wurde eine Bewegung ausgewählt, für welche die Versuchspersonen keinerlei Vorerfahrungen mitbrachten. Da bei dieser Lernaufgabe das Ziel darin besteht, die Umkehrpunkte möglichst genau anzusteuern, wird die Leistung in Form der Präzisionsleistung erhoben, welche, wie in Kapitel 2.1.2 bereits angedeutet, in der Regel mit Hilfe von Fehlerwerten erfasst wird. Eine genauere Darstellung der Berechnung der abhängigen Variablen *AE* als Leistungsmaß bei dieser Lernaufgabe ist in Kapitel 3.1.5.1 zu finden.

Unter Berücksichtigung des Nebengütekriteriums der Ökonomie wurde bei der Aufgabenwahl eine relativ geringe Komplexität ausgewählt, um eine Leistungssteigerung und Automatisierung auch in relativ kurzer Zeit zu ermöglichen. Diese Entscheidung scheint gelungen, da andere Untersuchungen mit der gleichen Kriteriumsaufgabe eine Automatisierung unter günstigen Übungsbedingungen innerhalb eines Übungszeitraumes von 760 Versuchen an fünf Übungstagen

nachweisen konnten (Agethen & Krause, 2016). Dieser Übungsumfang übersteigt zwar das Ausmaß der meisten anderen Feedback- oder Feedback-Valenz-Untersuchungen deutlich, dennoch lassen sich, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, Automatisierungsprozesse nur in Verbindung mit hohen Übungsumfängen realisieren. Da die Automatisierung als bedeutender, jedoch bisher oft vernachlässigter Teilaspekt des motorischen Lernens angesehen wird, steigt durch die Erfassung der Automatisierung die externe Validität dieser Untersuchung. Da Bewegungen in Sport und Alltag hauptsächlich schnell und gleichzeitig präzise ausgeführt werden müssen und nicht durch visuelle Eigeninformationen kontrolliert werden, steigt die externe Validität dieser Lernaufgabe ebenfalls, da sie eben diese Kriterien erfüllt.

Zu Gunsten der internen Validität wurde die Bewegung unter Laborbedingungen untersucht, um denkbare Störvariablen gering zu halten und mögliche Effekte auf Seiten der abhängigen Variablen durch den Einfluss der unabhängigen Variablen erklären zu können. Durch die visuelle Maskierung ist es unmöglich visuelle Eigeninformationen über den Bewegungsverlauf und -erfolg zu erfassen. Infolgedessen kann der Rückmeldung von Fremdinformationen eine große Bedeutung für das motorische Lernen zukommen und ihr Einfluss gezielt untersucht werden. Aufgrund des Versuchsaufbaus und der Messtechnik kann die Leistung präzise ermittelt und das gewünschte Feedback softwarebasiert schnell und objektiv, da frei von den Einflüssen durch den Versuchsleiter, rückgemeldet werden. Außerdem ist der Versuchsaufbau günstig, um den Automatisierungsgrad zu erheben, da nur der rechte Arm als Effektor benötigt wird und die linke Hand zur Eingabe der Reaktionen auf eine Sekundäraufgabe genutzt werden kann.

### 3.1.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Armbewegung wurde an einem Unterarmhebel durchgeführt, der in Abb. 19 dargestellt ist.

Theoretisch lässt der Armhebel Bewegungen in horizontaler und vertikaler Ebene zu. Für die hier ausgewählte Lernaufgabe sind jedoch nur Bewegungen in

der Horizontalebene notwendig, so dass die nicht relevante horizontale Achse fixiert wurde. Das Bewegungsausmaß in der Horizontalebene wurde durch den Versuchsaufbau auf einen maximal möglichen Winkel von  $\alpha = 110^\circ$  begrenzt. Der flexibel einstellbare Griff wurde auf mittlerer Position in der Horizontale arretiert. Durch das Ausziehen des Griffstückes lässt sich der Hebel auf die Unterarmlänge der jeweiligen Versuchsperson anpassen (Agethen, 2015, S. 139).

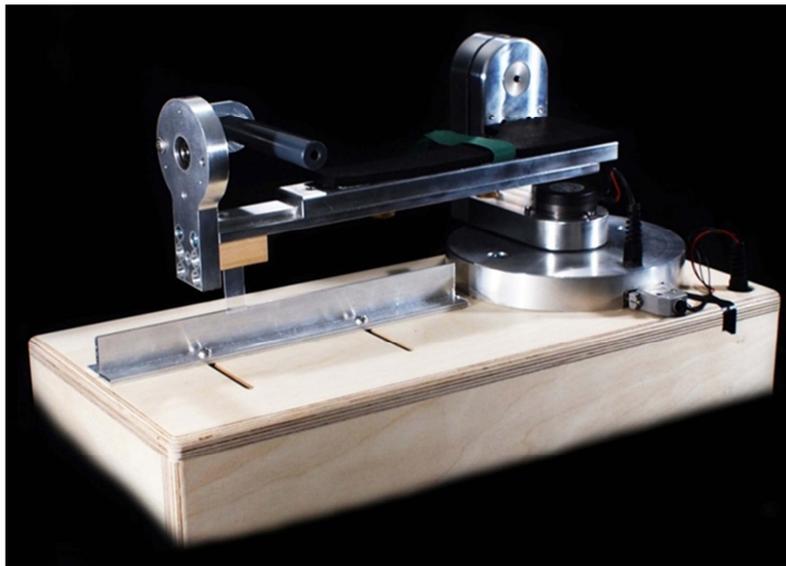


Abb. 19. Der verwendete Unterarmhebel mit horizontaler Griffposition (modifiziert nach Agethen & Jasarovski, 2011, S. 85).

Der Hebel ist auf einer Holzkonsole montiert, die mit zwei Aluminium-L-Profilen ausgestattet ist, welche auf Höhe der Startposition bei  $\alpha = 0^\circ$  mit 2 mm Abstand angebracht sind. Sie dienen als Hilfestellung beim Einnehmen der Startposition, indem ein unter dem Hebel angebrachter Polyethylenstreifen hör- und spürbar zwischen den beiden Profilen eingerastet werden kann (Agethen & Jasarovski, 2011, S. 89).

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 20 zu sehen. Eine hölzerne Verkleidung wurde genutzt, um eine visuelle Bewegungskontrolle zu verhindern. Durch eine Öffnung an der Oberseite der Maskierung ist es möglich, die Hebelarmlänge einzustellen und den Unterarm der Versuchsperson mit Hilfe von Klettbandern am Hebel zu fixieren. Während der Bewegungsausführungen wurde diese Öffnung mit einer entsprechenden Abdeckung geschlossen gehalten. Die Holzverkleidung dient ebenfalls als Podest für den Monitor, der somit auf Augenhö-

he der Probanden steht. Links neben der visuellen Maskierung ist eine gängige Computer-Tastatur positioniert, die den Probanden als Eingabeinstrument dient (Agethen & Jasarovski, 2011, S. 87–88).



Abb. 20. Versuchsaufbau mit Unterarmhebel auf Holzkonsole, visueller Maskierung, Monitor und Tastatur (modifiziert nach Agethen & Jasarovski, 2011, S. 89).

Die Probanden setzen sich frontal vor den Armhebel auf einen höhenverstellbaren Drehstuhl, so dass der rechte Unterarm auf dem Hebel aufliegt und das Griffstück mit der Hand umfasst werden kann. Die Länge des Armhebels wird so eingestellt, dass die Drehachse des Hebels mit der Drehachse des Ellenbogengelenks übereinstimmt. In dieser Positionierung wird der Arm der Versuchsperson mit zwei Klettstreifen am Hebel fixiert.

Die Höhe des Drehstuhls wird so gewählt, dass der Winkel zwischen Rumpf und Oberarm, von hinten betrachtet,  $90^\circ$  beträgt. Seitlich werden die Probanden so ausgerichtet, dass der Winkel zwischen Schulterachse und Oberarm, von oben betrachtet,  $130^\circ$  beträgt. Daraus ergibt sich die in Abb. 21 dargestellte Positionierung, die der Startposition mit  $\alpha = 0^\circ$  mit dem Unterarm parallel zur Schulterachse entspricht. Zusätzlich wurden den Versuchspersonen schalldämpfende Kopfhörer aufgesetzt, um einerseits akustische Start- und Stopp-Signale zu präsentieren und andererseits Umgebungsgeräusche zu minimieren sowie den Anlass für Gespräche mit dem Versuchsleiter zu unterbinden.

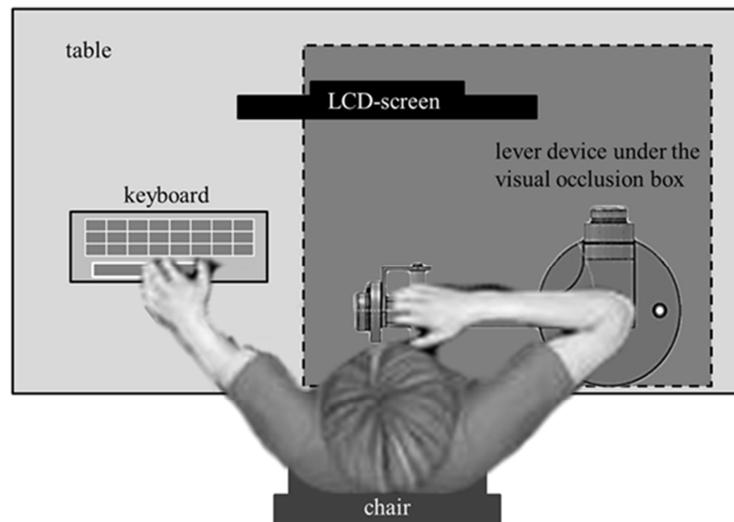


Abb. 21. Versuchsaufbau mit Unterarmhebel, visueller Maskierung, Monitor und Tastatur, sowie die Positionierung der Probanden aus der Ansicht von oben (modifiziert nach Agethen & Krause, 2016, S. 74).

Zur Messung des Winkels  $\alpha$  wurde ein lineares Drehpotentiometer (P6501, Novotechnik) verwendet, welches an der vertikalen Drehachse des Unterarmhebels angebracht wurde. Es wurde mit einer konstanten Eingangsspannung eines Labornetzgerätes mit galvanischer Trennung gespeist. Der Winkel des Unterarmhebels ist proportional zur am Potentiometer abfallenden Spannung. Diese wird mit Hilfe eines Analog-Digital-Umsetzers (Advantech USB 4716) in einen Computer eingelesen. Dort werden die Spannungssignale in der Software Dasy Lab 10.0 in entsprechende Winkel transformiert und an die Kalibrierung der  $0^\circ$ -Position angepasst. Während des gesamten Untersuchungsablaufes wird Dasy Lab von der speziell zu diesem Zweck entwickelten Software PaDuTaS (Paderborner Dual-Task-Software) kontrolliert. PaDuTaS integriert dabei Funktionen, wie erste Auswertungsschritte und die Datenaufzeichnung, die Bereitstellung der Sekundäraufgabe und deren zeitliche Koordination mit der Primäraufgabe sowie die Einblendung des Feedbacks (Agethen & Krause, 2016, S. 74).

### 3.1.3 Sekundäraufgabe

Als Sekundäraufgabe wurde für diese Untersuchung eine sogenannte n-Back-Aufgabe ausgewählt, die bereits in einigen anderen Untersuchungen erfolgreich zur Erfassung des Automatisierungsgrades eingesetzt wurde (Agethen & Krause,

2016, S. 75). Die Entscheidung für diese Sekundäraufgabe lässt sich anhand der in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Kriterien begründen: Für den Zweck dieser Untersuchung war es nicht von Interesse Aufmerksamkeitsschwankungen in bestimmten Phasen der Primäraufgabe zu identifizieren, sondern vielmehr deren globale Kapazitätsanforderungen zu erfassen. Aus diesem Grund wurde mit der n-Back-Aufgabe eine kontinuierliche Sekundäraufgabe ausgewählt. Somit ist es möglich, die Aufmerksamkeitsverteilung auf Primär- und Sekundäraufgabe konstant abzubilden, um infolgedessen auf den Automatisierungsgrad der Primäraufgabe schließen zu können. Da die Aufmerksamkeit und das Arbeitsgedächtnis in dieser Arbeit modular verstanden werden, war es notwendig, eine Sekundäraufgabe mit hoher struktureller Interferenz zur Primäraufgabe zu finden, damit beide Aufgaben auf die gleichen Verarbeitungskapazitäten zurückgreifen. Es wird angenommen, dass die hier ausgewählte motorische Primäraufgabe vorrangig räumlich repräsentiert ist und ggf. weitere bspw. kinästhetische Repräsentationsanteile ausgebildet sind. In diesem Sinne würde die Primäraufgabe, dem Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley entsprechend (siehe Kapitel 2.2.1.4), die verschiedenen Anteile und entsprechenden Ressourcen des *visuospatial sketchpad* beanspruchen. Die für diese Untersuchung verwendete n-Back-Aufgabe hat eine visuell-räumliche Struktur und müsste demnach zumindest ebenfalls auf die räumlichen Kapazitäten des *visuospatial sketchpads* zurückgreifen. Darüber hinaus sind durch beide Aufgaben ebenfalls Interferenzen in der *central executive* und den zugehörigen Kapazitäten des *episodic buffer* zu vermuten. Auch in Bezug auf das Modell von Wickens (siehe Kapitel 2.2.1.3) müssten die Kontrollprozesse der Armhebelsequenz und der n-Back-Aufgabe in beiden Fällen den räumlichen Verarbeitungscodes zuzuordnen sein. Im Zusammenhang mit dem *parallel neural network model* (siehe Kapitel 2.2.2.6) müssten vor allem in frühen bis mittleren Lernphasen Interferenzen zwischen Bewegungssequenzen und visuell-räumlichen Sekundäraufgaben auftreten, da beide in diesem Lernstadium räumlich kodiert sind und gleiche neuronale Regelkreise beanspruchen müssten.

Die physischen Störungen, vor denen Ogden warnt, werden durch die Kombination der Armhebel- und n-Back-Aufgabe möglichst gering gehalten: Sensori-

sche Störungen können ausgeschlossen werden, da die Sekundäraufgabe zwar visuell wahrgenommen wird, eine visuelle Kontrolle der Armbewegungssequenz durch die Maskierung jedoch verhindert wird. Eine Störung des motorischen Systems wird dadurch verhindert, dass für die Eingabe der Antworten für die n-Back-Aufgabe die linke Hand und für die Ausführung der Primäraufgabe der rechte Arm verwendet wird.

Die in dieser Untersuchung verwendete n-Back-Aufgabe wurde auf dem Monitor (siehe Abb. 20) dargestellt. Dabei wurden gelbe Rechtecke an verschiedenen Positionen innerhalb einer 3x3 Matrix in randomisierter Reihenfolge präsentiert (siehe Abb. 22).

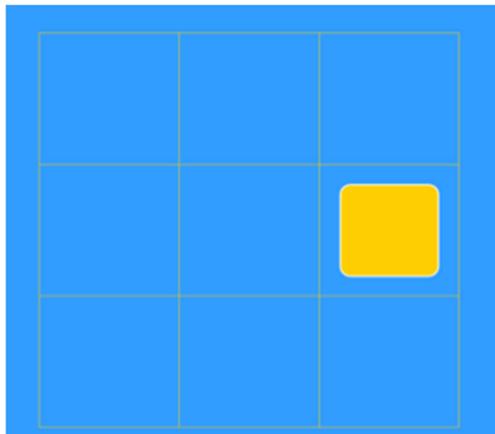


Abb. 22. Darstellung der 3x3-Matrix und des Stimulus (gelbes Rechteck) während der n-Back-Aufgabe in PaDuTaS (modifiziert nach Agethen & Jasarovski, 2011, S. 100).

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin die Position des aktuell präsentierten Rechtecks mit dem „n“ Stimuli zurückliegenden Rechteck zu vergleichen. Bei einer Übereinstimmung dieser Positionen (match), musste das match durch das Betätigen der Leertaste mit der linken Hand bestätigt werden. In diesem Experiment wurde eine 2-Back-Aufgabe verwendet. Das bedeutet, dass die Versuchspersonen die Position des aktuellen Rechtecks mit der des vorletzten Rechtecks vergleichen mussten. Pro Durchgang wurden neun Stimuli präsentiert, wovon mindestens zwei, aber maximal fünf und somit ca. 33% matches waren. Durch die Software PaDuTaS wurden sowohl die Aufgabe präsentiert als auch die Ergebnisse erfasst: Neben den korrekt bestätigten matches wurden auch alle Entscheidungsfehler durch falsche Bestätigungen oder das

Auslassen von matches dokumentiert. Die Stimuli wurden immer 500 ms lang präsentiert. Die Intervalllänge zwischen den Stimuli betrug 700 ms oder 1000 ms. Die Interstimulus-Dauer wurde dabei pseudo-randomisiert, um eine integrative Aufgabenbearbeitung zu verhindern (Agethen, 2015, S. 136–137).

### 3.1.4 Test

Um Aufschluss über den Grad des motorischen Lernens zu erhalten, sollten in diesem Experiment, entsprechend der allgemeinen Forschungshypothesen, die Teilaspekte Leistungssteigerung und Automatisierung erhoben werden. Beide Parameter wurden in einem Testverfahren ermittelt, welches aus insgesamt drei Testbedingungen besteht:

- Sekundäraufgabe (n-Back-Aufgabe) unter Single-Task-Bedingung
- Primäraufgabe (Armhebelaufgabe) unter Single-Task-Bedingung
- Primär- und Sekundäraufgabe unter Dual-Task-Bedingung

Insgesamt wurde jede Bedingung sechs Mal ausgeführt. Um Aufwärm- und Reihenfolgeeffekte dabei möglichst gering zu halten, wurden diese Bedingungen ineinander verschachtelt (Schmidt & Lee, 2011, S. 477–478), so dass der konkrete Ablauf des Tests, wie in Tab. 3 dargestellt, aussah.

Tab. 3. Testablauf

Einzel-/Doppeltätigkeit	Aufgabentyp	Aufgabe	Anzahl der Versuche
Single-Task	Sekundäraufgabe	n-Back	3
Single-Task	Primäraufgabe	Armhebel	3
Dual-Task	Primär- und Sekundäraufgabe	n-Back + Armhebel	6
Single-Task	Sekundäraufgabe	n-Back	3
Single-Task	Sekundäraufgabe	n-Back	3

In der Doppelaufgabenbedingung wurden beide Aufgaben gleichzeitig ausgeführt. Die Versuchspersonen wurden dabei im Sinne des *Secondary-Task-Paradigms* instruiert, die Primäraufgabe zu priorisieren. Die Primäraufgabe sollte somit unter Single- und Dual-Task-Bedingung auf einem vergleichbaren Leistungsniveau ausgeführt werden. Nur so ist es möglich, die Anforderungen, welche die Primäraufgabe an die attentionalen Ressourcen stellt, anhand der Doppeltätigkeitskosten auf Seiten der Sekundäraufgabe zu ermitteln (siehe Kapitel 2.2.3). Die Ergebnisse der Überprüfung, ob die Priorisierung in diesem Experiment gelungen ist, sind in Kapitel 3.3.6 zu finden.

Der zeitliche Ablauf der Dual-Task-Bedingung ist in Abb. 23 zu sehen:

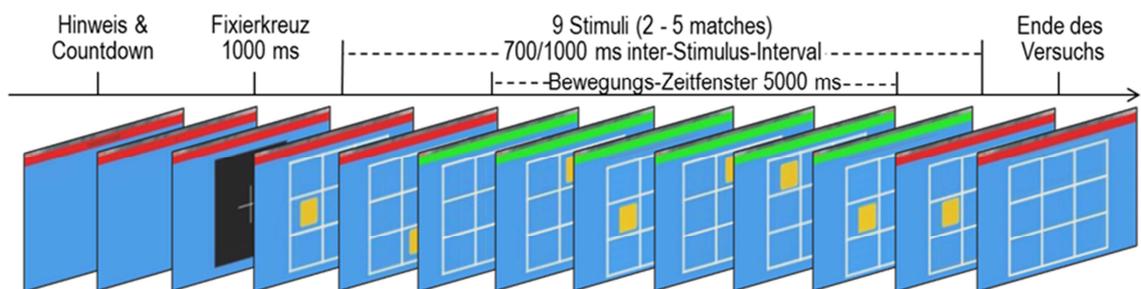


Abb. 23. Ablauf des Doppeltätigkeitstests (modifiziert nach Agethen & Krause, 2016, S. 76).

Nach der Anzeige der Testbedingung und eines Countdowns von 3 auf 1 wurde ein Fixierkreuz mit einer Dauer von 1000 ms eingeblendet. Anschließend startete die Sekundäraufgabe. Bei einem visuellen (roter Balken wird grün) und akustischen Startsignal (einmaliges Klingeln) konnte mit der Armbewegungsaufgabe begonnen werden. Die Bewegungsaufgabe musste innerhalb eines Zeitfensters von fünf Sekunden beendet werden. Das Ende des Bewegungsfensters wurde ebenfalls durch ein visuelles (grüner Balken wird wieder rot) und akustisches Signal (zweimaliges Klingeln) verdeutlicht. Die Sekundäraufgabe lief während des gesamten Bewegungsfensters weiter und musste parallel bearbeitet werden (Agethen, 2015, S. 152–153; Agethen & Krause, 2016, S. 75). Die Lautstärke des akustischen Signals wurde für alle Test- und Übungsbedingungen konstant gehalten. Um eine schreckhafte Reflexreaktion auf das akustische Signal zu verhindern, wurde ein Lautstärkepegel von maximal 35 dB gewählt.

Akustische Schreckreaktionen werden erst ab ca. 80 dB erwartet (Ramirez-Moreno & Sejnowski, 2012, S. 169).

Unter Einzeltätigkeit wurde dieser zeitliche Ablauf exakt beibehalten, um die dabei gewonnenen Daten mit den unter Doppeltätigkeit gemessenen Ergebnissen vergleichen zu können. Lediglich die Präsentation und Aufforderung zur Ausführung der zweiten Aufgabe wurde jeweils ausgelassen.

In Kapitel 2.2.3 wurde darüber hinaus angesprochen, dass nicht nur die Automatisierung motorischer Fertigkeiten, sondern auch die integrative Aufgabebearbeitung eine Erklärung für reduzierte Doppeltätigkeitskosten sein kann. Es wird daher empfohlen, Doppeltätigkeitstests nur so häufig wie nötig durchzuführen und deren Reliabilität durch Transfertests mit anderen Sekundäraufgaben oder einer Kontrollgruppe zu überprüfen. Für diese Untersuchung wurde daher eine methodische Kontrollgruppe eingesetzt (siehe Kapitel 3.2.2), um die Validität der Doppeltätigkeitstests zu kontrollieren. Die Ergebnisse der Validitätsprüfung sind vorab in Kapitel 3.3.6 nachzulesen.

### 3.1.5 *Abhängige Variablen*

Für jede der allgemeinen Forschungshypothesen wurde jeweils eine abhängige Variable bestimmt: Um entsprechend der allgemeinen Forschungshypothese I die Leistungssteigerung zu ermitteln, wird der absolute Fehler (absolute error = *AE*) der Umkehrpunkte in der Einzeltätigkeitsbedingung als Maß für die Präzisionsleistung berechnet. Für die Überprüfung der Leistungssteigerung wird der *AE* nur unter Einzeltätigkeit herangezogen, um mögliche Konfundierungen durch Automatisierungsprozesse zu verhindern, die in der Doppeltätigkeitsbedingung vorliegen könnten.

Die abhängige Variable, welche für die allgemeine Forschungshypothese II von Interesse ist, sollte in der Lage sein, den Automatisierungsgrad zu beschreiben. Zu diesem Zweck wird pro Testbedingung der Median aller Entscheidungsfehler bei der *n*-Back-Aufgabe (*n*-Back-Fehler) herangezogen. Die konkrete Berechnung der beiden abhängigen Variablen und die Begründung für die Auswahl ist den zwei folgenden Unterkapiteln zu entnehmen.

Zur Beschreibung der Variabilität wird in den Ergebnisdarstellungen ergänzend die Standardabweichung (SD) angegeben. Sie besitzt die gleiche Einheit wie die Messwerte und kann somit direkt in Beziehung zu diesen gesetzt werden. Die Standardabweichung kann „als eine ‚repräsentative‘ Abweichung vom Zentrum der Verteilung interpretiert werden“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 31) und gibt somit Aufschluss über die Streuung der vorliegenden Messwerte.

#### 3.1.5.1 Der absolute Fehler (*AE*)

Um den absoluten Fehler einer Testbedingung zu berechnen, wird zunächst die absolute Abweichung zwischen dem vorgegebenen Ziel-Umkehrpunkt und dem tatsächlich angesteuerten Umkehrpunkt berechnet. Diese absoluten Abweichungen werden dann für alle drei Umkehrpunkte pro Bewegungsausführung und über alle sechs Versuche eines Testblocks gemittelt. Dabei wird das arithmetische Mittel verwendet, so dass sich daraus der absolute Fehler (*AE*) ergibt. Nach Schmidt und Lee ist der absolute Fehler gut geeignet, um die globale Genauigkeit einer Leistung abzubilden. Der *AE* kann sozusagen als mittlere absolute Abweichung angesehen werden. Er gibt also keinen Aufschluss über die Richtung der Abweichung, da die Vorzeichen vor der Mittelwertbildung entfernt werden (Schmidt & Lee, 2011, S. 30). Für die Prüfung der vorliegenden Hypothese ist die Richtung der Abweichungen nicht von Bedeutung. Um, wie in der Hypothese gefordert, eine Aussage über die Leistungssteigerung treffen zu können, ist vielmehr ein Maß für die allgemeine Genauigkeit notwendig. Für diesen Zweck ist der *AE* ein geeignetes Leistungsmaß, da er eine generelle Aussage über das Gesamtausmaß der Fehler ermöglicht (Magill, 2014, S. 33). Ein Nachteil des arithmetischen Mittels liegt darin, dass es Ausreißerwerten bei einer kleinen Anzahl von Messwerten eine starke Gewichtung gibt (Bortz & Schuster, 2010, S. 26; Bühner & Ziegler, 2009, S. 40). Da in diesem Falle die absoluten Abweichungen von drei Umkehrpunkten für jeweils sechs Bewegungsausführungen in die Berechnung des *AE* eingehen, ist eine ausreichende Anzahl an Messwerten vorhanden, um das arithmetische Mittel zur Berechnung des *AE* heranzuziehen.

### 3.1.5.2 Der *n*-Back-Fehler

Um den *n*-Back-Fehler zu bestimmen, wurde zunächst die Anzahl der Entscheidungsfehler jedes Versuches bestimmt. Pro Testbedingung wurde anschließend der Median der Entscheidungsfehler berechnet.

Für diese Untersuchung fiel die Entscheidung für das Maß der zentralen Tendenz nicht wie so häufig auf das arithmetische Mittel, sondern auf den Median. Als Grund dafür ist anzugeben, dass das arithmetische Mittel sehr anfällig für Extremwerte ist (Bortz & Schuster, 2010, S. 26): „Ein großer Nachteil des Mittelwerts ist jedoch seine Empfindlichkeit gegenüber Ausreißerwerten“ (Bühner & Ziegler, 2009, S. 40). Diese erhalten eine besonders starke Gewichtung, wenn nur wenige Messwerte in die Berechnung eingehen. Bühner und Ziegler empfehlen für diesen Fall auf den Median zurückzugreifen (Bühner & Ziegler, 2009, S. 40). Im Falle der *n*-Back-Aufgabe, wie sie in dieser Untersuchung verwendet wird, liegen nur sechs Messwerte pro Testbedingung vor. Ausreißer würden den Mittelwert somit stark beeinflussen. Der Median steigert folglich die Schärfe der Messung und wurde aus diesem Grund dem Mittelwert vorgezogen.

### 3.1.6 Stichprobe

Von den 87 Versuchspersonen, die zumindest teilweise an dem Experiment teilgenommen hatten, wurden letztendlich 70 in die Auswertung eingeschlossen. Die Erklärung für die Drop-Outs ist in Kapitel 3.3.2 nachzulesen. Im Durchschnitt waren die Probanden 22,1 Jahre alt (SD = 3,0) und entweder Sportstudierende oder in ihrer Freizeit Sporttreibende. 32 der Versuchspersonen waren weiblich und 38 männlich. In jeder Versuchsgruppe waren jeweils sechs Frauen und acht Männer. Die Händigkeit der Probanden wurde mit Hilfe der deutschen Version des Edinburgh Handedness Inventory (Büsch, Hagemann & Bender, 2010) erfasst (siehe Anhang IV). Insgesamt nahmen 62 Rechtshänder, sechs Linkshänder und zwei beidhändig veranlagte Teilnehmer an der Untersuchung teil. Aufgrund ihrer Prä-Test-Ergebnisse, sowie des Geschlechts und der Händigkeit wurden die Probanden parallelisiert und einer von fünf Experimentalgruppen zugeteilt. Jede Versuchsgruppe bestand somit aus 14 Teilnehmern.

Nähere Informationen zum Vorgang der Parallelisierung sind dem Kapitel 3.3.3 zu entnehmen. Alle Probanden wurden vor Beginn der Untersuchung über die Freiwilligkeit und den Zweck der Untersuchung aufgeklärt (siehe Anhang I bzw. II). Vor Beginn der Untersuchung wurde sichergestellt, dass keiner der Probanden physischen Beeinträchtigungen der oberen Extremitäten unterlag und im Falle einer Einschränkung des Sehvermögens eine entsprechende Sehhilfe getragen wurde (siehe Anhang IV). Vor dem Start der Untersuchung unterschrieben die Versuchspersonen eine Einwilligungserklärung (siehe Anhang III).

Eine Berechnung der Stichprobengröße wurde a priori nicht durchgeführt, da für diesen Zweck bereits vor Beginn der Untersuchung festgelegt werden müsste, wie groß der zu erwartende Effekt sein wird (Bühner & Ziegler, 2009, S. 197). Da in dem Forschungszusammenhang von Feedback-Valenz und Automatisierung motorischer Fertigkeiten bisher keine Untersuchungen vorliegen, kann a priori keine Aussage dazu getroffen werden, welche Effektstärken zu erwarten sind oder welche eine praktische Bedeutsamkeit hätten. Aus diesem Grund orientierte sich die Wahl der Stichprobengrößen an den Teilnehmerzahlen der Versuchsgruppen vorausgegangener Experimente mit der gleichen Lernaufgabe und ähnlichen abhängigen Variablen (bspw. Agethen & Krause, 2016).

Das Untersuchungsvorhaben wurde vorab durch die Ethik-Kommission der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGPs) sorgfältig geprüft und in der hier beschriebenen Form als ethisch unbedenklich bewertet.

## **3.2 Untersuchungsdesign**

Da es bisher noch keine Studien gibt, die den Einfluss der Feedback-Valenz sowohl auf die Leistungssteigerung, als auch auf die Automatisierung motorischer Fertigkeiten erforscht haben, wurde für die vorliegende Untersuchung ein spezielles, prozessartiges Untersuchungsdesign entwickelt, bei dem, auch aus ökonomischen Gründen, der weitere Untersuchungsverlauf in Abhängigkeit vom Ergebnis des jeweils vorausgehenden Experiments bestimmt wird. Die geplante Reihung der möglichen Telexperimente ist in Abb. 24 schematisch dargestellt.

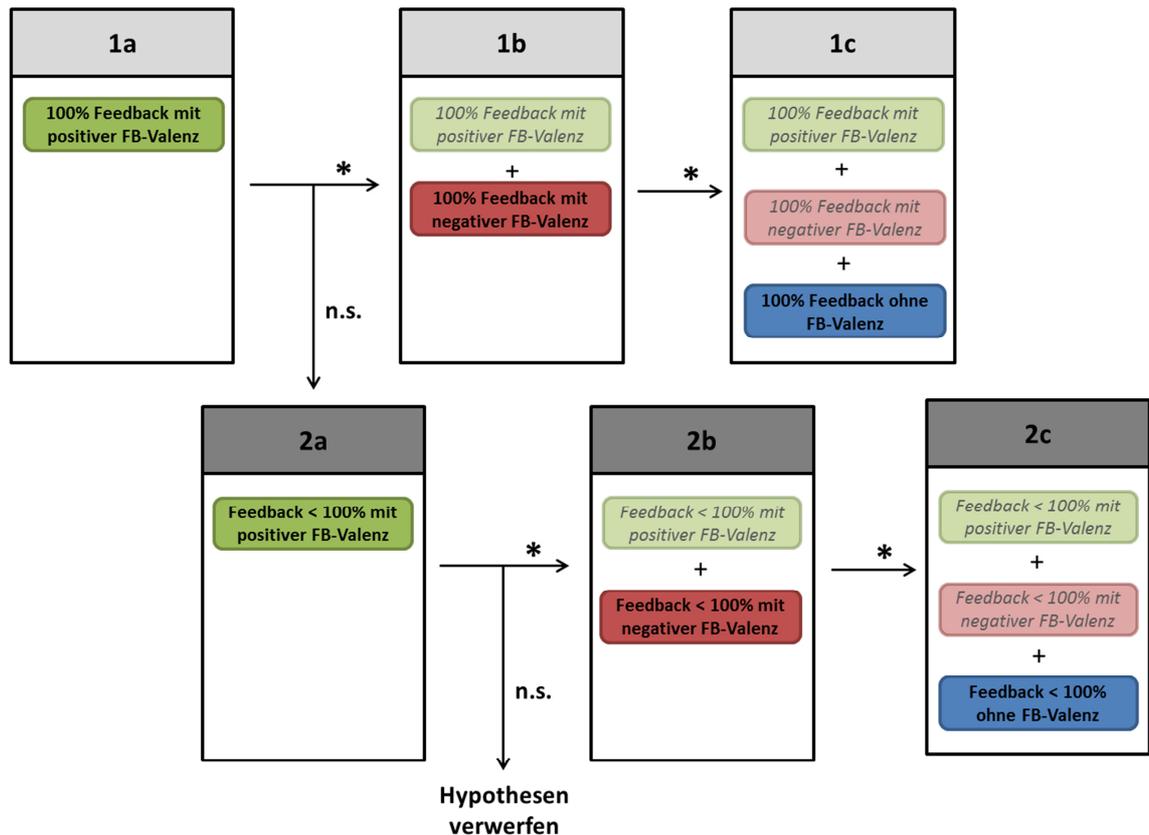


Abb. 24. Planung des prozessartigen Untersuchungsdesigns mit den möglichen Teilerperimenten. Die transparent dargestellten Versuchsgruppen werden jeweils aus dem vorhergehenden Experiment herangezogen. Die Entscheidung für den weiteren Verlauf der Untersuchung hängt von der Signifikanz der beiden Hypothesentests ab.

In dem Experiment 1a soll der erste Schritt für die Untersuchung der Effekte positiver Feedback-Valenz auf das motorische Lernen gemacht werden. Um die Wirkung der positiven Feedback-Valenz zu maximieren, wird in diesem Teilerperiment mit einer Feedbackhäufigkeit von 100% gearbeitet. Obwohl aus vorhergehenden Untersuchungen bekannt ist, dass große Feedbackhäufigkeiten einen hemmenden Effekt auf die Präzisionssteigerung und Automatisierungsprozesse haben können (Agethen & Krause, 2016; Krause et al., 2015, S. 127–128; Marschall, Bund & Wiemeyer, 2007), wird für das erste Teilerperiment dieser Untersuchung eine Rückmeldehäufigkeit von 100% gewählt, um den Einfluss des Treatments zu maximieren.

Sollte in Experiment 1a eine der beiden allgemeinen Forschungshypothesen unterstützt werden können, indem eine signifikante Steigerung der Präzisionsleistung oder Automatisierung nachweisbar ist, so wird im Anschluss mit Expe-

riment 1b fortgefahren. In diesem Experiment soll der Effekt positiver und negativer Feedback-Valenzen miteinander verglichen werden. Sollten sich die Gruppen dabei hinsichtlich der Leistungssteigerung oder Automatisierung unterscheiden, so wird im anschließenden Experiment 1c der Einfluss der Feedback-Valenz mit Hilfe einer Versuchsgruppe ohne gezielte Feedback-Valenz-Manipulation weiter ausdifferenziert. Somit soll aufgeklärt werden, ob valenzabhängige Effekte eher auf den fördernden Einfluss der einen oder den hemmenden Einfluss der anderen Valenzform, oder auf beide zurückzuführen sind.

Sollte in Experiment 1a keiner der beiden Hypothesentests signifikant ausfallen, wird in Experiment 2a die Feedbackhäufigkeit reduziert, um den Einfluss der Feedback-Valenz mit einer reduzierten Rückmeldehäufigkeit auf das motorische Lernen zu überprüfen. Sollten sich bei dieser Feedback-Variante ebenfalls keine signifikanten Lerneffekte bezüglich der Präzision oder Automatisierung aufzeigen, so müssten die aufgestellten allgemeinen Forschungshypothesen verworfen werden, da eine Leistungssteigerung bzw. Automatisierung in Folge der positiven Valenz eine notwendige Voraussetzung zur Bestätigung der allgemeinen Forschungshypothesen ist. Im Falle eines statistisch bedeutsamen Effektes in Experiment 2a wird hingegen mit dem Experiment 2b fortgefahren. In diesem Experiment werden die Effekte der positiven und negativen Feedback-Valenz bei reduzierter Feedbackhäufigkeit miteinander verglichen. Unterscheiden sich die beiden Gruppen hinsichtlich der Leistungssteigerung oder Automatisierung signifikant, so wird das Experiment 2c angeschlossen. Dieses Telexperiment widmet sich abschließend der Gegenüberstellung des reinen Feedbackhäufigkeits-Effektes (ohne zusätzliche Feedback-Valenz-Manipulation) und des Effektes zusätzlicher positiver und negativer Feedback-Valenzen.

In den Telexperimenten 1b und 1c, sowie 2b und 2c wird jeweils nur eine Versuchsgruppe ergänzt, um diese mit der Gruppe bzw. den Gruppen der vorangegangenen Experimente zu vergleichen. Es werden keine Replikationen durchgeführt. Diese, zu Vergleichszwecken aus den vorangegangenen Telexperimenten herangezogenen Versuchsgruppen, sind in den Abbildungen daher leicht transparent dargestellt.

An dieser Stelle wird bereits der tatsächliche Ablauf der Untersuchung vorweggenommen (siehe Abb. 25), um einen Überblick über die letztlich wirklich durchgeführten Teilerperimente zu bieten und auf eine unnötige Beschreibung hypothetischer Versuchsgruppen zu verzichten.

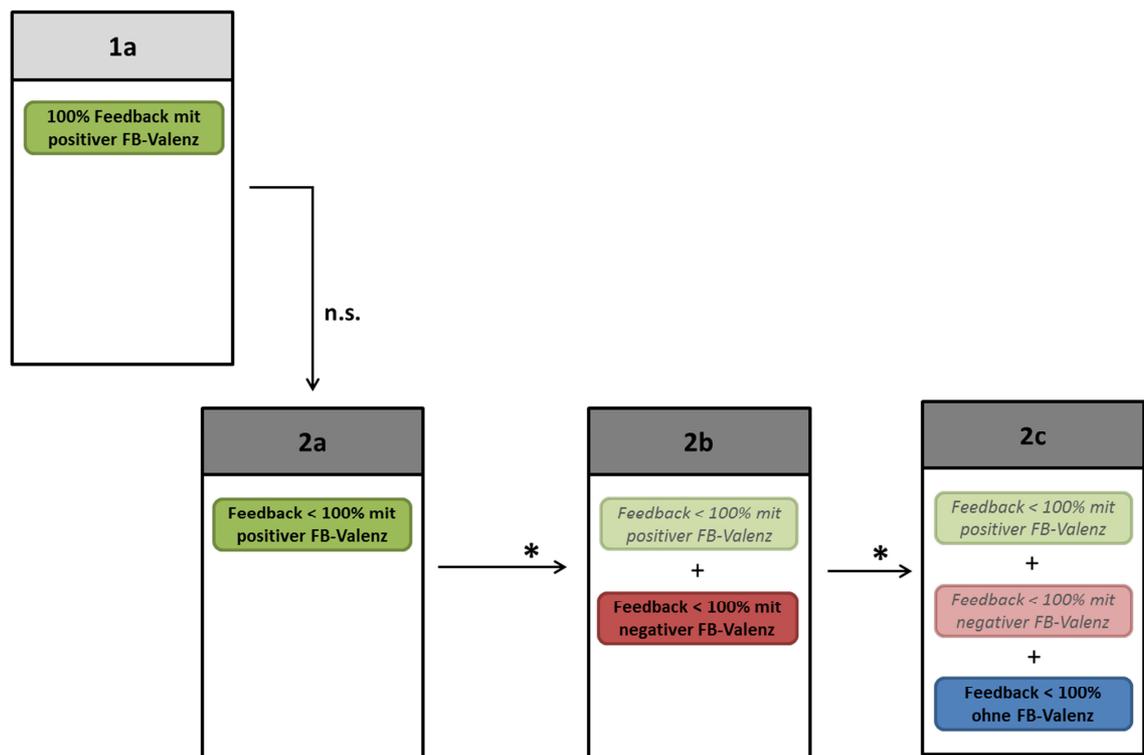


Abb. 25. Resultierendes Untersuchungsdesign mit den tatsächlich durchgeführten Teilerperimenten. Die transparent dargestellten Versuchsgruppen werden jeweils aus dem vorhergehenden Experiment herangezogen.

Um das Untersuchungsdesign vollständig zu beschreiben, muss noch erwähnt werden, dass zur Validierung der Testmethodik eine passive Kontrollgruppe eingesetzt wurde. Die Beschreibung des Untersuchungsablaufes für diese Gruppe ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3.3.6 vorab präsentiert, da sie für die Interpretation der Ergebnisse der Doppeltätigkeitstests aller Interventionsgruppen von Bedeutung sind.

### 3.2.1 Unabhängige Variablen

Insgesamt wurde der Einfluss von vier Feedbackbedingungen untersucht. Zur Operationalisierung der Feedback-Valenz wurde in dieser Untersuchung das normative Feedback herangezogen. Diese Feedbackform ist besonders geeig-

net, um Feedback-Valenz zu operationalisieren, da sie auf Basis der individuellen Leistung der Probanden berechnet wird. Wie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, bezieht sich auch die Valenz auf individuelle Leistungsziele und nicht auf objektive oder externe Leistungsvorgaben. Dieses zentrale Kennzeichen der Valenz wird durch das normative Feedback aufgegriffen, indem die Rechenschritte zur Kalkulation des normativen Bezugswertes zwar für alle Probanden gleich sind, aber die individuelle Leistung als Ausgangspunkt für die Berechnung verwendet wird. Somit wird nicht nur die Richtung der Valenz, sondern auch die Stärke/Höhe der Valenz relativ zur eigenen Leistung der Versuchsperson standardisiert. Dies ist bedeutend, da anscheinend nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke der Valenz ein entscheidender Einflussfaktor sein kann (siehe Kapitel 2.3.1). Andere Operationalisierungsformen der Feedback-Valenz, wie bspw. das Feedback nach gelungenen/misslungenen Versuchen, können weder die Valenzstärke abbilden, noch ein so hohes Maß an Individualität und gleichzeitig Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Probanden schaffen, wie das normative Feedback. Des Weiteren lässt sich das normative Feedback sehr gut in Kombination mit anderen Feedbackbedingungen wie bspw. einer reduzierten Rückmeldehäufigkeit steuern. Andere Valenz-Operationalisierungen, wie die Rückmeldung nach gelungenen/misslungenen Versuchen sind bereits durch die Anwendung des summary-KR konfundiert und untrennbar mit dieser Form der Feedbackhäufigkeitsreduktion verbunden. Das normative Feedback lässt sich jedoch unabhängig von der Rückmeldehäufigkeit regulieren. Darüber hinaus wurde in den einzigen Untersuchungen, die bisher Automatisierungstendenzen durch positive Feedback-Valenzen feststellen konnten, das normative Feedback verwendet (Lewthwaite & Wulf, 2010, Wulf et al., 2010b).

Das normative Feedback bietet somit einige methodische und inhaltliche Vorteile: Es ist standardisierbar, ermöglicht direkte Vergleiche zwischen Versuchspersonen, lässt sich unabhängig von anderen Feedbackbedingungen steuern und bildet das theoretische Konstrukt der Valenz, speziell die Subjektivität der individuellen Leistungsbewertung, genauer ab, als andere Feedback-Valenz-Operationalisierungen. Aus diesen Gründen wurde für die vorliegende Studie

das normative Feedback verwendet, um Feedback-Valenz-Effekte zu untersuchen.

In den vier Telexperimenten wurden vier Interventionsgruppen eingesetzt, die sich in der Feedback-Valenz, operationalisiert durch das normative Feedback, unterscheiden. Wenn im Folgenden von normativem Feedback gesprochen wird, so ist immer die kombinierte Feedbackform aus den realen Fehlerwerten und dem zusätzlichen normativen Bezugswert gemeint. In Experiment 1a wurde eine Gruppe eingesetzt, die zu jedem Versuch normatives Feedback erhielt (*POS100*). In Experiment 2a handelt es sich um eine Interventionsgruppe, der nur zu durchschnittlich 14% der Übungsversuche, verteilt nach einem Fading-Muster, ein normativ positives Feedback präsentiert wurde (*POS14*). Das Gegenstück bildet die Gruppe *NEG14*, die in Experiment 2b hinzukommt. Diese Gruppe erhielt das Feedback nach dem gleichen Verteilungsplan, jedoch war die Normierung negativ. Die letzte Interventionsgruppe ist eine aktive Kontrollgruppe, welche in Experiment 2c hinzukommt (*KGa*). Sie erhält Feedback nur zu den realen Fehlerwerten ohne den zusätzlichen normativen Referenzwert. Das Schema der Feedbackhäufigkeit und -verteilung entsprach dem gleichen Muster wie in den Gruppen *POS14* und *NEG14*.

Wie bereits angesprochen, wurde der normative Bezugswert auf Basis der individuellen Leistung der Versuchspersonen berechnet. Zu diesem Zweck wurde zunächst der absolute Fehler der Umkehrpunkte für einen Block von sechs Versuchen ermittelt. Dieser wurde anschließend um den Faktor 0,4 reduziert (für die *NEG14*) bzw. um 1,5 erhöht (für die *POS100* und *POS14*). Diese Faktoren wurden empirisch, auf Basis der Übungsdaten bereits durchgeführter Experimente, ermittelt. Da bei dem hier verwendeten Feedback die Abweichungen von den Soll-Umkehrpunkten rückgemeldet werden, muss bedacht werden, dass geringe Fehlerwerte eine gute Leistung darstellen. Im Falle des normativ positiven Feedbacks müssten die rückgemeldeten Fehlerwerte demnach sehr häufig geringer sein, als der zusätzlich eingeblendete normative Bezugswert, um eine überdurchschnittliche Leistung zu suggerieren. Genau andersherum gilt es für das normativ negative Feedback: In diesem Fall müssten die rückgemeldeten, tatsächlich produzierten Fehler oft größer sein, als der ergänzend

präsentierte Bezugswert, um infolgedessen den Eindruck einer unterdurchschnittlichen Leistung zu vermitteln. Die Abweichungen von den Soll-Umkehrpunkten, die Berechnung des Referenzwertes und die anschließende Darstellung des Feedbacks geschehen durch die Software PaDuTaS. Die konkrete Feedback-Darstellung für die Interventionsgruppen ist beispielhaft in Abb. 26 zu sehen:

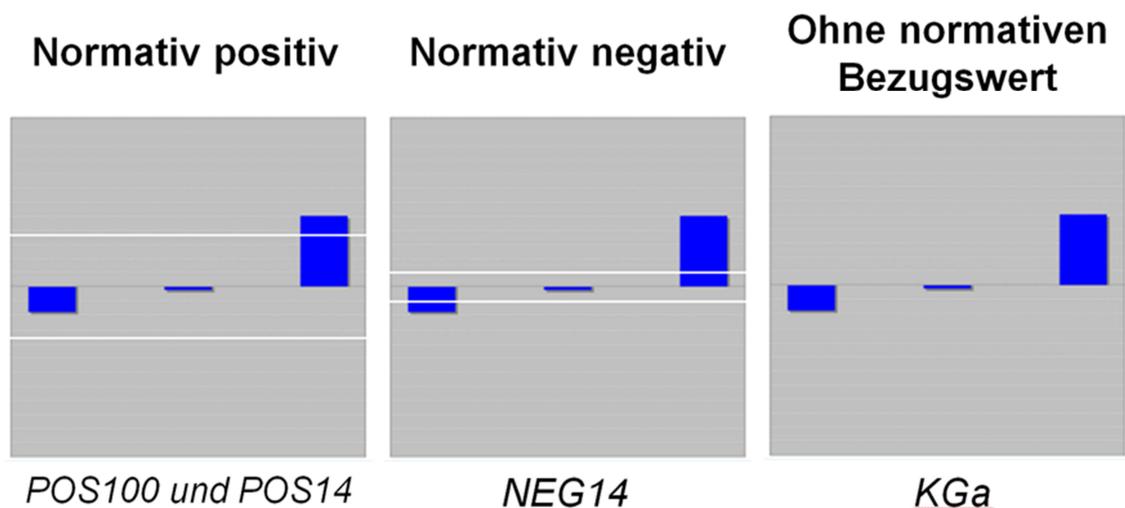


Abb. 26. Exemplarische Darstellung der Feedback-Präsentationen für die Interventionsgruppen.

Die Abweichungen von den Soll-Umkehrpunkten werden in Form eines Balkendiagramms durch die Software PaDuTaS dargestellt. Die Höhe der Balken gibt Aufschluss über das Ausmaß des Fehlers in Grad. Der Richtung der Balken ist zu entnehmen, ob die Soll-Umkehrpunkte über- oder unterschritten wurden. Die Skalierung von maximal  $\pm 20^\circ$  wurde den Versuchspersonen nicht mitgeteilt. Die sich daraus ergebende Rückmeldung entspricht dem Feedback, welches die aktive Kontrollgruppe in Experiment 2c erhielt (siehe rechts in Abb. 26). Der normative Referenzwert wurde mit Hilfe der zuvor beschriebenen Rechenschritte in PaDuTaS kalkuliert und bezieht sich immer auf den zurückliegenden Block von sechs Versuchen. Der Referenzwert bleibt also für sechs Versuche bestehen, bevor er neu berechnet wird. Die normativen Bezugswerte wurden in diesem Experiment durch zusätzlich eingeblendete, weiße Linien dargestellt. Die Bedeutung dieser Linien wurde den Probanden der entsprechenden Versuchsgruppen zuvor mit Hilfe einer Powerpoint-Präsentation in standardisierter Form erläutert (siehe Anhang X bis XVI). Die Referenzwerte wurden in weißer Farbe

präsentiert, um den normativen Bezugswert als möglichst wertfreie, neutrale Information darzustellen. Farben werden oft mit bestimmten Emotionen verbunden und könnten somit möglicherweise zusätzliche, unkontrollierbare Valenzinformationen vermitteln. Weiß scheint jedoch eine neutrale Farbe zu sein, die mit den geringsten affektiven Bedeutungen verbunden ist (Adams & Osgood, 1973; Meier, Robinson & Clore, 2004; Webster, Urland & Correll, 2012).

Für die Bestimmung der Faktoren bot die vorliegende Literatur zum normativen Feedback, die in der Regel die Faktoren 1,2 und 0,8 verwendet, einen ersten Anhaltspunkt. Jedoch bestand das normative Feedback in diesen Untersuchungen, aufgrund der verwendeten Lernaufgabe, aus der Rückmeldung nur eines realen Fehlerwertes und eines ergänzenden normativen Bezugswertes. Bei der Armhebelaufgabe, die in der hier vorliegenden Untersuchung verwendet wird, werden allerdings drei Fehlerwerte, je einer pro Umkehrpunkt, als Feedback präsentiert. Die Herausforderung bestand infolgedessen darin, einen Referenzwert zu bestimmen, der gleichsam für alle drei Abweichungen von den Umkehrpunkten als normativer Bezugswert fungieren kann. Um die entsprechenden Faktoren für diese Studie zu quantifizieren, wurden daher die Übungsdaten vorangegangener Untersuchungen mit verschiedenen Faktoren kombiniert. Dabei wurde erfasst, wie häufig die tatsächlich erzielten Abweichungen den Referenzwert über- oder unterschritten. Wie in Kapitel 2.3.2 deutlich wird, ergeben sich lernförderliche Effekte positiver Valenzen in Folge eines positiven RPE, wenn eine gewisse Ergebnisunsicherheit vorliegt. Aus diesem Grunde wurde der Faktor 0,4 für die *NEG14* gewählt, da in den Vorberechnungen ca. 25% der tatsächlichen Abweichungen geringer waren als der Referenzwert. Das genau gegensätzliche Verhältnis wurde durch den Faktor 1,5 erzielt, da mit diesem Faktor in den Vorberechnungen ca. 75% der Abweichungen von den Umkehrpunkten geringer waren als der kalkulierte Referenzwert (*POS14* und *POS100*). Tatsächlich waren in der vorliegenden Untersuchung 76,36% der real rückgemeldeten Abweichungen in der *POS100* und 75,57% in der *POS14* geringer als der normative Bezugswert. In der *NEG14* waren nur durchschnittlich 22,29% der rückgemeldeten Abweichungen geringer als der normative Referenzwert. Wie häufig durch das Feedback Fehlerwerte zurückgemeldet wurden, die ge-

ringer als der Referenzwert waren, also als überdurchschnittliche Leistung dargestellt wurden, ist in Tab. 4 differenziert für die einzelnen Interventionsgruppen und Übungseinheiten zu sehen.

Tab. 4. Häufigkeiten der Rückmeldung von Fehlerwerten, die geringer als der Referenzwert waren, in Prozent. P1 bis P5 kennzeichnen die Mittelwerte für die einzelnen Übungstage.

	P1	P2	P3	P4	P5	Gesamt
POS100	75,52%	75,53%	76,69%	76,90%	77,18%	76,36%
POS14	75,81%	76,03%	74,93%	81,22%	69,87%	75,57%
NEG14	25,38%	21,18%	23,25%	21,43%	20,24%	22,29%

Um ein Aufdecken der Manipulation zu verhindern, flossen Verschlechterungen des absoluten Fehlers von einem Block zum nächsten nicht in die Berechnung ein, wenn sie eine Abweichung von  $1^\circ$  überstiegen. Durch dieses Schwankungsmaximum sollte unterbunden werden, dass die Probanden möglicherweise einen Zusammenhang zwischen persönlichen Ausreißerwerten und einer Steigerung des Referenzwertes entdecken und die Manipulation somit bemerken könnten. In vorangegangenen Experimenten mit der gleichen Bewegungsaufgabe lag die maximale Veränderung des *AE* für einen Block von 12 Versuchen im Gruppenmittel bei  $0,65^\circ$ . Das Maximum wurde für die vorliegende Untersuchung mit  $1^\circ$  relativ hoch festgelegt, um lediglich die Extremwerte herauszufiltern und ein gezieltes Austesten des Zusammenhangs zwischen eigener Leistung und Referenzwert durch die Versuchspersonen zu unterbinden.

Die Blocklänge, auf deren Basis der Referenzwert berechnet wurde, ist auf sechs Versuche festgelegt worden. Je kürzer ein Block, desto stärker bilden sich individuelle Leistungsschwankungen im Referenzwert ab. Je länger ein Block, desto unsensibler ist der auf dessen Basis kalkulierte Referenzwert bezüglich rascher Leistungsverbesserungen, wie sie bspw. zu Beginn des motorischen Lernens und durch Aufwärmefekte zu erwarten sind. Eine Blocklänge von sechs Versuchen, wie sie auch in den Tests verwendet wird, zeigte sich

aufgrund der Übungsdaten bereits vorliegender Experimente in den Vorberechnungen als geeignet.

Das Feedbackmuster, welches ab Experiment 2a verwendet wird, um die Feedbackhäufigkeit zu reduzieren, ist an die Erkenntnisse der Arbeiten von Agethen (2015), Agethen und Krause (2016), sowie eine weitere Untersuchung angelehnt, die sich derzeit noch im Veröffentlichungsprozess befindet (Agethen, 2015; Agethen & Krause, 2016; Krause et al., 2015, S. 127–128; Krause, Agethen & Zobe, 2017). Diese Experimente zeigten Automatisierungsprozesse nur, wenn Feedbackhäufigkeiten drastisch reduziert wurden. Dabei wurde die gleiche Lernaufgabe verwendet, wie in der vorliegenden Untersuchung. Eine Automatisierung der Armhebelbewegung konnte durch eine Feedbackhäufigkeit von durchschnittlich 14%, mit einer allmählichen Reduktion des Feedbacks nach einem Fading-Muster, erzielt werden. Dieses Feedbackschema wurde auf die Experimente 2a, 2b und 2c übertragen. Die konkrete Verteilung der Feedback-Trials auf die Übungsversuche und -einheiten ist in Tab. 5 dargestellt:

Tab. 5. Feedbackhäufigkeit und -verteilung in den Gruppen POS14, NEG14 und KGa. P1 bis P5 kennzeichnen die fünf Übungseinheiten.

P1	P2	P3	P4	P5
33,33%	20,14%	11,81%	6,25%	2,78%
Jeder dritte Versuch	Jeder 5te Versuch	Jeder 9te Versuch	Jeder 18te Versuch	Jeder 40ste Versuch

Die Operationalisierung der unabhängigen Variablen durch vier Interventionsgruppen lässt sich also folgendermaßen zusammenfassen:

- *POS100*: Normativ positives Feedback zu jedem Übungsversuch
- *POS14*: Normativ positives Feedback zu durchschnittlich 14% der Übungsversuche nach einem Fading-Muster
- *NEG14*: Normativ negatives Feedback zu durchschnittlich 14% der Übungsversuche nach einem Fading-Muster

- *KGa*: Feedback ohne die zusätzliche Rückmeldung eines normativen Bezugswerts zu durchschnittlich 14% der Übungsversuche nach einem Fading-Muster

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Versuchsgruppen herstellen zu können, wurden die Probanden anhand der Prä-Test-Ergebnisse, des Geschlechts und der Händigkeit parallelisiert. Jeder Experimentalgruppe waren somit insgesamt 14 Probanden zugeordnet. Nähere Informationen zur Parallelisierung sind in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Das resultierende Untersuchungsdesign mit den entsprechenden Versuchsgruppen ist der Abb. 27 zu entnehmen:

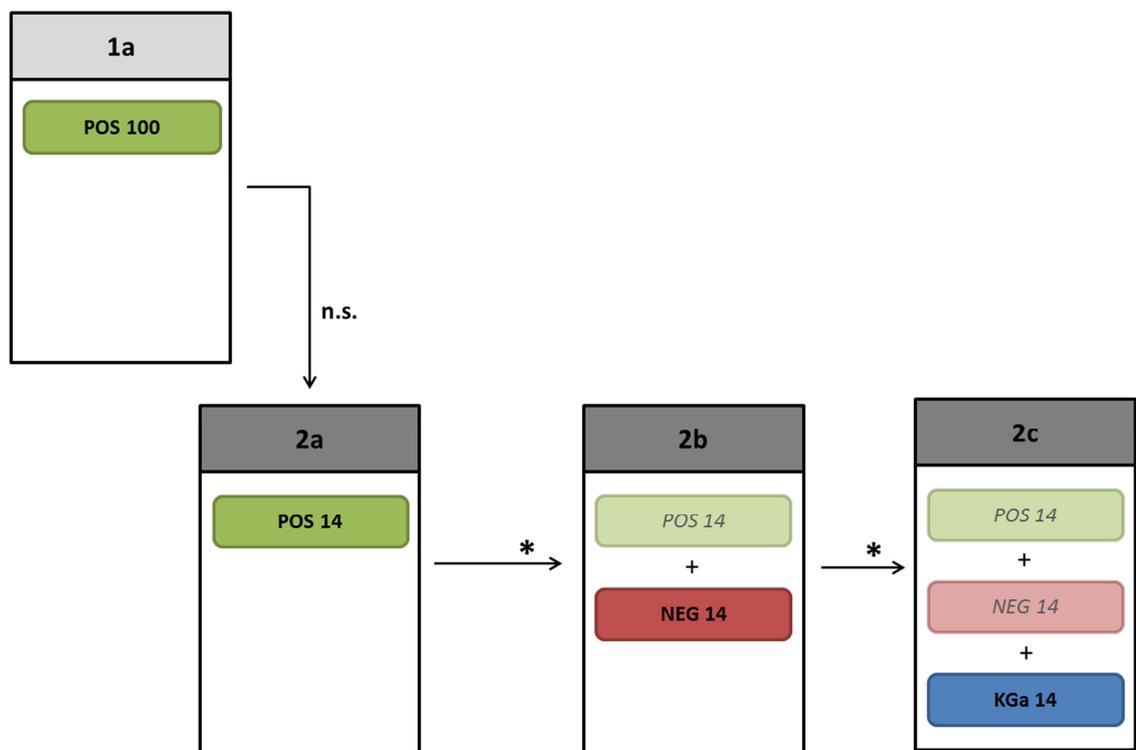


Abb. 27. Resultierendes Untersuchungsdesign mit den tatsächlich durchgeführten Teilerperimenten und Versuchsgruppen. Die transparent dargestellten Versuchsgruppen werden jeweils aus dem vorhergehenden Experiment herangezogen.

### 3.2.2 Untersuchungsablauf

Die Versuchspersonen nahmen an insgesamt sieben Untersuchungsterminen teil, die auf drei Wochen verteilt waren. Der gesamte Untersuchungsverlauf ist in Abb. 28 zusammenfassend dargestellt.

Woche	Woche 0	Woche 1			Woche 2			Woche 3	Woche 5
Termin	Termin 0	Termin 1	Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 5	Termin 6	Termin 7	
Fragebögen/ Informationen	- Teilnehmer- information	- Einwilligungs- erklärung - Eingangs- Fragebogen							- MSRS
Messung		M0	M1					M2	
Test		Probe-Test	Prä-Test					Retentions-Test	
Fragebögen			- PANAVA - Manipulations- check				- PANAVA	- Postexperimen- teller Fragebogen - Manipulations- check	
Übungsblock			P1	P2	P3	P4	P5		
Übungsphase		40 Trials <i>Aneignung</i>	120 Trials <i>Intervention</i>	150 Trials <i>Intervention</i>	150 Trials <i>Intervention</i>	150 Trials <i>Intervention</i>	150 Trials <i>Intervention</i>		
Fragebögen			- PANAVA - Verpflichtung zum Stillschweigen				- PANAVA		

Abb. 28. Kompletter Untersuchungsablauf.

Zunächst wurden die potentiellen Versuchspersonen, durch die Teilnehmerinformation, über die Freiwilligkeit, den Zweck, den Ablauf der Untersuchung, mögliche Risiken und den Datenschutz informiert (siehe Anhang I bzw. II). Am ersten Untersuchungstag unterzeichneten die Probanden die Einwilligungserklärung (siehe Anhang III) und füllten anschließend den Eingangsfragebogen aus (siehe Anhang IV). Mit Hilfe des Fragebogens wurden persönliche Informationen, wie das Geschlecht, Alter und der Beruf/Studiengang dokumentiert. Außerdem wurde sichergestellt, dass keine physischen Einschränkungen der oberen Extremitäten vorlagen und ggf. vorhandene Beeinträchtigungen des Sehvermögens durch das Tragen einer entsprechenden Sehhilfe korrigiert wurden. Ebenfalls wurde abgefragt, ob Vorerfahrungen vorlagen, da diese zu einem Ausschluss von der Untersuchung geführt hätten. Als letzter Teil des Eingangsfragebogens wurde die Händigkeit mit Hilfe des Edinburg Handedness Inventory (Büsch et al., 2010) erfasst. Anschließend wurden die Versuchspersonen, so wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, vor dem Versuchsaufbau positioniert. Die Positionierung wurde vermessen, dokumentiert und an jedem weiteren Untersuchungstag wieder hergestellt. Anschließend folgte eine Aneignungsphase, in der die Versuchspersonen mit der Messapparatur, den Aufgaben und dem Untersuchungsablauf vertraut gemacht wurden. Zu diesem Zweck wurde eine

Powerpoint-Präsentation verwendet (siehe Anhang X), mit deren Hilfe eine standardisierte Instruktion der Versuchspersonen sichergestellt werden sollte.

Als Erstes lernten die Versuchspersonen die Primäraufgabe kennen. Mit Hilfe eines Avatars (siehe Abb. 29) wurde die Armhebelbewegung als Video präsentiert, welches durch standardisierte Instruktionen ergänzt wurde.



Abb. 29. Darstellung des Avatars, das die Armhebelsequenz präsentierte.

Die Versuchspersonen wurden aufgefordert einerseits die Umkehrpunkte möglichst genau zu treffen und andererseits die Bewegung in unter 1,2 Sekunden zu realisieren. Anschließend wurde die Feedbackdarstellung anhand eines Beispiels, ebenfalls mit standardisiertem Wortlaut, erläutert. Daraufhin führten die Versuchspersonen fünf Versuche der Armhebelbewegung durch und erhielten anschließend Feedback zur Präzision (siehe Abb. 30) und zur Bewegungszeit. Vor jedem Versuch wurde das Instruktionsvideo erneut gezeigt.

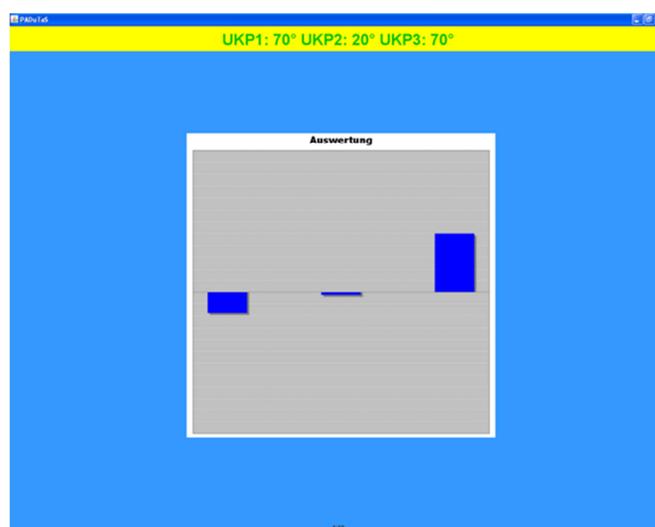


Abb. 30. Darstellung des Feedbacks.

Mit Hilfe der Powerpoint-Präsentation wurden im Anschluss daran der Testablauf, die Testbedingungen, die n-Back-Aufgabe und die Priorisierung erklärt. Die n-Back-Aufgabe wurde durch ein Video präsentiert, welches sich die Versuchspersonen so oft anschauen konnten, wie sie wollten. Dann wurde ein Probe-Test durchgeführt, der im weiteren Verlauf dieser Arbeit Messzeitpunkt 0 (M0) genannt wird. Zum Abschluss des ersten Untersuchungstages führten alle Versuchspersonen 40 Übungsversuche der Armhebelaufgabe aus. Sie erhielten dabei zu jedem Versuch Feedback bezüglich der Präzision (wie in Abb. 30) und der Bewegungszeit.

Am zweiten Untersuchungstermin führten die Versuchspersonen zunächst sechs Bewegungen der Armhebelsequenz ohne Softwareunterstützung aus, um sich wieder an den Hebel zu gewöhnen und „aufzuwärmen“ (Schmidt & Lee, 2011, S. 477–478). Nachdem die Probanden an den Ablauf des Tests und die Priorisierung erinnert wurden, wurde der Eingangstest durchgeführt. Während die Ergebnisse des Tests durch die Versuchsleitung ausgewertet wurden, um darauf aufbauend die Parallelisierung durchzuführen (siehe Kapitel 3.3.3), füllten die Versuchspersonen den Fragebogen PANAVA (siehe Anhang V) und den Manipulationscheck (siehe Anhang VI) aus. Nähere Erläuterungen zum PANAVA und Manipulationscheck, sowie eine Begründung für deren Auswahl stehen in Kapitel 3.2.2.1 und 3.2.2.2. Im Anschluss an das Ausfüllen der beiden Fragebögen wurden die Probanden für die anschließende Übungsphase standardisiert instruiert. Die Gruppen, die das normative Feedback erhielten, wurden informiert, dass die zusätzlich eingeblendeten weißen Linien die durchschnittliche Leistung von 89 sportlich aktiven Probanden darstellten, die im Jahr 2012 an einem Experiment mit der gleichen Armhebelaufgabe teilgenommen hatten. Sie wurden darauf hingewiesen, dass sich der Normwert auf einen Block von sechs Versuchen bezieht und sich somit von Block zu Block verändern kann. Den Probanden wurde darüber hinaus mitgeteilt, dass gewisse Schwankungen des Wertes normal seien, aber damit zu rechnen sei, dass sich der Referenzwert im Verlauf der Übungsphasen verringern wird. Somit sollte verhindert werden, dass die Probanden aufgrund der Schwankungen, einen Zusammenhang zwischen ihrer eigenen Leistung und dem Referenzwert auf-

decken würden. Als Bezugs-Stichprobe wurden gezielt Sporttreibende genannt, da die Stichprobe dieser Untersuchung ebenfalls aus Sport treibenden Erwachsenen besteht. Die nach der Instruktion durchgeführte erste Übungsphase bestand aus 120 Versuchen, welche die Probanden, gemäß der Feedbackbedingungen (siehe Kapitel 3.2.1) ihrer Versuchsgruppenzuteilung, durchführten. Im Anschluss daran wurde zunächst der PANAVA erneut ausgefüllt, bevor die Versuchspersonen darum gebeten wurden, Stillschweigen über ihre eigene Leistung und die Leistung der Bezugsgruppe zu halten. Als Begründung wurde genannt, dass einige andere Teilnehmer des Experimentes die Referenzwerte nicht eingesehen bekommen und die Ergebnisse durch diese Information unbrauchbar würden. Die Versuchspersonen unterzeichneten anschließend freiwillig eine Verpflichtung zum Stillschweigen (siehe Anhang VII).

Am dritten, vierten und fünften Untersuchungstag wurden jeweils 150 Versuche der Armbewegung mit den entsprechenden Feedbackbedingungen durchgeführt, so dass die Probanden der Interventionsgruppen schließlich auf insgesamt 720 Übungsversuche kamen. Am sechsten Termin wurde jeweils vor und nach der Übungsphase der PANAVA ausgefüllt. Vor allen Übungsblocks (P1 bis P5) wurde zunächst die Instruktion zur Bewegungsaufgabe mit Hilfe einer Powerpoint-Präsentation in standardisierter Form wiederholt. Außerdem wurden die ersten sechs Versuche der Übungsphasen ohne Feedback durchgeführt. Diese dienten einerseits als „Mini-Retentions-Tests“, um im Anschluss die Leistungsverbesserung im Verlauf der Übungsphase abbilden zu können. Andererseits stand für die ersten sechs Versuche noch kein normativer Bezugswert fest, da dieser erst auf Basis der Abweichungen der ersten sechs Versuche kalkuliert und ab dem siebten Versuch rückgemeldet werden konnte.

Am siebten Untersuchungstag gewöhnten sich die Versuchspersonen zunächst, wie auch an Termin zwei, durch sechs Armhebelbewegungen ohne Softwaresteuerung an den Hebel. Anschließend wurden sie kurz an den Testablauf und die Priorisierung erinnert, bevor der Retentions-Test durchgeführt wurde. Danach wurde der postexperimentelle Fragebogen (siehe Anhang VIII) ausgefüllt, der auch die Fragen des Manipulationschecks enthielt. Darüber hinaus wurde abgefragt, ob den Versuchspersonen die Umsetzung der Instruktionen und Pri-

orisierung gelungen war und ob sie durch Dritte Informationen zum Experiment erhalten hatten. Abschließend wurden sie darum gebeten, auch weiterhin Stillschweigen über die rückgemeldeten Feedbackinformationen zu halten.

Frühestens zwei Wochen nach Ende der Untersuchung wurden die Versuchspersonen per Mail kontaktiert und gebeten die Movement Specific Reinvestment Skala (MSRS, siehe Anhang IX) auszufüllen und zurückzuschicken. Diese Skala versucht, die grundlegende Neigung einer Person zur bewussten Kontrolle von Bewegungen zu erfassen (siehe Kapitel 2.3.3.3). Infolgedessen soll sie Aufschluss darüber geben, welche Individuen ihre Bewegungen eher bewusst kontrollieren. Die Literatur legt nahe, dass zu *reinvestment* neigende Personen schlechte Voraussetzungen für Automatisierungsprozesse haben (Masters, Eves & Maxwell, 2005). Eine Masterarbeit konnte diese Hypothese jedoch nicht stützen (Zobe, 2013). Daher wird die Reinvestmentdisposition in dieser Arbeit nicht zu Parallelisierungszwecken, sondern nur als Kontrollvariable erfasst. Der Fragebogen wurde mit dem zeitlichen Abstand zur Untersuchung verschickt, um sicherzustellen, dass eine grundsätzliche Persönlichkeitsdisposition erfasst und kein konkreter Bezug zur Untersuchung hergestellt wurde.

Nach Abschluss der Untersuchung wurden die Versuchspersonen in einem Debriefing über die Feedback-Manipulation, sowie deren Zweck und Notwendigkeit aufgeklärt und um Entschuldigung für die Unannehmlichkeiten gebeten.

Alle Interventionsgruppen (*POS100*, *POS14*, *NEG14* und *KGa*) durchliefen den identischen Untersuchungsablauf. Die einzige Ausnahme betrifft die *KGa*, welche die Instruktionen bezüglich der Normativität nicht erhielt. Darüber hinaus wurde eine passive Kontrollgruppe (*KGp*) zur Validierung der Testmethodik eingesetzt. Die Probanden, die dieser Gruppe zugeteilt wurden, nahmen nicht an den Übungsphasen (P1 bis P5) teil.

### 3.2.2.1 PANAVA

Wie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, kann die Valenz einen Einfluss auf die subjektive Leistungsbewertung und das affektive Empfinden haben. Daher ist es inte-

ressant, den Einfluss des normativen Feedbacks auf die subjektiv wahrgenommene Valenz und das emotionale Empfinden zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurde der Fragebogen PANAVA herangezogen. Er ist eine Kurzskala zur Erfassung der positiven Aktivierung, der negativen Aktivierung sowie der Valenz und ist für die Anwendung in Experience Sampling Method-Untersuchungen (ESM) geeignet. Bei dieser Form der Untersuchungen müssen Versuchspersonen mehrmals täglich Informationen über ihren aktuellen Status, bspw. das aktuelle Befinden, übermitteln und das über eine längere Untersuchungsperiode. Der PANAVA ist also für den wiederholten Einsatz vorgesehen und lässt sich aufgrund seiner Kürze gut in das vorliegende Untersuchungsdesign einbinden (Schallberger, 2005, S. 7–8; Schallberger, 2007). Der Fragebogen wurde auf Basis des PANAS entwickelt, der das „heute wohl bekannteste und am meisten angewandte Instrument zur dimensionalen Beschreibung der affektiven Befindlichkeit darstellt“ (Schallberger, 2005, S. 8). Der PANAVA scheint also ein erprobtes Instrument zu sein, das im Anschluss an die Hypothesenprüfung ggf. weiteren Einblick in die subjektive und emotionale Wirkungsweise der Valenz geben könnte. In der vorliegenden Untersuchung wird der PANAVA eingesetzt, um den direkten, kurzfristigen Einfluss des normativen Feedbacks zu erfassen, indem er vor und nach der ersten Übungsphase mit Feedback-Valenz-Manipulation erhoben wird. Um den langfristigen Einfluss der Intervention zu ergründen wird er vor und nach der letzten Übungseinheit ein weiteres Mal eingesetzt.

### 3.2.2.2 Manipulationscheck

Um zu überprüfen, ob das normative Feedback die subjektive Leistungsbewertung der Probanden wie erwartet beeinflusst hat, wurde ein Manipulationscheck durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die Probanden vor Beginn der ersten Übungsphase gebeten, ihre Leistung im Vergleich mit anderen Versuchspersonen einzuschätzen. Die gleiche Frage wurde den Versuchspersonen nach dem Retentions-Test im Rahmen des postexperimentellen Fragebogens erneut gestellt. Wenn das normative Feedback die gewünschte Wirkung gezeigt hat, dann müssten die Teilnehmer der NEG14 ihre Leistung als unterdurchschnitt-

lich einschätzen und die Teilnehmer der POS100 und POS14 ihre Leistung als überdurchschnittlich bewerten.

Dieser Manipulationscheck wurde in Anlehnung an den von Lewthwaite und Wulf (2010) verwendeten Manipulationscheck entwickelt (Lewthwaite & Wulf, 2010, S. 741–742). Im Gegensatz zu dem dort verwendeten Fragebogen wurde in der hier vorliegenden Untersuchung eine fünfstufige Skala verwendet. Es wurde bewusst eine ungerade Anzahl an Skalenstufen gewählt, damit die Möglichkeit sich genau durchschnittlich einzuschätzen, möglich war. Besonders zum ersten Erhebungszeitpunkt haben die Probanden noch nicht viel Erfahrung mit der Armhebelaufgabe, so dass eine mittlere Leistungseinschätzung möglich sein sollte. Außerdem wurde in dieser Untersuchung mit der Rückmeldung eines Durchschnittswertes gearbeitet, an dem die Versuchsteilnehmer ihre eigene Leistung relativieren können. Diese Bezugsmöglichkeit sollte sich auch in den Antwortmöglichkeiten des Fragebogens widerspiegeln. Die Reduktion der Skalenstufen wurde in Anlehnung an die Literaturempfehlungen vorgenommen (Mummendey, 1999, S. 179–180).

### **3.3 Statistisch-methodische Vorüberlegungen/Voraussetzungen**

#### *3.3.1 Datenauswertung*

Für die Datenauswertung wurden die Programme Microsoft Excel 2010 und IBM SPSS Statistics in der Version 19 verwendet. Excel wurde für die Parallelisierung, Kalkulation der in Tab. 3 dargestellten Häufigkeiten der Rückmeldung außerhalb des Referenzwerts und die Gestaltung der Ergebnisgrafiken eingesetzt. SPSS wurde zur Voraussetzungs- und Hypothesenprüfung verwendet. Die konkreten Testverfahren, die in den einzelnen Experimenten angewendet wurden, werden in der Beschreibung der jeweiligen Experimente ab Kapitel 3.4 entsprechend der operationalisierten Forschungshypothesen separat dargestellt.

Für alle Tests, die eine Unterschiedshypothese prüfen, wurde das Signifikanzniveau entsprechend der Konventionen und Literaturempfehlungen auf  $\alpha \leq .05$

festgelegt. Das Signifikanzniveau für Nicht-Unterschiedshypothesen liegt bei  $\alpha \geq .20$  (Bortz & Schuster, 2010, S. 101; Bühner & Ziegler, 2009, S. 147–202).

### 3.3.2 Drop-Outs

Von den 87 Versuchspersonen, die mit der Untersuchung begonnen hatten, wurden 17 Probanden nicht mit in die Auswertung einbezogen. Zwei Versuchspersonen mussten das Experiment vorzeitig abbrechen, da sie für einen längeren Zeitraum erkrankten. Bei einem Probanden versagte die Messtechnik, so dass der Retentions-Test nicht aufgezeichnet und die Versuchsperson nicht mit in die Auswertung einbezogen werden konnte.

Sieben Versuchspersonen wurden aufgrund negativer Doppeltätigkeitskosten im Prä-Test von einer weiteren Teilnahme an der Untersuchung ausgeschlossen. Wenn es zu negativen Doppeltätigkeitskosten kommt, dann muss die n-Back-Aufgabe unter Doppeltätigkeitsbedingungen durchschnittlich besser gelöst worden sein, als unter Einzeltätigkeit. Dies ist nur möglich, wenn die Sekundäraufgabe zu Beginn des Tests noch nicht vollständig verstanden war und es daher zu einer Verbesserung im Verlauf der Testdurchführung kam. Da jedoch zunächst drei Versuche der n-Back-Aufgabe unter Single-Task-Bedingung durchgeführt wurden, zeigen sich Fehler in diesem Fall vor allem in dieser Bedingung. Weiterhin könnte eine fehlerhafte Priorisierung während der Doppeltätigkeitsbedingung diesen Effekt verstärkt haben. In beiden Fällen bildet die dadurch erhobene abhängige Variable nicht das Merkmal ab, das gemessen werden soll, nämlich die Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses durch die Primäraufgabe. Aus diesem Grund wurden Versuchspersonen, die zum Eingangstest negative Doppeltätigkeitskosten zeigten, von vornherein von einer weiteren Untersuchungsteilnahme ausgeschlossen.

Sieben weitere Probanden wurden im Zuge der Versuchsgruppen-Parallelisierung auf Basis der Ergebnisse des Prä-Tests, die im anschließenden Kapitel genauer beschrieben wird, nicht mit in die Auswertung einbezogen.

### 3.3.3 Parallelisierung

Um die interne Validität der Untersuchung zu erhöhen, wurden die Versuchsgruppen anhand der Prä-Test-Ergebnisse parallelisiert. Unter dem Begriff Parallelisierung versteht man die paarweise Zuordnung von Objekten mehrerer Versuchsgruppen nach einem sinnvollen Kriterium (matched samples) zu Beobachtungspaaren/Forschungszwillingen (Bortz & Schuster, 2010, S. 124). Im Fall der hier vorliegenden Untersuchung wurden jedoch insgesamt fünf Versuchsgruppen eingesetzt, so dass sozusagen „Forschungsfünflinge“ gefunden und auf die Gruppen verteilt werden mussten. Als Ausgangspunkte galten immer die Versuchspersonen des ersten Experiments (der POS100), denen Forschungszwillinge in den anderen Experimentalgruppen zugeordnet wurden. Die beiden primären Kriterien für die Parallelisierung waren das Geschlecht und die Höhe der Doppeltätigkeitskosten auf Seiten der *n*-Back-Aufgabe zum Prä-Test. Die Doppeltätigkeitskosten bilden die Anforderungen, die durch die Primäraufgabe an das Arbeitsgedächtnis gestellt werden, ab. Sie sind das zentrale Maß für die Abschätzung des Automtizitätsgrades und die abhängige Variable für die allgemeine Forschungshypothese II. Um eine valide Aussage über den Einfluss der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable treffen zu können, sollten die Doppeltätigkeitskosten zu Beginn der Untersuchung möglichst für alle Versuchsgruppen auf einem ähnlichen Niveau liegen.

Als sekundäre Kriterien wurden die Händigkeit und der *AE* unter Single-Task-Bedingungen herangezogen. Der *AE* bei Einzeltätigkeit ist die abhängige Variable, die für die Testung der allgemeinen Forschungshypothese I eingesetzt wird. Aus diesem Grund sollte auch der *AE* zum Prä-Test möglichst über alle Gruppen vergleichbar sein. Um einen Einfluss der Händigkeit ausschließen zu können, wurden Links- und Rechtshänder gleichmäßig auf die Experimentalgruppen verteilt.

An dritter Stelle wurden die Doppeltätigkeitskosten auf Seiten der Primäraufgabe und die Höhe der *n*-Back-Fehler bei Einzeltätigkeit zur Parallelisierung herangezogen. Die Doppeltätigkeitskosten der Armbewegungsaufgabe sollten möglichst gering sein, da die Primäraufgabe priorisiert und somit unter Single-

und Dual-Task-Bedingungen auf einem vergleichbaren Leistungsniveau ausgeführt werden sollte. Die Höhe der Single-Task-Leistung der *n*-Back-Aufgabe sollte in allen Gruppen ebenfalls möglichst ähnlich sein, da hohe *n*-Back-Fehler, die nahe an einem Rateniveau liegen, auch unter Doppeltätigkeit reproduziert werden können. Diese führen dann zu geringen Doppeltätigkeitskosten und suggerieren infolgedessen fälschlicherweise einen hohen Automatisierungsgrad.

Die gelungene Parallelisierung wurde statistisch mit Hilfe des Haupteffektes GRUPPE überprüft, der mit Hilfe einer einfaktoriellem ANOVA für die jeweiligen Variablen berechnet wurde. Dabei zeigten sich keine Gruppenunterschiede bezüglich der Doppeltätigkeitskosten auf Seiten des *n*-Back-Fehlers ( $p = .998$ )<sup>2</sup> und des *AE* ( $p = .857$ ), sowie der Single-Task-Leistung des *n*-Back-Fehlers ( $p = .396$ ). Bezüglich des *AE* unter Single-Task-Bedingung zeigte sich zwar ebenfalls kein signifikanter Gruppenunterschied ( $p = .150$ ), dennoch lässt sich durch diesen Wert nicht ausschließen, dass im Sinne eines  $\beta$ -Fehlers ein Gruppenunterschied vorliegen könnte (Bühner & Ziegler, 2009, S. 147). Durch die Betrachtung der deskriptiven Daten deutet sich an, dass der *AE* in der *KGa* geringer ist, als in den anderen Gruppen. Ein t-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass sich die *KGa* bezüglich des *AE* unter Single-Task-Bedingungen zum Prä-Test signifikant ( $p = .028$ ) von den anderen Gruppen unterscheidet. Aus diesem Grund sollten die Ergebnisse der Variable *AE* unter Single-Task-Bedingungen für die Gruppe *KGa* und speziell für Gruppenvergleiche mit dieser Gruppe sehr vorsichtig interpretiert werden. Die anderen Gruppen sollten sich untereinander problemlos vergleichen lassen, da sie sich hinsichtlich dieser Variable zum Prä-Test nicht voneinander unterscheiden ( $p = .595$ ).

### 3.3.4 Voraussetzungsprüfungen

Für die hypothesenprüfende Statistik wurden ein- und mehrfaktoriellem Varianzanalysen mit Messwiederholung (ANOVA) sowie zur Aufklärung der Haupt- und Interaktionseffekte t-Tests angewendet. Zur Anwendung für diese parametrischen Verfahren wird vorausgesetzt, dass die Daten intervallskaliert und nor-

---

<sup>2</sup> Für die Darstellung der Ergebnisse statistischer Signifikanztests wird, entsprechend internationaler Standards, der Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet.

malverteilt sind, sowie homogene Varianzen aufweisen (Bühner & Ziegler, 2009, S. 260–518). Eine Intervallskalierung liegt im Fall der hier verwendeten abhängigen Variablen vor.

Die Prüfung auf Gaußsche Normalverteilung wurde mit Hilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind im Anhang XVII nachzulesen. Dabei weisen 18 von 40 Datensätzen keine Normalverteilung auf ( $p < .200$ ). Dies betrifft vor allem die abhängige Variable *n-Back-Fehler*. Bühner und Ziegler (2009, S. 261) erklären, dass bei kleinen Stichproben, wie in diesem Fall, „entsprechende Tests auf Normalverteilung zu wenig sensitiv sind, um Abweichungen von der Normalverteilung zu entdecken“ und empfehlen daher die Sichtung der Daten anhand der Kriterien Kurtosis und Schiefe (Bühner & Ziegler, 2009, S. 261).

Für alle Fälle, in denen keine Normalverteilung nachgewiesen werden konnte, liegt eine linksschiefe Verteilung vor. Dies ist inhaltlich begründbar, da beide abhängigen Variablen Fehlermaße sind, die sich zwar dem Wert 0 annähern, diesen Wert aber nicht unterschreiten können. Besonders für den *n-Back-Fehler* sind unter Single-Task-Bedingung geringe Fehlerwerte in großer Häufigkeit zu vermuten, so dass eine linksschiefe Verteilung der inhaltlichen Erwartung entspricht. Die nicht normalverteilten Datensätze bezüglich des *AE* sind ebenfalls linksschief und teilweise breit- oder schmalgipflig.

Bei der Frage wie in diesem Fall mit den nicht normalverteilten Daten umgegangen werden sollte, muss berücksichtigt werden, dass die parametrischen Tests robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilungsvoraussetzung reagieren (Bortz & Schuster, 2010, S. 122–214; Bühner & Ziegler, 2009, S. 260–372; Hopkins & Weeks, 1990, S. 727). Nach Bortz (2010) sind diese Verletzungen vor allem dann zu vernachlässigen, wenn die Verteilungen, wie in diesem Fall, schief sind (Bortz & Schuster, 2010, S. 214). Die Literatur empfiehlt unter diesen Umständen nicht zu nonparametrischen Verfahren zu wechseln, da somit die Teststärke erheblich verringert würde (Bühner & Ziegler, 2009, S. 261–372).

Die Homogenität der Fehlervarianzen wurde mit Hilfe des Levene-Tests überprüft. Im Falle nicht homogener Varianzen kann die Anzahl der Freiheitsgrade korrigiert werden, so dass die Verzerrungen ausgeglichen werden. Außerdem sind parametrische Verfahren robust gegenüber dieser Voraussetzungsverletzung, wenn die untersuchten Stichproben gleich groß sind (Bortz & Schuster, 2010, S. 214; Bühner & Ziegler, 2009, S. 373). Die Literatur empfiehlt für diesen Fall, die korrigierten Werte zu verwenden statt zu weniger starken nonparametrischen Verfahren zu wechseln (Bühner & Ziegler, 2009, S. 261–374), so dass dieses Vorgehen für die vorliegende Arbeit verwendet wurde.

Speziell für ANOVAs mit Messwiederholung gilt darüber hinaus, dass für jede Versuchsperson zu allen Messzeitpunkten Werte vorliegen müssen. Dies ist in der vorliegenden Untersuchung der Fall, so dass diese Voraussetzung gegeben ist. Für Varianzanalysen mit Messwiederholungen gilt außerdem, dass die Varianzen und Kovarianzen der Messwiederholung homogen sein müssen. Dies wird mit Hilfe des Mauchly-Tests auf Sphärizität überprüft. Verletzungen der Sphärizitätsannahme werden durch eine Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geißer ausgeglichen (Bühner & Ziegler, 2009, S. 461–519).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geplanten parametrischen Testverfahren robust gegenüber den vorliegenden Verletzungen der Anwendungsvoraussetzungen reagieren bzw. Korrekturverfahren angewendet werden können und durch ein Beibehalten dieser Verfahren die Teststärke gegenüber alternativen nonparametrischen Tests erhöht wird.

### 3.3.5 *Adjustierungen*

Für den Fall, dass zur Untersuchung einer Fragestellung mehrere Tests mit der gleichen Stichprobe durchgeführt werden, spricht man vom multiplen Testen. Für diesen Fall ist es zwingend notwendig, das Signifikanzniveau zu adjustieren (Bender, St. Lange & Ziegler, 2002). Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung jedoch um separate Experimente mit jeweils eigenen Stichproben und Hypothesen handelt, ist eine Adjustierung der p-Werte nicht notwendig.

### 3.3.6 Interpretation der Doppeltätigkeitstests

Wie in Kapitel 2.2.3 angesprochen, ist die Interpretation der Ergebnisse von Doppeltätigkeitstests ebenfalls an einige Voraussetzungen geknüpft. Damit die Reduktion von Doppeltätigkeitskosten auf Seiten der Sekundäraufgabe als verringerte Anforderungen an die attentionalen Kapazitäten durch die Primäraufgabe und infolgedessen als Automatisierung interpretiert werden kann, muss einerseits die vorgegebene Priorisierung eingehalten und andererseits die Aufgabenintegration als alternativer Erklärungsansatz ausgeschlossen werden.

#### 3.3.6.1 Aufgabenintegration

Um die Aufgabenintegration als alternative Erklärung für die Reduktion von Doppeltätigkeitskosten auszuschließen, empfiehlt es sich, die Dual-Task-Tests zu kontrollieren. Zu diesem Zweck wurde in der vorliegenden Untersuchung eine passive Kontrollgruppe (*KGp*) eingesetzt, die, bis auf die Übungsphasen P1 bis P5, den gleichen Untersuchungsablauf (siehe Kapitel 3.2.2) durchlief wie die anderen Experimentalgruppen. Sollte es durch ein reines Wiederholen des Testablaufes zu einer integrierten Aufgabenbearbeitung kommen, müsste sich dies in der *KGp* zeigen.

Statistisch wurde dies durch die Betrachtung des Interaktionseffektes *MZP* x *ETDT* überprüft. Es wird angenommen, dass die Testwiederholung keinen Einfluss auf die unterschiedlichen Testbedingungen (Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit) hat und der Interaktionseffekt somit ausbleibt. Aus diesem Grund wird die erwartete Nullhypothese auf einem Signifikanzniveau von  $p > .20$  geprüft (Bühner & Ziegler, 2009, S. 205). Zur Berechnung wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Messzeitpunkt (*MZP*; Prä-Test, Retentions-Test) und Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit (*ETDT*) durchgeführt.

Entsprechend der Annahmen zeigten sich keine signifikanten Interaktionseffekte für die beiden abhängigen Variablen (siehe Abb. 31). Die ANOVA konnte für den *AE* keinen signifikanten Interaktionseffekt aufzeigen,  $F(1, 13) < 0.01$ ,  $p = .961$ ,  $\eta^2_p < .01$ . Ebenso war auch für den *n-back-Fehler* kein signifikanter Interaktionseffekt nachweisbar,  $F(1, 13) = 0.32$ ,  $p = .583$ ,  $\eta^2_p = .02$ .

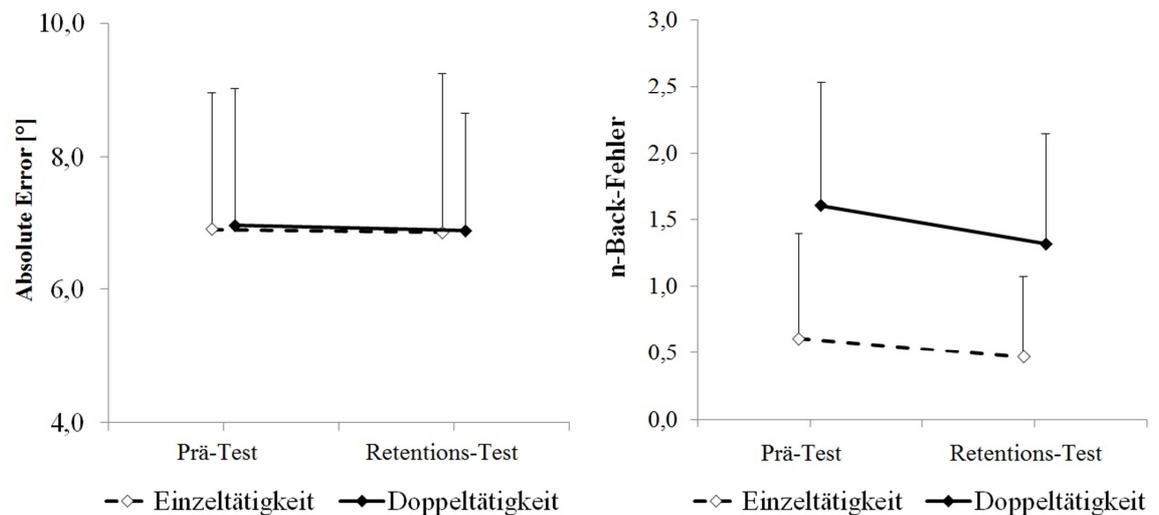


Abb. 31. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen AE und *n-Back-Fehler* unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der passiven Kontrollgruppe.

Daher kann die Reduktion von Doppeltätigkeitskosten aufgrund integrierter Aufgabenbearbeitung durch wiederholtes Testen in dieser Untersuchung ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse des *n-Back-Fehlers*, die durch die geplanten Tests erzielt werden, können also zur Überprüfung der aufgestellten Hypothesen herangezogen werden.

### 3.3.6.2 Priorisierung

Die Priorisierung der Primäraufgabe während der Doppelaufgabenbedingung ist ebenfalls eine zentrale Voraussetzung zur Interpretation der Doppeltätigkeitskosten. Um zu messen welchen Anspruch die Primäraufgabe an die Arbeitsgedächtnisressourcen stellt, ist es notwendig, dass diese Aufgabe in der Doppelaufgabenbedingung priorisiert und entsprechend auf einem vergleichbaren Leistungsniveau gegenüber der Single-Task-Bedingung ausgeführt wird. Nur dann zeigen sich die attentionalen Beanspruchungen durch die Primäraufgabe vollständig auf Seiten der Sekundäraufgabe und dann können diese als Maß für den Automatisierungsgrad herangezogen werden.

Zur Überprüfung der Priorisierung wird der Haupteffekt *ETDT* betrachtet, der mit Hilfe einer dreifaktoriellen ANOVA für die Variable *AE* mit den Faktoren Messzeitpunkt (*MZP*; Prä-Tests, Retentions-Test), Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit (*ETDT*) und Versuchsgruppe (*VG*; POS100, POS14, NEG14, KGa, KGp) be-

rechnet wurde. Wie auch im Fall des Tests für integrierte Aufgabenbearbeitung wird diese Nullhypothese auf einem Signifikanzniveau von  $p > .20$  geprüft (Bühner & Ziegler, 2009, S. 205).

Der Haupteffekt *ETDT* wird deutlich nicht signifikant und deutet darauf hin, dass die Primäraufgabe entsprechend der Instruktion priorisiert wurde,  $F(5, 65) = 0.56$ ,  $p = .457$ ,  $\eta^2_p < .01$ . Auch der Interaktionseffekt *MZP*  $\times$  *ETDT* zeigt keine signifikante Interaktion, so dass keine Hinweise auf eine Veränderung der Priorisierung vom Prä- zum Retentions-Test vorliegen,  $F(5, 65) = 0.91$ ,  $p = .344$ ,  $\eta^2_p = .01$ . Auch die Gruppeninteraktion für *MZP*  $\times$  *ETDT*  $\times$  *VG* ist nicht signifikant, so dass Priorisierungsveränderungen in Abhängigkeit von der Versuchsgruppenzuteilung ebenfalls unwahrscheinlich sind,  $F(5, 65) = 0.65$ ,  $p = .631$ ,  $\eta^2_p = .04$ . Die Priorisierung der Primäraufgabe scheint demnach gelungen, so dass auftretende Reduktionen der Doppeltätigkeitskosten auf Seiten der n-Back-Aufgabe als Automatisierungsprozesse der Primäraufgabe interpretiert werden können.

### 3.4 Experiment 1a

Um die allgemeinen Forschungshypothesen zu beantworten, wird, entsprechend des vorgestellten Untersuchungsdesigns (siehe Kapitel 3.2), zunächst der Effekt der positiven Feedback-Valenz auf die Automatisierung und Leistungssteigerung bei einer 100%igen Feedbackhäufigkeit untersucht. Wie bereits beschrieben scheinen zu hohe Feedbackhäufigkeiten die Leistungssteigerung und Automatisierung zu behindern. In diesem Experiment wird dennoch untersucht, ob das Üben mit positiver Feedback-Valenz bei 100%iger Feedbackhäufigkeit zu einer Leistungssteigerung und/oder Automatisierung führt, um den Einfluss des Treatments zu maximieren. Die Operationalisierung der positiven Feedback-Valenz geschieht über das in Kapitel 3.2.1 vorgestellte normativ positive Feedback.

### 3.4.1 Operationalisierte Forschungshypothesen

In diesem Experiment wird zunächst nur der Einfluss der positiven Feedback-Valenz auf die Leistungssteigerung (FH\_I) bzw. Automatisierung (FH\_II) untersucht. Eine Steigerung der Präzisionsleistung bzw. eine Automatisierung in Folge des Übens mit positiver Feedback-Valenz sind notwendige Voraussetzungen zur Bestätigung der allgemeinen Forschungshypothesen. Auf Basis der in Kapitel 2.4 formulierten allgemeinen Forschungshypothesen ergeben sich für dieses Telexperiment daher folgende operationalisierte Forschungshypothesen:

*Operationalisierte Forschungshypothese I\_1a (OH I\_1a): In der POS100 zeigt sich eine Reduktion der abhängigen Variablen AE vom Prä-Test zum Retentions-Test unter Einzeltätigkeit.*

*Operationalisierte Forschungshypothese II\_1a (OH II\_1a): In der POS100 zeigt sich eine Reduktion der Doppeltätigkeitskosten für die abhängige Variable n-Back-Fehler vom Prä-Test zum Retentions-Test.*

### 3.4.2 Datenauswertung

Zur Überprüfung der ersten operationalisierten Forschungshypothese (OH I\_1a) wird der Haupteffekt *MZP* betrachtet, der mit Hilfe eines t-Tests für abhängige Stichproben mit der Variablen *AE* unter Einzeltätigkeit berechnet wird. Die zweite operationalisierte Forschungshypothese (OH II\_1a) wird durch den Interaktionseffekt *MZP x ETDT* überprüft, der mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit den Faktoren Messzeitpunkt (*MZP*; Prä-Test, Retentions-Test) und Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit (*ETDT*) berechnet wird.

### 3.4.3 Ergebnisse

Eine Übersicht über die deskriptiven Kennwerte für beide Hypothesenprüfungen ist in Tab. 6 dargestellt. Die Betrachtung der deskriptiven Ergebnisse deutet hypothesenkonform auf eine kleine Steigerung der Präzisionsleistung und eine geringe Reduktion der Doppeltätigkeitskosten vom Prä- zum Retentions-Test hin.

Tab. 6. Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen *AE* und *n-Back-Fehler* der Gruppe POS100 zum Prä- und Retentions-Test.

Variable	Prä-Test		Retentions-Test	
	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit
<i>AE</i> in °	6,12 (2,11)	6,61 (2,17)	5,68 (2,77)	5,92 (2,74)
<i>n-Back-Fehler</i>	0,39 (0,49)	1,43 (0,70)	0,32 (0,55)	1,07 (0,62)

### 3.4.3.1 Ergebnisse zur Hypothese OH I\_1a (Präzisionssteigerung)

Der t-Test für abhängige Stichproben zeigt für die Variable *AE* unter Einzeltätigkeit keinen Unterschied vom Prä- zum Retentions-Test (siehe links in Abb. 32),  $t(1, 13) = 0.62$ ,  $p = .271$ ,  $d_z = 0.17$ . Die OH I\_1a kann also nicht bestätigt werden.

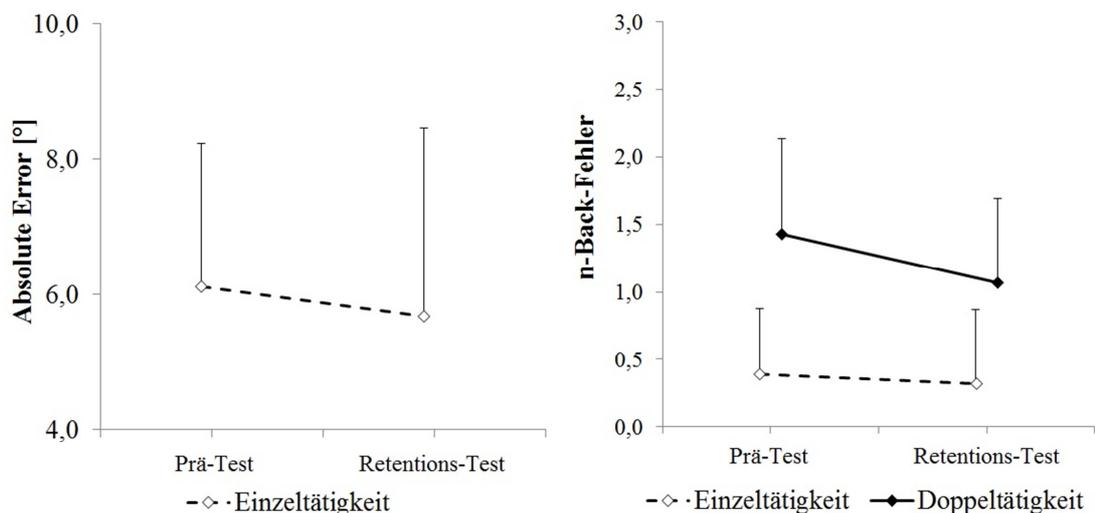


Abb. 32. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen *AE* und *n-Back-Fehler* unter Einzeltätigkeit bzw. Einzel- und Doppeltätigkeit in der POS100.

### 3.4.3.2 Ergebnisse zur Hypothese OH II\_1a (Automatisierung)

Die zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *MZP* (Prä-Test, Retentions-Test) und *ETDT* (Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit) für die abhängige Variable *n-Back-Fehler* konnte keinen signifikanten Interaktionseffekt feststellen (siehe rechts in Abb. 32),  $F(1, 13) = 1.89$ ,  $p = .192$ ,  $\eta^2_p = .13$ . Die OH II\_1a muss also ebenfalls abgelehnt werden.

### 3.4.4 Diskussion

Entgegen der zuvor aufgestellten Hypothesen zeigten sich unter der Übungsbedingung mit normativ positivem Feedback bei 100%iger Feedbackhäufigkeit weder eine Leistungssteigerung, noch eine Automatisierung. Diese Erkenntnisse stehen im Widerspruch zu den bisher vorliegenden empirischen Befunden normativen Feedbacks (siehe Kapitel 2.3.3.5). Im Folgenden soll der Versuch angestellt werden, das Ausbleiben der erwarteten Effekte zu begründen: Ein zentraler Unterschied zwischen den bisherigen Studien zur Feedback-Valenz und dem aktuellen Experiment ist der Übungsumfang. In diesem Experiment führten die Versuchspersonen 720 Übungsversuche an fünf Tagen mit normativ positivem Feedback durch. In den anderen Untersuchungen bestand die Übungsphase aus nur 10-80 Versuchen an ein bis zwei Übungstagen (Ávila et al., 2012; Lewthwaite & Wulf, 2010; Wulf et al., 2010a; Wulf et al., 2012; Wulf, Lewthwaite & Hooyman, 2013). Im hier vorliegenden Experiment hatten die Versuchspersonen allerdings zum Zeitpunkt des Prä-Tests bereits 40 Aneignungsversuche der Armhebelbewegung ausgeführt, bevor sie mit der eigentlichen Intervention begannen. Innerhalb dieses Zeitraums zeigte sich bereits eine signifikante Steigerung der Präzisionsleistung von durchschnittlich  $9,14^\circ$  auf  $6,12^\circ$ ,  $t(1, 13) = 2.34$ ,  $p = .036$ ,  $d_z = 0.63$ . In Folge dieser Aneignungsphase erreichten die Versuchspersonen anscheinend frühzeitig ein Leistungsplateau bezüglich des *AE*, welches somit bereits zum Prä-Test bestand. Eine weitere Verbesserung der Leistung zum Retentions-Test war mit Hilfe der hier verwendeten Feedback-Form nicht möglich. Die Überprüfung der übungsbegleitenden Retentions-Tests bestätigt diese Annahme, da keine weiteren Leistungsverbesserungen aufgedeckt werden konnten. Zu diesem Zweck wurde der Haupteffekt *MZP* des *AE* betrachtet, der mit Hilfe einer einfaktoriellen ANOVA mit sechs Faktorstufen (M0, M1, P2, P3, P4 und P5) berechnet wurde. Dieser verfehlt das Signifikanzniveau jedoch deutlich:  $F(1, 9) = 1.34$ ,  $p = .332$ ,  $\eta_p^2 = .43$ .

Eine Erklärung für das Ausbleiben einer Präzisionssteigerung zum Retentions-Test könnte, wie bereits angesprochen, die hohe Feedbackhäufigkeit in der eingesetzten POS100 sein. Eine der bedeutendsten Zusammenfassungen des Einflusses von KR auf das motorische Lernen veröffentlichten Salmoni, Schmidt

und Walter im Jahr 1984. Die von ihnen aufgestellte Guidance-Hypothese sagt aus, dass Feedback notwendig ist, um den Lernenden an die richtige Bewegungsausführung heranzuführen. Die Autoren stellen die Informationsfunktion des Feedbacks in den Vordergrund und vernachlässigen motivationale Funktionen. Allerdings kann dieser Guidance-Effekt auch negative Folgen haben, da es zu einer Abhängigkeit vom Feedback und einer verringerten Verarbeitung von Eigeninformationen kommen kann. Zu häufiges Feedback kann darüber hinaus dazu führen, dass die Übenden versuchen, auch die kleinsten Fehler zu korrigieren (*maladaptive short-term corrections*), die möglicherweise nur in den natürlichen Schwankungen des motorischen Systems begründet sind (Chiviacowsky & Wulf, 2007, S. 40; Salmoni et al., 1984; Wulf & Shea, 2004, S. 122–123). Winstein und Schmidt stellten 1990 heraus, dass reduzierte Feedbackhäufigkeiten, entgegen traditioneller Theorien zum motorischen Lernen, Retentionsleistungen und Lernprozesse begünstigen (Magill, 2014, S. 370–372; Winstein & Schmidt, 1990).

Auch die erwarteten Automatisierungsprozesse zeigten sich nicht. Die Doppel­ tätigkeitskosten, die zum Prä-Test gemessen wurden, waren vergleichbar mit denen, die im Retentions-Test festgestellt wurden. Entgegen der Annahmen scheint die positive Feedback-Valenz nicht den automatisierungsförderlichen Effekt gehabt zu haben, den die Literatur vermuten ließ. Möglicherweise ist auch das Ausbleiben dieses Effektes auf die hohe Feedbackfrequenz zurückzuführen: In der vorliegenden Untersuchung sollte das Feedback, welches per se ja eine Rückmeldung von Bewegungsfehlern ist, durch die zusätzliche Einblendung des normativen Bezugswertes mit einer positiven Valenz versehen und eher als Bestätigung der eigenen Leistung wahrgenommen werden. Die Überprüfung des Manipulationschecks zeigte, dass die Versuchspersonen der POS100 ihre eigene Leistung nach der Intervention als überdurchschnittlich einschätzten. Der Wilcoxon-Test wies eine signifikante Steigerung der relativen Selbsteinschätzung in Folge des normativ positiven Feedbacks nach,  $Z = -2.33$ ,  $p = .020$ . Die Feedback-Manipulation scheint in dieser Versuchsgruppe also dazu geführt zu haben, dass die Probanden ihre Leistung, wie beabsichtigt, als überdurchschnittlich auffassten. Diese wahrgenommene Valenz scheint jedoch

nicht den erwarteten Effekt auf die Automatisierung gehabt zu haben. Anscheinend führte die hohe Feedbackhäufigkeit dazu, dass die nach jedem Versuch aufgezeigten Bewegungsfehler eine große Bedeutung für die weitere Handlungsplanung der Versuchspersonen einnahmen. Entsprechend der Annahmen, die Masters und Maxwell (2004) im Kontext des *expliziten Hypothesen-Testens* äußern, scheint die Wahrnehmung von Bewegungsfehlern bewusste Kontrollprozesse in Gang zu setzen, indem Hypothesen über den möglichen Handlungsausgang aufgestellt, überprüft, angepasst und explizite Regelhaftigkeiten erarbeitet werden. Diese Strategien geschehen unter Rückgriff auf Arbeitsgedächtnisressourcen und bewirken eine eher bewusste Auseinandersetzung mit der Bewegungsaufgabe, wodurch die Automatisierung motorischer Fertigkeiten behindert werden kann. Anscheinend wurde durch die hohe Häufigkeit der Feedbackpräsentation somit eher das quantitative Fehlersignal, als die Leistungsbestätigung wahrgenommen. Dieser negative Effekt hoher Feedbackfrequenzen auf die Automatisierung motorischer Fertigkeiten konnte in zwei anderen Untersuchungen, mit der gleichen Lernaufgabe, bereits belegt werden (Agthe, 2015; Krause et al., 2017).

Da die hier vorliegende Studie die erste ist, die den Effekt positiver Feedback-Valenz auf das motorische Lernen mit den Teilaspekten der Leistungssteigerung und Automatisierung untersucht, konnten vor Beginn des Experimentes noch keine Aussagen darüber getroffen werden, inwiefern sich die Feedbackhäufigkeit und die Feedback-Valenz gegenseitig beeinflussen. Um den Einfluss des Treatments zu maximieren, wurde daher zunächst eine Feedbackfrequenz von 100% gewählt. Diese scheint jedoch so ungünstig für Lern- und Automatisierungsprozesse zu sein, dass sie möglicherweise vorhandene Valenz-Effekte überschattet.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse können die beiden allgemeinen Forschungshypothesen, wie sie in Kapitel 2.4 formuliert wurden, nicht bestätigt werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchung soll daher aufgeklärt werden, ob die beiden Hypothesen mit der Einschränkung, dass die Feedback-Valenz mit einer reduzierten Feedbackhäufigkeit kombiniert wird, angenommen werden können.

Entsprechend des in Kapitel 3.2 geplanten Untersuchungsdesigns wird im Folgenden mit dem Experiment 2a fortgefahren. Dabei kommt eine Versuchsgruppe zum Einsatz, die normativ positives Feedback mit einer deutlich reduzierten Feedbackfrequenz erhält. Die Feedbackhäufigkeit und -verteilung orientiert sich dabei an den Erkenntnissen der bereits angesprochenen Untersuchungen von Agethen (2015) und Agethen und Krause (2016).

### **3.5 Experiment 2a**

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorausgegangenen Experimentes wird nun, entsprechend des zuvor geplanten Untersuchungsdesigns, mit dem Experiment 2a fortgefahren. In diesem Teilexperiment wird eine Interventionsgruppe (POS14) eingesetzt, die den gesamten Untersuchungsablauf genauso durchläuft wie die POS100, mit einer Ausnahme: Die POS14 erhält nicht nach jedem Versuch normativ positives Feedback, sondern nur zu durchschnittlich 14% der Versuche. Die Verteilung des Feedbacks folgt dabei einem Fading-Muster, was bedeutet, dass zu Beginn des Übungsprozesses häufiger Rückmeldungen gegeben werden, die sich dann zum Ende des Übungsprozesses hin reduzieren. Diese Feedbackhäufigkeit und -verteilung, die in Kapitel 3.2.1 genauer beschrieben ist, wurde in Anlehnung an die Untersuchungen von Agethen (2015) und Krause, Agethen und Zobe (2017) gewählt, da entsprechend dieser Experimente günstige Rahmenbedingungen für Automatisierungsprozesse gegeben sind. Diese Modifikation des Feedbackplans ist notwendig, da auf Basis der Ergebnisse von Experiment 1a angenommen wird, dass die positive Feedback-Valenz die Automatisierung und Leistungssteigerung zwar begünstigt, die hohe Häufigkeit quantitativen Feedbacks von 100% jedoch zu stark hemmend wirkt. Sollten sich in diesem Experiment Lerneffekte in Form einer signifikanten Leistungssteigerung oder Automatisierung zeigen, so wird im Anschluss mit dem geplanten Experiment 2b fortgefahren. In diesem sollen die gefundenen Effekte positiver Feedback-Valenz anschließend mit denen einer negativen Feedback-Valenz verglichen werden.

### 3.5.1 Operationalisierte Forschungshypothesen

Im folgenden Experiment wird der Einfluss der positiven Feedback-Valenz in Kombination mit einer reduzierten Feedbackhäufigkeit auf die Leistungssteigerung (FH\_I) bzw. Automatisierung (FH\_II) untersucht. Zur Bestätigung der in Kapitel 3.4.4 eingeschränkten allgemeinen Forschungshypothesen sind eine Steigerung der Präzisionsleistung bzw. eine Automatisierung in Folge des Übens mit positiver Feedback-Valenz und reduzierter Feedbackhäufigkeit notwendig. Daher ergeben sich nun folgende operationalisierte Forschungshypothesen für dieses Teilexperiment:

*Operationalisierte Forschungshypothese I\_2a (OH I\_2a): In der POS14 zeigt sich eine Reduktion der abhängigen Variablen AE vom Prä-Test zum Retentions-Test unter Einzeltätigkeit.*

*Operationalisierte Forschungshypothese II\_2a (OH II\_2a): In der POS14 zeigt sich eine Reduktion der Doppeltätigkeitskosten für die abhängige Variable  $n$ -Back-Fehler vom Prä-Test zum Retentions-Test.*

### 3.5.2 Datenauswertung

Zur Überprüfung der ersten operationalisierten Forschungshypothese für dieses Experiment (OH I\_2a) wird der Haupteffekt  $MZP$  (Prä-Test; Retentions-Tests) betrachtet, der mit Hilfe des t-Tests für abhängige Stichproben mit der Variable  $AE$  unter Single-Task-Bedingungen berechnet wurde. Zur Überprüfung der zweiten operationalisierten Forschungshypothese (OH II\_2a) wird der Interaktionseffekt  $MZP \times ETDT$  herangezogen, der mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse und den Faktoren Messzeitpunkt ( $MZP$ ; Prä-Test, Retentions-Test) und Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit ( $ETDT$ ) für die abhängige Variable  $n$ -Back-Fehler berechnet wird.

### 3.5.3 Ergebnisse

Die deskriptiven Kennwerte der POS14 sind in Tab. 7 dargestellt. Auch in diesem Fall ist bereits bei der Betrachtung der deskriptiven Ergebnisse erkennbar, dass es bezüglich des  $AE$  zu einer geringen Reduktion kommt. Bezüglich der

Doppeltätigkeitskosten auf Seiten des *n-Back-Fehlers* ist auf deskriptiver Ebene eine große Reduktion zu erkennen.

Tab. 7. Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen *AE* und *n-Back-Fehler* der Gruppe POS14 zum Prä- und Retentions-Test.

Variable	Prä-Test		Retentions-Test	
	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit
<i>AE</i> in °	6,46 (1,31)	6,57 (1,60)	6,12 (2,19)	6,22 (2,60)
<i>n-Back-Fehler</i>	0,46 (0,66)	1,54 (0,66)	0,39 (0,59)	0,75 (0,83)

### 3.5.3.1 Ergebnisse zur Hypothese OH I\_2a (Präzisionssteigerung)

Der t-Test für abhängige Stichproben zeigt für die Variable *AE* unter Einzeltätigkeit keinen Unterschied zwischen dem Prä- und Retentions-Test (siehe links in Abb. 33),  $t(1, 13) = 0.55$ ,  $p = .296$ ,  $d_z = 0.15$ , so dass die *OH I\_2a* nicht bestätigt werden kann.

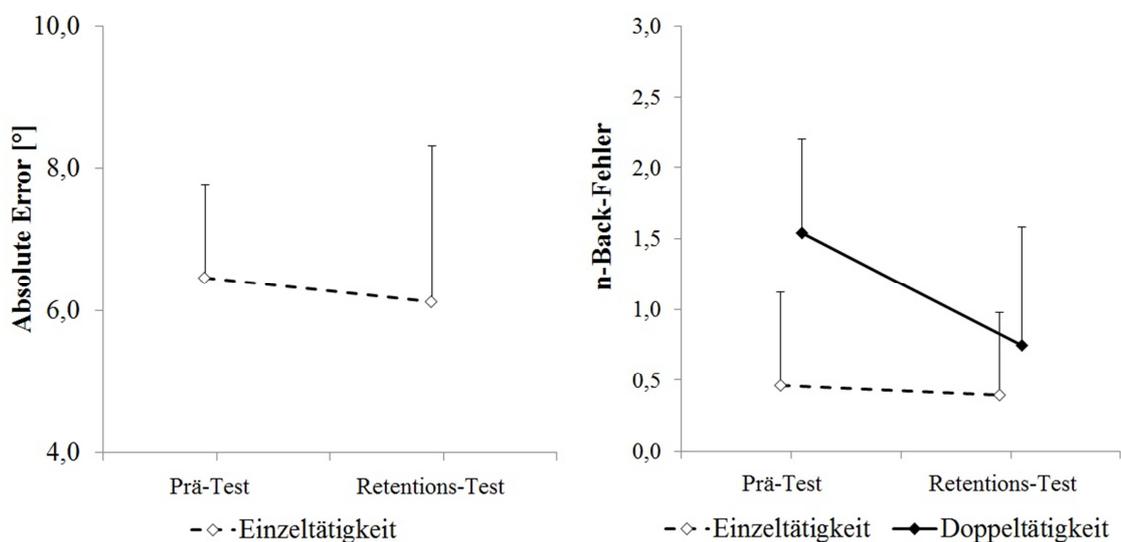


Abb. 33. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen *AE* und *n-Back-Fehler* unter Einzeltätigkeit bzw. Einzel- und Doppeltätigkeit in der POS14.

### 3.5.3.2 Ergebnisse zur Hypothese OH II\_2a (Automatisierung)

Der Interaktionseffekt, der mit Hilfe der zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren *MZP* (Prä-Test, Retentions-Test) und *ETDT* (Einzeltätigkeit, Doppeltätigkeit)

für die abhängige Variable *n-Back-Fehler* berechnet wurde, konnte einen signifikanten Effekt feststellen (siehe rechts in Abb. 33),  $F(1, 13) = 13.54$ ,  $p = .003$ ,  $\eta^2_p = .51$ . Die OH II\_2a kann also bestätigt werden.

#### 3.5.4 Diskussion

Entgegen der Erwartungen zeigte sich in der POS14 keine Steigerung der Präzisionsleistung. Dies ist verwunderlich, da in dieser Intervention mit der Feedbackreduktion und der positiven Feedback-Valenz zwei Faktoren, welche die Leistungssteigerung begünstigen sollten, miteinander kombiniert wurden. Für das Ausbleiben der Leistungssteigerung können zwei mögliche Gründe herangezogen werden. Wie in der POS100 auch, ist bereits eine signifikante Leistungssteigerung aufgrund der ersten 40 Aneignungsversuche festzustellen, die unabhängig von der Intervention bereits zum Prä-Test bestand: Die Versuchsteilnehmer der Gruppe POS14 verringerten den *AE* signifikant von  $8,37^\circ$  auf  $6,46^\circ$ ,  $t(1, 13) = 2.37$ ,  $p = .034$ ,  $d_z = 0.63$ . Durch die Aneignungsphase scheint es somit auch in dieser Gruppe zu einem Leistungsplateau gekommen zu sein. Übungsbegleitend konnte keine weitere Leistungssteigerung festgestellt werden. Die einfaktorielle ANOVA mit dem sechsfach gestuften Faktor *MZP* (M0, M1, P2, P3, P4 und P5) zeigte keinen signifikanten Haupteffekt *MZP* für den *AE*,  $F(1, 9) = 2.23$ ,  $p = .139$ ,  $\eta^2_p = .55$ . Dieses Ausbleiben der Leistungssteigerung ist möglicherweise in der positiven Normativität selbst begründet. Der eingblendete Referenzwert repräsentierte Fehlerwerte, die zu ca. 75% größer waren als die realen Fehler der Probanden (siehe Kapitel 3.2.1). Der Bezugswert diente als Hilfe zur Bewertung der eigenen Leistung und fungierte in diesem Fall also als eine Bestätigung dieser. Infolgedessen scheinen die Probanden keinen Anlass für weitere Leistungsverbesserungen gesehen zu haben, da sie ihre Leistung bereits als überdurchschnittlich gut einschätzten. Diese Einschätzung lässt sich mit Hilfe des Manipulationschecks (siehe Kapitel 3.2.2.2) bestätigen. Die POS14 schätzt ihre eigene Leistung, im Vergleich zu Anderen, nach der Intervention auf einer fünfstufigen Skala um durchschnittliche 0,8 Punkte besser ein, als vor der Intervention. Mit Hilfe des Wilcoxon-Tests konnte nachgewiesen werden, dass diese Steigerung der Selbsteinschätzung in Folge

des normativ positiven Feedbacks signifikant ist,  $Z = -2.65$ ,  $p = .008$ . Da die Steigerung der relativen Leistungseinschätzung, also im Vergleich zu Anderen, in beiden Gruppen mit normativ positivem Feedback (POS100 und POS14) zu finden ist, scheint sie auf diese Feedback-Manipulation, unabhängig von der Rückmeldehäufigkeit, zurückzuführen zu sein.

Möglicherweise hat diese Einschätzung der eigenen Leistung als überdurchschnittlich eine weitere Steigerung der Präzisionsleistung nach dem Prä-Test verhindert. Diese Annahme lässt sich gut an die Theorie des Anspruchsniveaus anbinden: Wie in Kapitel 2.3.1 erläutert, wird die Differenz zwischen zuvor gesetztem, individuellem Anspruchsniveau und erzielter Leistung als Zielerreichungsdiskrepanz bezeichnet. Diese wird bezüglich ihrer Höhe und Richtung bewertet und bewirkt eine Wahrnehmung der erfolgten Handlung als Erfolg oder Misserfolg. Die Höhe des erlebten Erfolgs bzw. Misserfolgs hat anschließend einen Einfluss auf die Anpassung des Anspruchsniveaus für die nachfolgende Handlung. Das normativ positive Feedback beeinflusst die Bewertung der Zielerreichungsdiskrepanz und infolgedessen auch die Anpassung des Anspruchsniveaus. Es liegt also nahe, dass die Probanden ihr Anspruchsniveau am normativen Bezugswert orientieren. Insofern wird das individuelle Anspruchsniveau sehr oft deutlich übertroffen, da der normative Bezugswert in den beiden Interventionsgruppen zu ca. 75% unterschritten wird. Die Versuchsteilnehmer der POS14 und POS100 sind es also gewohnt, dass ihre Leistung das eigene Anspruchsniveau übersteigt. Entsprechend der Überlegungen aus Kapitel 2.3.3.5 bewirken diese als große Erfolge wahrgenommenen Bewegungsleistungen keine weitere Fehlerkorrektur mehr und können somit auch keine Leistungssteigerung herbeiführen. Die bereits durch die 40 Aneignungsversuche erreichte Präzisionsleistung stabilisiert sich vielmehr auf einem Leistungsplateau. Des Weiteren könnte es durch das umfangreiche Üben ohne ersichtliche Verbesserung der eigenen Leistungen und auch durch das Ausbleiben einer Präzisionssteigerung in der angeblichen Vergleichsgruppe, repräsentiert durch den eingeblendeten Referenzwert, dazu kommen, dass die Versuchspersonen gar nicht daran glaubten, dass eine weitere Reduktion der Fehlerwerte überhaupt möglich ist. Es scheint, unabhängig von der Feedback-Valenz und

-häufigkeit, bereits aufgrund der 40 Aneignungsversuche zu einem Leistungsplateau bezüglich des *AE* zu kommen. Die vor den Experimenten aufgestellten Annahmen bezüglich der leistungssteigernden Effekte positiver Feedback-Valenz zeigen sich möglicherweise nur in einer frühen Aneignungsphase. Diese liegt in der hier vorliegenden Untersuchung bereits vor der Prä-Test-Messung und wird somit gruppenunspezifisch absolviert. Der sich daraus ergebenden Fragestellung, ob eine positive Feedback-Valenz in frühen Akquisitionsphasen zu einer Leistungssteigerung führt, kann an dieser Stelle jedoch nicht weiter nachgegangen werden und muss in sich anschließenden Studien bearbeitet werden.

Die notwendige Voraussetzung für die Bestätigung der allgemeinen Forschungshypothese I ist, dass sich die Präzisionsleistung durch das Üben mit positiver Feedback-Valenz signifikant steigert. Diese Bedingung wird weder bei 100%iger Feedbackhäufigkeit (Experiment 1a) noch bei reduzierter Feedbackfrequenz (Experiment 2a) erfüllt. Die allgemeine Forschungshypothese FH\_1 muss an dieser Stelle also weiter eingeschränkt werden. Da in beiden Gruppen mit positiver Feedback-Valenz deskriptiv eine nicht signifikante Steigerung der Präzisionsleistung zu beobachten ist, wäre es allerdings weiterhin möglich, dass der zweite Teil der FH\_1 zutreffen könnte. Es wird daher weiterhin angenommen, dass das Üben mit positiver Feedback-Valenz zu einer stärkeren Leistungssteigerung führt, als das Üben mit negativer Valenz.

Im Gegenzug scheint die genannte Bestätigungsfunktion des normativen Feedbacks die Automatisierung zu begünstigen, die in der POS14 auf höchst signifikantem Niveau mit einer beachtlichen Effektstärke festgestellt werden konnte. Die Kombination aus einer Reduktion der Feedbackhäufigkeit und der positiven Feedback-Valenz kann die motorische Automatisierung anscheinend fördern. Dies scheint darin begründet zu sein, dass die Versuchspersonen ihre Leistung als überdurchschnittlich einschätzen und bewusste Kontrollprozesse zur Fehlerkorrektur, die Automatisierungsprozesse behindern könnten, gar nicht erst angestoßen werden. Das Feedback scheint in dieser kombinierten Form aus Reduktion der quantitativen Häufigkeit und der positiven Normativität eher zu einer Zufriedenheit mit der eigenen Leistung und einer Reproduktion des erfolg-

reichen Bewegungsmusters zu führen. Dies erklärt somit, dass das Feedback in der POS14 einerseits Automatisierungsprozesse begünstigt, aber andererseits weitere Leistungssteigerungen behindert hat. Die Ergebnisse dieses Experimentes unterstützen also die allgemeine Forschungshypothese II in ihrer eingeschränkten Form (siehe Kapitel 3.4.4), die einen automatisierungsförderlichen Effekt positiver Feedback-Valenz in Kombination mit reduzierter Feedbackhäufigkeit annimmt. Durch dieses Experiment lässt sich jedoch nur der erste Teil der FH\_2 stützen. Um die gesamte Forschungshypothese zu überprüfen muss nun der Vergleich mit einer Gruppe angestellt werden, die unter negativer Feedback-Valenz in Kombination mit reduzierter Feedbackhäufigkeit übt.

Daher wird nun im folgenden Experiment, entsprechend des vorausgeplanten Untersuchungsdesigns, der Effekt der positiven Feedback-Valenz mit dem Effekt negativer Feedback-Valenz verglichen. Zu diesem Zweck wird die Gruppe NEG14 eingesetzt, die bis auf die Berechnung des normativen Bezugswertes die identische Intervention wie die POS14 durchläuft und somit direkt vergleichbar ist.

### **3.6 Experiment 2b**

Entsprechend des geplanten Untersuchungsdesigns wird in diesem Experiment der Effekt des normativ positiven Feedbacks mit dem des normativ negativen Feedbacks bei gleichsam reduzierter Feedbackhäufigkeit verglichen. Zu diesem Zweck wird die POS14 aus Experiment 2a herangezogen, die in diesem Experiment nun einer neuen Versuchsgruppe, der NEG14, gegenübergestellt wird.

Die NEG14 ist, bis auf die Berechnung des normativen Bezugswertes, identisch mit der POS14. Der Bezugswert in der NEG14 wird entsprechend der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Methode berechnet und liegt in dieser Gruppe zu ca. 78% der Versuche unter dem tatsächlichen Fehler der Versuchspersonen. Er suggeriert den Versuchsteilnehmern der NEG14 somit, dass ihre eigene Leistung unterdurchschnittlich ist. Entsprechend der Herleitung der allgemeinen Forschungshypothesen in Kapitel 2.3.3.5 und 2.4, hat normativ negatives Feedback hemmende Effekte auf die Leistungssteigerung und Automatisierung.

Bezüglich der allgemeinen Forschungshypothese I und den entsprechend formulierten Einschränkungen in den Kapiteln 3.4.4 und 3.5.4 wird also angenommen, dass die Steigerung der Präzisionsleistung durch Üben mit negativer Feedback-Valenz noch geringer ausfällt, als durch Üben mit positiver Feedback-Valenz.

Im Hinblick auf die Automatisierung liefert die Literatur deutliche Hinweise darauf, dass negative Feedback-Valenz hemmend wirkt, da sie, im Sinne des *expliziten Hypothesen-Testens*, bewusste Verarbeitungsprozesse herbeiführen kann (siehe Kapitel 2.3.3.5 und 2.4). Daher wird angenommen, dass die negative Feedback-Valenz zu einer geringeren Automatisierung führt als die positive Feedback-Valenz.

### 3.6.1 *Operationalisierte Forschungshypothesen*

In diesem Experiment werden die Einflüsse der positiven und negativen Feedback-Valenz, operationalisiert durch das normative Feedback, auf die Leistungssteigerung (FH\_I) und die Automatisierung (FH\_II) miteinander verglichen. Entsprechend der zuvor dargestellten Diskussionen und Herleitungen lauten die operationalisierten Forschungshypothesen für dieses Experiment:

*Operationalisierte Forschungshypothese I\_2b (OH I\_2b): In der POS14 zeigt sich eine stärkere Reduktion der abhängigen Variablen AE vom Prä-Test zum Retentions-Test, als in der NEG14.*

*Operationalisierte Forschungshypothese II\_2b (OH II\_2b): In der POS14 zeigt sich eine stärkere Reduktion der Doppeltätigkeitskosten für die abhängige Variable n-Back-Fehler vom Prä-Test zum Retentions-Test, als in der NEG14.*

### 3.6.2 *Datenauswertung*

Zur Prüfung der OH I\_2b wird der Interaktionseffekt VG x MZP betrachtet. Dieser wird mit Hilfe einer zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Versuchsgruppe (VG; POS14, NEG14) und Messzeitpunkt (MZP; Prä-Test, Retentions-Test) für die Variable AE unter Single-Task-Bedingungen berechnet. Zur Aufklärung des Effektes wird gruppenweise ein t-Test für abhängige Stichproben

durchgeführt. Die Forschungshypothese OH II\_2b wird durch den Interaktionseffekt  $VG \times MZP \times ETDT$  überprüft. Dieser wird mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit den Faktoren Messzeitpunkt ( $MZP$ ; Prä-Test, Retentions-Test), Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit ( $ETDT$ ) und Versuchsgruppe ( $VG$ ; POS14, NEG14) für die Variable  $n$ -Back-Fehler berechnet. Zur Aufklärung der Effekte werden jeweils zweifaktorielle ANOVAs mit den Faktoren  $ETDT$  und  $MZP$  für die beiden Interventionsgruppen berechnet.

### 3.6.3 Ergebnisse

Die deskriptiven Daten der NEG14 sind in Tab. 8 abgebildet. Entgegen der Erwartungen ist anhand der deskriptiven Daten bereits eine Reduktion des AEs zu beobachten. Die Doppeltätigkeitskosten steigern sich vom Prä- zum Retentions-Test geringfügig.

Tab. 8. Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen  $AE$  und  $n$ -Back-Fehler der Gruppe NEG14 zum Prä- und Retentions-Test.

Variable	Prä-Test		Retentions-Test	
	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit
$AE$ in °	7,09 (2,54)	7,09 (2,78)	5,07 (1,89)	5,17 (2,15)
$n$ -Back-Fehler	0,43 (0,43)	1,46 (0,46)	0,25 (0,43)	1,47 (0,84)

#### 3.6.3.1 Ergebnisse zur Hypothese OH I\_2b (Präzisionssteigerung)

Aufgrund der deskriptiven Statistik muss die Hypothese OH I\_2b bereits abgelehnt werden: Die NEG14 reduzierte den  $AE$  vom Prä- zum Post-Test um  $2,02^\circ$  von  $7,09^\circ$  auf  $5,07^\circ$ . Die POS14 hatte den  $AE$  in Experiment 2a jedoch nur um  $0,34^\circ$  von  $6,46^\circ$  auf  $6,12^\circ$  verringert. Entgegen der Hypothese OH I\_2b zeigt sich also in der NEG14 eine stärkere Reduktion des  $AE$  als in der POS14.

Die zweifaktorielle ANOVA zeigt für den  $AE$  unter Einzeltätigkeit keinen signifikanten Interaktionseffekt für die Faktoren  $MZP \times VG$  (siehe links in Abb. 34),  $F(2, 26) = 3.88$ ,  $p = .060$ ,  $\eta^2_p = .13$ . Die zur weiteren Aufklärung des Effektes herangezogenen t-Tests für abhängige Stichproben zeigen für die POS14 keine

Verringerung des *AE* (siehe Kapitel 3.6.3). Für die NEG14 hingegen konnte eine signifikante Reduktion des *AE* unter Einzeltätigkeit vom Prä- zum Retentions-Test beobachtet werden,  $t(1, 13) = 3.40, p = .005, d_z = 0.91$ .

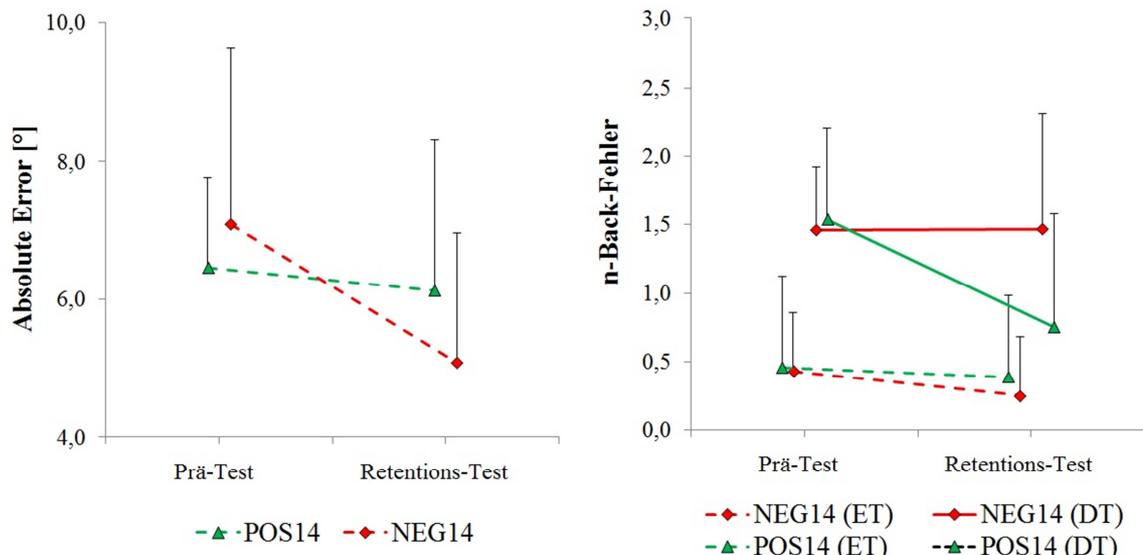


Abb. 34. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängigen Variablen *AE* und *n-Back-Fehler* unter Einzeltätigkeit bzw. unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der NEG14 und POS14 im Vergleich.

### 3.6.3.2 Ergebnisse zur Hypothese OH II\_2b (Automatisierung)

Mit Hilfe der dreifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren *MZP* (Prä-Tests, Retentions-Test), *ETDT* (Einzeltätigkeit, Doppeltätigkeit) und *VG* (POS14, NEG14) für die Variable *n-Back-Fehler* ließ sich ein signifikanter Interaktionseffekt  $MZP \times ETDT \times VG$  feststellen (siehe rechts in Abb. 34),  $F(2, 26) = 9.27, p = .005, \eta^2_p = .26$ . Die OH II\_2b kann also bestätigt werden. Wie in Kapitel 3.5.3 dargestellt, zeigte sich für die POS14 ein signifikanter Interaktionseffekt für die zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren  $MZP \times ETDT$ . Die gleiche Berechnung ergab in der NEG14 hingegen keinen Interaktionseffekt,  $F(1, 13) = .659, p = .431, \eta^2_p = .05$ .

### 3.6.4 Diskussion

Entgegen der Erwartungen lässt sich nicht nachweisen, dass die POS14 ihre Präzisionsleistung vom Prä- zum Retentions-Test stärker steigern konnte, als

die NEG14. Überraschenderweise konnte sogar beobachtet werden, dass die NEG14 ihre Leistung vom Prä- zum Retentions-Test verbesserte. Dies war in der POS14 nicht der Fall. Die statistische Prüfung dieses Gruppenunterschieds verfehlte knapp das Signifikanzniveau ( $p = .060$ ). In den beiden Gruppen POS100 und POS14 war bereits zum Prä-Test ein Leistungsplateau erreicht, welches im weiteren Übungsverlauf nicht weiter gesteigert werden konnte. In der NEG 14 kam es in der Aneignungsphase zwar ebenfalls zu einer Steigerung der Präzisionsleistung von  $8,95^\circ$  auf  $7,09^\circ$ . Diese Leistungssteigerung ist jedoch nicht signifikant  $t(1, 13) = 1.22, p = .244, d_z = 0.33$ . Die signifikante Reduktion des *AE* in der NEG14 könnte also damit erklärt werden, dass die Asymptote zum Prä-Test in dieser Gruppe einfach noch nicht erreicht war. Dennoch zeigte die NEG14 zum Retentions-Test mit einem *AE* von durchschnittlich  $5,07^\circ$  eine Präzision, die über der Leistung der beiden normativ positiven Gruppen liegt. Der *AE* der POS14 lag bei  $6,12^\circ$  und der der POS100 bei  $5,68^\circ$ . Eine einfaktorielle ANOVA mit dem sechsfach gestuften Faktor *MZP* (M0, M1, P2, P3, P4 und P5) wurde herangezogen, um die übungsbegleitende Leistungssteigerung zu überprüfen. Diese wird in der NEG14 zwar nicht signifikant, dennoch ist eine Tendenz zu erkennen, die durch einen starken Effekt unterstützt wird,  $F(1, 9) = 2.65, p = .097, \eta^2_p = .60$ . Somit scheint es also möglich, dass sich die Leistungssteigerung auf die negative Normativität zurückführen lässt: Der normative Bezugswert könnte in der NEG14 die Setzung und Anpassung des eigenen Anspruchsniveaus ähnlich beeinflusst haben wie in den beiden Gruppen mit normativ positivem Feedback. Er scheint den Versuchspersonen eine Orientierung für die Festlegung des individuellen Anspruchsniveaus zu bieten. Der normativ negative Referenzwert wurde jedoch nur in ca. 25% der Übungsversuche, gemittelt über alle Teilnehmer der NEG14, unterboten. Die Probanden dieser Gruppe schätzten ihre eigene Leistung in Folge der Bezugswert-Manipulation als unterdurchschnittlich ein, was wiederum eine weitere Fehlerkorrektur veranlasste. Der Manipulationscheck (siehe Kapitel 3.2.2.2) kann nachweisen, dass die NEG14 ihre eigene Leistung, im Vergleich zu Anderen, nach der Intervention um 0,3 Punkte schlechter einschätzten als vorher. Diese Reduktion der relativen Leistungseinschätzung in Folge des normativ

negativen Feedbacks wird für die gesamte Gruppe signifikant,  $Z = -2.00$ ,  $p = .046$ . Die Teilnehmer der NEG14 nahmen ihre eigene Leistung also, in Folge des normativ negativen Bezugswertes, als unterdurchschnittlich und somit häufig als Misserfolg wahr. Laut Literatur müsste dies Anlass für Bewegungskorrekturen geben, die bewusste Kontroll- und explizite Lernprozesse initiieren und zu *maladaptive short-term corrections* führen können. Diese Vorgänge werden als hinderlich für die Leistungssteigerung und die Automatisierung angesehen. Bezüglich der Automatisierung scheint diese Erklärung plausibel und wird durch die Ergebnisse zur OH II\_2b gestützt. Auf die Steigerung der Präzisionsleistung scheint das in dieser Untersuchung eingesetzte normativ negative Feedback jedoch eine förderliche Wirkung zu haben. Um diese überraschenden Erkenntnisse, die im Widerspruch zu der zuvor aufgestellten Hypothese stehen, zu unterstützen, sollten in weiteren Forschungsarbeiten Replikationen mit entsprechenden, a priori formulierten Hypothesen durchgeführt werden.

Neben der Theorie des Anspruchsniveaus bietet an dieser Stelle die sogenannte Goal-Setting-Theorie einen interessanten Anknüpfungspunkt: Die aus der Psychologie stammende Theorie wurde erstmalig 1985 von Locke und Latham in den Sportkontext übertragen. Demnach bewirken spezifische und herausfordernde Ziele bessere Leistungen als einfache und allgemein formulierte Ziele. Als Voraussetzung für diesen leistungsförderlichen Effekt ist die Akzeptanz der gesetzten Ziele durch die Übenden zu nennen. Als Erklärung für diese Wirkung werden eine stärkere Anstrengungsbereitschaft, Beharrlichkeit und eine optimierte Aufmerksamkeitslenkung genannt, sowie die verstärkte Entwicklung alternativer Lösungsstrategien (Locke & Latham, 1985, S. 205–208). Letztere ist ähnlich zu verstehen wie die Strategie des *expliziten Hypothesen-Testens*. Die Goal-Setting-Methode funktioniert jedoch nur im Zusammenhang mit Feedback zur Leistungsentwicklung. An dieser Stelle zeigen sich einige Parallelen mit den bisher angestellten Überlegungen zu den Effekten normativen Feedbacks und der Theorie des Anspruchsniveaus. Denn Locke und Latham verstehen Feedback im Kontext des Goal-Settings immer mit einem Bezug zu einem Standardwert, ähnlich wie es beim normativen Feedback zum Einsatz kommt: „When feedback is given in relation to standard, individuals evaluate their own

performance and this motivates further action“ (Locke & Latham, 1985, S. 207). Sie bieten einen Erklärungsansatz dafür, warum das normativ positive Feedback zu keinen weiteren Leistungsverbesserungen geführt haben könnte: „If the feedback shows performance to be at or above the level of the goal, the individual evaluates his or her performance positively and is motivated to maintain the level of effort“ (Locke & Latham, 1985, S. 207). Wie bereits in den vorangegangenen Diskussionen erläutert, scheint die positive Normativität eher zu einer Bestätigung der aktuellen Leistung zu führen und keine weiteren Fehlerkorrekturversuche zu veranlassen. Für die Versuchsteilnehmer ist es nicht notwendig weitere Anstrengungen und Kapazitäten für die Leistungssteigerung einzusetzen, da sie ja bereits überdurchschnittlich gut sind. Es kommt somit zu einem Leistungsplateau, das erhalten bleibt. Entsprechend der Goal-Setting-Theorie wäre es für weitere Leistungsverbesserungen notwendig die Zielsetzung zu steigern. Diese Funktion kommt in diesem Fall dem normativ negativen Feedback zu: „When feedback shows performance to be below standard, the individual feels dissatisfied and is motivated to improve future performance (. . .) through greater effort, additional practice, or improved techniques“ (Locke & Latham, 1985, S. 207). Die lernförderlichen Effekte der Goal-Setting-Methode konnten in empirischen Untersuchungen mit sportpraktischen Lernaufgaben nachgewiesen werden (Lerner, Ostrow, Yura & Etzel, 1996; Tzetzis, Kioumourtoglou & Mavromatis, 1997). Das normativ negative Feedback könnte in der vorliegenden Untersuchung also als herausfordernde Zielvorgabe für die Versuchsteilnehmer der NEG14 gewirkt haben. Steigerte sich die eigene Leistung, so passte sich auch der normative Bezugswert an und stellte somit immer wieder herausfordernde Leistungsziele dar. Des Weiteren suggerierte der, sich immer weiter steigernde Bezugswert den Versuchspersonen der NEG14, dass eine weitere Leistungssteigerung auch grundsätzlich möglich ist, da die angebliche Vergleichsgruppe diese Leistung ja bereits erbracht hatte. Im Gegensatz dazu könnte das Ausbleiben einer Verbesserung des Referenzwertes in den Gruppen mit normativ positivem Feedback dazu geführt haben, dass diese eine weitere Leistungssteigerung gar nicht für möglich hielten.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die negative Normativität allerdings noch mit einer reduzierten Feedbackhäufigkeit kombiniert, welche den *maladaptive short-term corrections* möglicherweise entgegengewirkt haben könnte. Die Leistungssteigerung in der NEG14 könnte also durch die spezielle Kombination aus negativer Normativität und reduzierter Feedbackhäufigkeit hervorgerufen worden sein. Aus diesem Grund ist das anschließende Telexperiment 2c sehr interessant. In diesem wird eine aktive Kontrollgruppe eingesetzt, die den gleichen Untersuchungsablauf durchläuft wie die NEG14 und POS14, jedoch den normativen Bezugswert nicht zurückgemeldet bekommt. Mit Hilfe dieser Gruppe soll ergründet werden, ob sich der leistungssteigernde Effekt in der NEG14 auf die negative Feedback-Valenz oder auf die reduzierte Feedbackhäufigkeit zurückführen lässt.

Bezüglich der Leistungssteigerung zeigt sich nun, zusammengefasst über die drei bisher abgeschlossenen Telexperimente, folgendes Bild: Durch die Experimente 1a und 2a konnte nachgewiesen werden, dass die positive Feedback-Valenz, unabhängig von der Feedbackhäufigkeit, keine Leistungssteigerung herbeiführen konnte. Im Gegensatz dazu zeigte sich im Telexperiment 2b, entgegen der allgemeinen Forschungshypothese I, eine Steigerung der Präzisionsleistung in Folge der negativen Feedback-Valenz. Da die Ergebnisse der Experimente die allgemeine Forschungshypothese I nicht unterstützen und sogar gegenteilige Befunde liefern, muss die Hypothese an dieser Stelle abgelehnt werden. Ob sich, wie in Kapitel 3.5.4 bereits angedeutet, möglicherweise leistungssteigernde Effekte positiver Feedback-Valenz in einer frühen Aneignungsphase zeigen, die eventuell auch einer negativen Feedback-Valenz überlegen sein könnten, kann im weiteren Experimentalverlauf nicht geklärt werden und gibt stattdessen Anlass für weitere Forschungsarbeiten.

Das normativ negative Feedback scheint zwar die Leistungssteigerung zu begünstigen, aber, wie in Hypothese OH II\_2b erwartet, die Automatisierung zu hemmen. Wie sich im Verlauf dieser Diskussion bereits herausgestellt hat, scheint die negative Normativität dazu zu führen, dass die eigene Leistung als Misserfolg und infolgedessen als korrekturbedürftig angesehen wird. Dies mag zwar zur Leistungssteigerung führen, aber scheint bewusste Kontrollprozesse

hervorzurufen, so dass Automatisierungsprozesse behindert werden. Die allgemeine Forschungshypothese II kann also durch die Ergebnisse dieses Experimentes bekräftigt werden. Um nun herauszufinden, ob der automatisierungsfördernde Effekt in der POS14 auf die positive Valenz zurückzuführen ist, wird im folgenden Experiment die aktive Kontrollgruppe entsprechend des geplanten Untersuchungsablaufes ergänzt.

### 3.7 Experiment 2c

Im letzten Experiment dieser Untersuchung soll nun differenziert werden, welchen Einfluss die Feedback-Valenz und die reduzierte Feedbackhäufigkeit auf die Leistungssteigerung und die Automatisierung haben. In den Experimenten 2a und 2b konnte bereits nachgewiesen werden, dass positive Feedback-Valenz in Kombination mit einer reduzierten Feedbackhäufigkeit die Automatisierung fördert, während negative Feedback-Valenz, kombiniert mit reduzierter Feedbackhäufigkeit, die Präzisionssteigerung begünstigt. Nun sollen die beiden Gruppen POS14 und NEG14 einer aktiven Kontrollgruppe (KGa) gegenübergestellt werden, die den normativen Bezugswert nicht eingeblendet bekommt und somit nur die reduzierte Feedbackhäufigkeit einen Einfluss ausüben kann.

Die KGa soll dabei helfen, den leistungssteigernden Effekt der negativen Feedback-Valenz zu ergründen. Da die allgemeine Forschungshypothese I, in Folge der vorangegangenen Experimente, bereits verworfen wurde, werden die Effekte bezüglich der Leistungssteigerung in diesem Experiment auf Basis der Annahmen untersucht, die aus den Erkenntnissen der bisherigen Untersuchungsergebnisse resultieren. Entsprechend der in Kapitel 3.6.4 erarbeiteten Begründungen bezüglich der Steigerung der Präzisionsleistung in der NEG14 wird für das Telexperiment 2c angenommen, dass die KGa, die keinen normativen Bezugswert eingeblendet bekommt, ebenso wie die POS14 keine signifikante Leistungssteigerung zeigt und diese geringer ausfällt, als in der NEG14.

Sollte jedoch in der KGa, genauso wie in der NEG14, eine Steigerung der Präzisionsleistung vorliegen, so müsste der lernförderliche Effekt nicht in der negativen Normativität begründet sein, sondern viel mehr in der reduzierten Feed-

backhäufigkeit. Der Grund, warum die POS14 trotz reduzierter Feedbackfrequenz keine Leistungssteigerung zeigt, läge demnach in einer hemmenden Wirkung positiver Feedback-Valenz auf die Präzisionssteigerung. Bleibt die Leistungssteigerung in der KGa jedoch aus, oder fällt diese zumindest vergleichsweise geringer aus, als in der NEG14, so wäre dies ein Hinweis darauf, dass der leistungssteigernde Effekt der negativen Normativität zuzuschreiben ist. Die bezüglich dieser Annahmen aufgestellten operationalisierten Forschungshypothesen werden weiterhin mit der römischen Ziffer I gekennzeichnet, um den Bezug zur Leistungssteigerung in der gesamten Arbeit einheitlich zu betiteln.

Im Zusammenhang mit der zweiten Forschungshypothese stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Feedback-Valenz und der reduzierten Feedbackhäufigkeit auf die Automatisierung. Die POS14 zeigte eine Automatisierung, die NEG14 hingegen nicht. Vorausgegangene Experimente mit der gleichen Lernaufgabe konnten eine Automatisierung in Folge reduzierter Feedbackfrequenzen ohne zusätzliche Valenz-Manipulation feststellen, jedoch mit geringeren Effektstärken als in der POS14 (Agethen & Krause, 2016; Krause et al., 2017). Daher wird davon ausgegangen, dass sowohl die Reduktion der Feedbackhäufigkeit, als auch die positive Feedback-Valenz die Automatisierung begünstigen, jedoch die Kombination beider Übungsbedingungen, wie in der POS14, den stärksten Effekt hat. Negative Feedback-Valenzen scheinen hingegen die Automatisierung in Folge bewusster Verarbeitungsprozesse zu hemmen. Demnach müsste die KGa stärker automatisieren als die NEG14, jedoch geringer als die POS14.

### 3.7.1 *Operationalisierte Forschungshypothesen*

Bezüglich der Steigerung der Präzisionsleistung wird postuliert, dass die aktive Kontrollgruppe, ebenso wie die POS14, ihre Leistung nicht steigern kann. Es wird ebenfalls angenommen, dass sich die Leistung in der KGa in einem geringeren Maße steigert als in der NEG14. Darüber hinaus wird angenommen (FH\_II), dass die Automatisierung der POS14 stärker ist als die der aktiven Kontrollgruppe. Die KGa müsste jedoch eine stärkere Automatisierung aufwei-

sen als die NEG14. Diesen Vermutungen entsprechend lauten die operationalisierten Forschungshypothesen folgendermaßen:

*Operationalisierte Forschungshypothese I\_2c\_POS (OH I\_2c\_POS): Die KGa und die POS14 unterscheiden sich nicht bezüglich der Reduktion der abhängigen Variable AE vom Prä-Test zum Retentions-Test unter Einzeltätigkeit.*

*Operationalisierte Forschungshypothese I\_2c\_NEG (OH I\_2c\_NEG): Die KGa zeigt eine geringere Reduktion der abhängigen Variable AE vom Prä-Test zum Retentions-Test unter Einzeltätigkeit, als die NEG14.*

*Operationalisierte Forschungshypothese II\_2c\_POS (OH II\_2c\_POS): In der POS14 zeigt sich eine stärkere Reduktion der Doppeltätigkeitskosten für die abhängige Variable n-Back-Fehler vom Prä-Test zum Retentions-Test, als in der KGa.*

*Operationalisierte Forschungshypothese II\_2c\_NEG (OH II\_2c\_NEG): In der KGa zeigt sich eine stärkere Reduktion der Doppeltätigkeitskosten für die abhängige Variable n-Back-Fehler vom Prä-Test zum Retentions-Test, als in der NEG14.*

### 3.7.2 Datenauswertung

Zur Prüfung der OH I\_2c\_POS und OH I\_2c\_NEG werden die Interaktionseffekte  $MZP \times VG$  für die Gruppen KGa und POS14 bzw. KGa und NEG14 herangezogen. Die Interaktionseffekte werden jeweils mittels einer zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Versuchsgruppe (VG; KGa, POS14, NEG14) und Messzeitpunkt (MZP; Prä-Test, Retentions-Test) für die Variable AE unter Single-Task-Bedingungen berechnet. Da es sich bei der OH I\_2c\_POS um eine Nicht-Unterschiedshypothese handelt, wird auf einem Signifikanzniveau von 20% getestet. Alle anderen Hypothesentests werden mit  $\alpha \leq .05$  durchgeführt. Zur Aufklärung der Effekte werden gruppenweise t-Tests für abhängige Stichproben berechnet.

Die Hypothesen OH II\_2c\_POS und OH II\_2c\_NEG werden mittels der Interaktionseffekte  $MZP \times ETDT \times VG$  für die Gruppen KGa und POS14 bzw. KGa und NEG14 geprüft. Zur Berechnung wird jeweils eine dreifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Messzeitpunkt ( $MZP$ ; Prä-Test, Retentions-Test), Einzeltätigkeit/Doppeltätigkeit ( $ETDT$ ) und Versuchsgruppe ( $VG$ ; KGa, POS14, NEG14) für die Variable  $n$ -Back-Fehler eingesetzt. Zur Aufklärung der Effekte werden jeweils gruppenweise zweifaktorielle ANOVAs mit den Faktoren  $ETDT$  und  $MZP$  berechnet.

### 3.7.3 Ergebnisse

Ein Überblick über die deskriptiven Ergebnisse der  $KGa$  bezüglich der beiden abhängigen Variablen  $AE$  und  $n$ -Back-Fehler gibt die Tab. 9. Bei der Betrachtung der deskriptiven Daten wird bereits deutlich, dass die Präzisionsleistung der  $KGa$  schon zum Prä-Test auf einem sehr hohen Level liegt und sich zum Retentions-Test nicht weiter steigern kann. Wie in Kapitel 3.3.3 bereits erläutert wurde, kommt es durch diesen Prä-Test-Wert zu Interpretationseinschränkungen, da die Parallelisierung in diesem Fall nicht gut gelungen ist. Die  $KGa$  unterscheidet sich bereits zum Prä-Test signifikant von allen anderen Gruppen hinsichtlich des  $AE$  (siehe Kapitel 3.3.3), so dass die Ergebnisse nur vorsichtig interpretiert werden können. Auf Seiten der Doppeltätigkeitskosten zeigen die deskriptiven Daten vorab keine deutliche Reduktion.

Tab. 9. Mittelwerte und Standardabweichungen für die abhängigen Variablen  $AE$  und  $n$ -Back-Fehler der Gruppe  $KGa$  zum Prä- und Retentions-Test.

Variable	Prä-Test		Retentions-Test	
	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit	Einzeltätigkeit	Doppeltätigkeit
$AE$ in °	5,32° (1,71)	5,94° (2,79)	5,35° (1,25)	4,82° (2,21)
$n$ -Back-Fehler	0,82 (0,77)	1,89 (0,79)	0,50 (0,65)	1,43 (0,73)

### 3.7.3.1 Ergebnisse zu den Hypothesen OH I\_2c\_POS und OH I\_2c\_NEG (Präzisionssteigerung)

Die zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *VG* (KGa, POS14) x *MZP* (Prä-Test, Retentions-Test) zeigt für die Variable *AE* unter Single-Task-Bedingung keinen Interaktionseffekt *VG* x *MZP*,  $F(2, 26) = 0.18$ ,  $p = .677$ ,  $\eta^2_p = .01$ . Dies ist Abb. 35 zu entnehmen, indem die Entwicklung zwischen der POS14 (grüne Linie) und KGa (blaue Linie) verglichen wird. Die Hypothese OH I\_2c\_POS, welche annimmt, dass sich die POS14 und die KGa nicht unterscheiden, wird durch die vorliegenden Daten also bestätigt.

Zur Überprüfung der OH I\_2c\_NEG wurde die gleiche ANOVA durchgeführt, jedoch mit den Faktoren *VG* (KGa, NEG14) x *MZP* (Prä-Test, Retentions-Test). Diese Berechnung ergab einen signifikanten Interaktionseffekt,  $F(2, 26) = 5.88$ ,  $p = .023$ ,  $\eta^2_p = .18$ . Dies ist in der Abb. 35 zu sehen, wenn man die Entwicklung der NEG 14 (rote Linie) mit der der KGa (blaue Linie) vergleicht. Die Hypothese OH I\_2c\_NEG, welche postuliert, dass die KGa eine geringere Leistungssteigerung zeigt als die NEG14, kann demnach bestätigt werden. Der t-Test für abhängige Stichproben, der für die KGa durchgeführt wurde, zeigte keine signifikante Reduktion des *AE* in dieser Gruppe,  $t(1, 13) = -0.04$ ,  $p = .969$ ,  $d_z = -0.01$ .

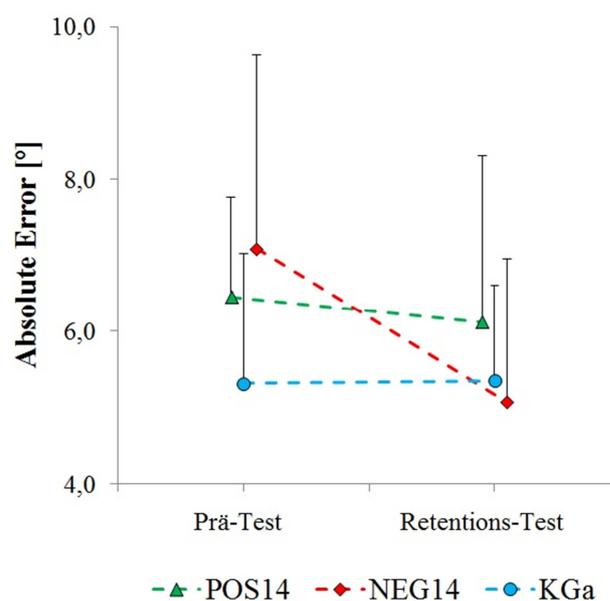


Abb. 35. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängige Variable *AE* unter Einzeltätigkeit in der KGa, der POS14 und NEG14 im Vergleich.

### 3.7.3.2 Ergebnisse zu den Hypothesen OH II\_2c\_POS und OH II\_2c\_NEG (Automatisierung)

Die dreifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *MZP* x *ETDT* x *VG* (KGa, POS14) zeigte keinen signifikanten Interaktionseffekt,  $F(2, 26) = 2.08$ ,  $p = .161$ ,  $\eta^2_p = .07$ . Die Hypothese OH II\_2c\_POS muss also abgelehnt werden. Die beiden Gruppen POS14 und KGa entwickeln sich also hinsichtlich der Doppeltätigkeitsreduktion nicht unterschiedlich (siehe rechte Grafik in Abb. 36).

Auch die dreifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *MZP* x *ETDT* x *VG* (KGa, NEG14) konnte keinen signifikanten Interaktionseffekt aufdecken,  $F(2, 26) = 0.62$ ,  $p = .440$ ,  $\eta^2_p = .02$ . Die OH II\_2c\_NEG muss also ebenfalls abgelehnt werden, da sich die beiden Gruppen hinsichtlich der Entwicklung der Doppeltätigkeitskostenreduktion statistisch nicht unterscheiden (siehe linke Grafik in Abb. 36). Zur Aufklärung der Reduktion der Doppeltätigkeitskosten in der KGa wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *ETDT* x *MZP* berechnet. Diese zeigt keinen signifikanten Interaktionseffekt für die KGa,  $F(1, 13) = 0.17$ ,  $p = .686$ ,  $\eta^2_p = .01$ . Die KGa zeigt also keine Automatisierung.

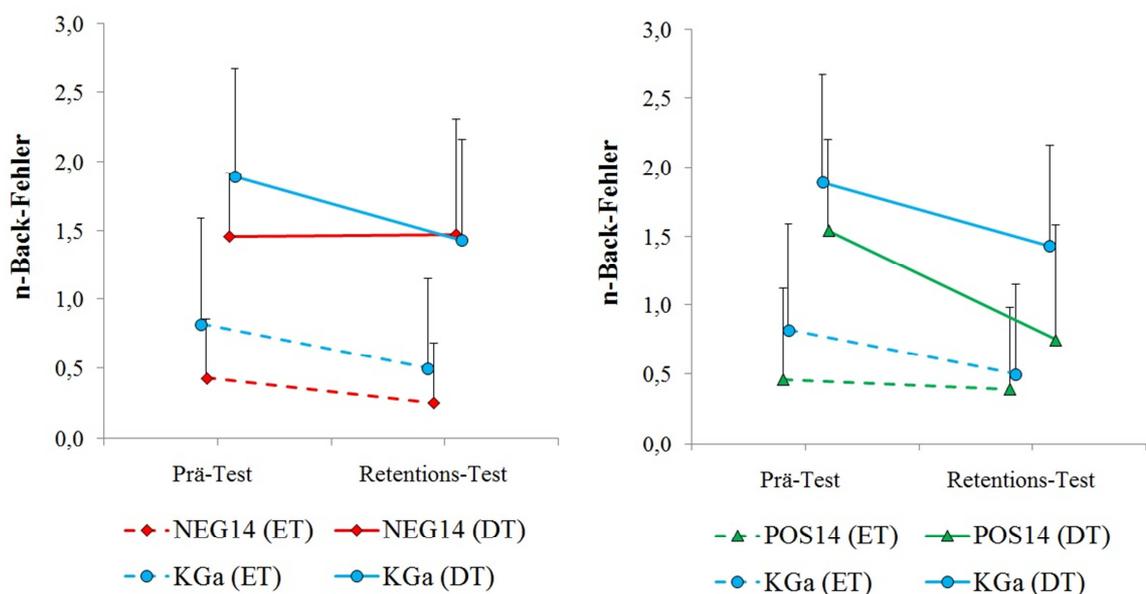


Abb. 36. Ergebnisse des Prä-Tests und Retentions-Tests für die abhängige Variable *n-back-Fehler* unter Einzel- und Doppeltätigkeit in der KGa, der POS14 und NEG14 im Vergleich.

### 3.7.4 Diskussion

Entsprechend der zuvor aufgestellten Annahme bezüglich der Leistungssteigerung zeigt sich in der KGa keine Verbesserung der Präzisionsleistung. Die KGa entwickelt sich ähnlich wie die POS14, aber anders als die NEG14. Eine Steigerung der Präzisionsleistung ist nur in der NEG14 zu finden, welche somit auf die negative Normativität zurückzuführen ist und nicht auf die reine Reduktion der Feedbackhäufigkeit oder das Ausbleiben der positiven Feedback-Valenz. Aufgrund der nicht gelungenen Parallelisierung bezüglich des AE müssen diese Gruppenvergleiche jedoch mit Vorsicht interpretiert werden und dürfen nicht verallgemeinert werden. Denn möglicherweise konnte sich in der KGa nur deshalb keine weitere Leistungssteigerung einstellen, weil die Versuchsteilnehmer bereits zum Prä-Test mit durchschnittlich  $5,32^\circ$  einen sehr geringen AE zeigten. Dieser liegt nur knapp über dem AE der NEG14 ( $5,07^\circ$ ) nach Ende der Intervention und deutlich unter dem der POS14 ( $6,12^\circ$ ) und POS100 ( $5,68^\circ$ ) nach der gruppenspezifischen Übungsphase. Die KGa reduziert den AE bereits in der Aneignungsphase signifikant um ca.  $2^\circ$ ,  $t(1, 13) = 2.53$ ,  $p = .025$ ,  $d_z = 0.67$ . Eine Leistungssteigerung im Übungsverlauf wird laut der einfaktoriellen Varianzanalyse mit dem sechsfach gestuften Faktor MZP (M0, M1, P2, P3, P4 und P5),  $F(1, 3.14) = 2.62$ ,  $p = .061$ ,  $\eta^2_p = .17$ , knapp nicht signifikant.

Tendenziell kann aus diesen Daten also entnommen werden, dass das normativ negative Feedback eine Steigerung der Präzisionsleistung bewirken kann, wenn es in Kombination mit einer reduzierten Feedbackhäufigkeit eingesetzt wird. Normativ positives Feedback scheint nicht die Leistungssteigerung zu verhindern, sondern das Ausbleiben der negativen Normativität. Eine Aussage darüber, wie hoch die Anteile der Häufigkeitsreduktion und der negativen Valenz an diesem präzisionssteigernden Effekt sind, lässt sich aufgrund der erschwerten Interpretation in Folge der Parallelisierungsprobleme jedoch nicht treffen. Für weitere Untersuchungen wäre es interessant, die Feedbackhäufigkeit und negative Normativität in Reinformen und Kombinationen gegenüberzustellen, um die reinen und wechselseitigen Einflüsse auf die Präzisionssteigerung differenzierter beschreiben zu können.

Die beiden automatisierungsbezogenen Hypothesen müssen abgelehnt werden. Zwar zeigt die KGa keine Automatisierung, dennoch unterscheidet sie sich nicht signifikant von den beiden anderen Gruppen. Entgegen der Erwartungen scheint sich die KGa eher ähnlich zur NEG14 zu entwickeln. Dies ist verwunderlich, da in vorangegangenen Untersuchungen mit der gleichen Lernaufgabe Versuchsgruppen, die eine Intervention mit ähnlichem Feedbackplan durchliefen, eine Automatisierung zeigten. Im Vergleich zu den entsprechenden Gruppen aus den Experimenten von Agethen und Krause (2016) und Krause, Agethen & Zobe (2017) wurden in der KGa nur zwei Dinge geändert: Einerseits wurde der Übungsumfang um insgesamt 40 Versuche von 760 auf 720 trials reduziert. Andererseits wurde die Skalierung an die Bedürfnisse der hier vorliegenden Untersuchung angepasst, indem in der Ergebnisgrafik Fehlerwerte bis  $\pm 20^\circ$  abgebildet wurden. In den vorausgegangenen Experimenten wurde mit einer Skalierung von  $\pm 30^\circ$  gearbeitet. Dadurch wirkten die im Feedbackdisplay abgebildeten Fehlerwerte in den früheren Studien kleiner, als in der aktuell vorliegenden Untersuchung. Diese Modifikation war jedoch notwendig, um das normativ negative Feedback überhaupt abbilden zu können. Bei einer Skalierung von  $\pm 30^\circ$  hätten die normativen Bezugswerte so nah an der  $0^\circ$ -Linie gelegen, dass die Manipulation nicht mehr glaubhaft gewesen wäre. Daher musste die Darstellung vergrößert werden, was infolgedessen in allen Gruppen zu einer verstärkten Fehlerwahrnehmung geführt haben könnte. Die größere Darstellung der Fehler könnte somit verstärkt bewusste Verarbeitungsprozesse initiiert haben, die der Automatisierung entgegengewirkt haben könnten. Hinzu kommt der geringfügig reduzierte Übungsumfang. In weiteren Untersuchungen sollten also der Einfluss des Übungsumfanges, aber auch die Wirkung der Skalierung bzw. Darstellung der Fehlerhöhe thematisiert werden. Darüber hinaus ist es interessant, dass nur die POS14 eine Automatisierung zeigen konnte, nicht aber die beiden Gruppen KGa und NEG14, die jeweils auch mit reduzierter Feedbackhäufigkeit übten. Der zentrale Faktor für die Automatisierung scheint in der POS14 also die positive Feedback-Valenz zu sein und nicht in dem Ausbleiben der negativen Valenz oder der reinen Reduktion der Feedbackfrequenz begründet zu sein.

Die Intervention in der aktiven Kontrollgruppe ist jedoch nicht als komplett valenzfreie Übungsbedingung anzusehen. Es wurde zwar keine bestimmte Valenz induziert, wie in den anderen Interventionsgruppen, dennoch kann es zu verschiedenen, subjektiven Leistungsbewertungen gekommen sein. Diese sind durch das Ausbleiben der Normativität jedoch viel weniger kontrollierbar und vorrangig den individuellen Interpretationen der Versuchsteilnehmer überlassen. Aus diesem Grund ist es besonders interessant, sich die Ergebnisse des Manipulationschecks anzuschauen, in dem überprüft wurde, ob sich die Einschätzung der eigenen Leistung im Vergleich zu Anderen im Verlauf der Interventionsphase veränderte. Dabei zeigt der Wilcoxon-Test für die KGa keine Veränderung der relativen Selbsteinschätzung im Übungsverlauf,  $Z = -1.34$ ,  $p = .180$ . Die Versuchsteilnehmer dieser Gruppe schätzten ihre eigene Leistung vor und nach der Intervention als durchschnittlich ein. Das normative Feedback hatte in den anderen Interventionsgruppen hingegen den Effekt, dass die Probanden ihre eigene Leistung als über- bzw. unterdurchschnittlich einschätzten. Die Einschätzung der eigenen Leistung als unterdurchschnittlich scheint dabei die Steigerung der Präzisionsleistung zu begünstigen. Die Bewertung der eigenen Leistung als überdurchschnittlich ist im Gegenzug anscheinend vorteilhaft für Automatisierungsprozesse.

## 4 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Studie sollte der Einfluss der Feedback-Valenz auf das motorische Lernen untersucht werden. Die beiden Teilaspekte der Leistungssteigerung und Automatisierung motorischer Fertigkeiten standen dabei gleichsam im Fokus des Forschungsinteresses, da einerseits beide Teilaspekte als zentrale Ziele des (sport-)motorischen Techniktrainings angesehen werden und es sich andererseits empfiehlt bei der Messung des motorischen Lernens, neben dem gängigen Kriterium der Leistungssteigerung, ein weiteres Lernmaß heranzuziehen (siehe Kapitel 2.1). Darüber hinaus wird die Automatisierung zwar als bedeutender Teilaspekt des motorischen Lernens angesehen, wurde in der Experimentalforschung bisher jedoch kaum berücksichtigt. Diese ist jedoch nicht nur von zentraler Bedeutung für den Sport, sondern spielt auch für Fertigkeiten im Alltag oder in der Rehabilitation eine wichtige Rolle. Nur wenn Bewegungen hochgradig automatisch kontrolliert werden, werden Aufmerksamkeitskapazitäten frei, die eingesetzt werden können, um gleichzeitig andere Aufgaben auszuführen, welche die Arbeitsgedächtnisressourcen beanspruchen (siehe Kapitel 2.2).

Motorische Lernprozesse sind stark abhängig von den Übungsbedingungen. Ein in diesem Zusammenhang bedeutsamer Faktor scheint das Feedback zu sein (siehe Kapitel 2.3). In der Forschungslandschaft der Motorik wurde bisher vor allem der Einfluss der Informationsfunktion des Feedbacks untersucht. Neueren Erkenntnissen zu Folge kann aber auch die Feedback-Valenz, welche als die Wertigkeit des Feedbacks mit den Ausprägungsformen positiv oder negativ angesehen wird, einen Einfluss auf die Leistungssteigerung und Automatisierung nehmen. Neurophysiologische und verhaltensorientierte Befunde deuten darauf hin, dass positive (Feedback-)Valenzen günstigere Voraussetzungen für Automatisierungsprozesse und die Leistungssteigerung bieten, als negative (Feedback-)Valenzen (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.3.3). Diese Annahme wurde in vier aufeinander aufbauenden Experimenten untersucht.

Im Folgenden sollen zunächst die Befunde hinsichtlich der Leistungssteigerung diskutiert werden, die sich auf die erste allgemeine Forschungshypothese be-

ziehen, welche, aufbauend auf den erlangten Befunden im Verlauf der Experimente, mehrmals eingeschränkt und schließlich verworfen werden musste:

Als zentrales Ergebnis lässt sich festhalten, dass bis auf die NEG14 keine andere Gruppe ihre Präzisionsleistung vom Prä- zum Retentions-Test steigern konnte. Dies widerspricht den a priori aufgestellten Hypothesen. Auf Basis der Literatur (bspw. Glimcher, 2011; Lewthwaite & Wulf, 2010; Schultz, Dayan & Montague, 1997) wurden Lernvorteile durch positive Valenzen erwartet, da sie die subjektive Bewertung der eigenen Leistung als Erfolg unterstützen und somit eine Reproduktion und ein Abspeichern erfolgreicher Bewegungsmuster begünstigen müssten (siehe Kapitel 2.3). Negative Valenzen hingegen müssten der Literatur entsprechend die Wahrnehmung der eigenen Leistung als Fehler bzw. Misserfolg bewirken. Infolgedessen müsste es zu *explizitem Hypothesentesten* und zur (Über-)Korrektur von Bewegungsfehlern kommen, die das motorische Lernen beeinträchtigen und das Ausbilden einer stabilen Bewegungsrepräsentation behindern (bspw. Masters & Maxwell, 2004; Wulf et al., 2010a). Die vorliegenden Experimente zeigten jedoch gegenteilige Befunde. Durch die positive Feedback-Valenz, die in den Gruppen POS100 und POS14 durch ein normativ positives Feedback operationalisiert wurde, konnte keine Steigerung der Präzisionsleistung erzielt werden (siehe Kapitel 3.4 und 3.5). Wie die Manipulationschecks ergaben, führte das normativ positive Feedback, wie beabsichtigt, dazu, dass die Versuchspersonen ihre eigene Leistung als überdurchschnittlich wahrnahmen. Das Feedback wirkte somit als Bestätigung der erzielten Leistung und gab den Versuchspersonen somit möglicherweise keinen Anlass mehr für weitere Bewegungskorrekturen. Speziell die Operationalisierung in Form des normativen Feedbacks könnte die Festlegung und Anpassung des Anspruchsniveaus beeinflusst haben, da es den Versuchspersonen ein konkretes Ziel vorgab. Da der normative Bezugswert als Zielvorgabe jedoch zu ca. 75% der Fälle übertroffen wurde, gewöhnten sich die Versuchspersonen daran, dass ihre Leistung das Anspruchsniveau überstieg. Die regelmäßig als große Erfolge wahrgenommenen Bewegungsleistungen erschienen also nicht mehr korrekturbedürftig, so dass sich die Leistung der Versuchspersonen der POS100 und POS14 früh auf einem Leistungsplateau einpendelte. Die NEG14

zeigte vom Prä- zum Retentions-Test jedoch eine unerwartete Leistungssteigerung (siehe Kapitel 3.6). Der Manipulationscheck deckte auf, dass die Versuchspersonen der NEG14 ihre Leistung in Folge der Intervention als unterdurchschnittlich einschätzten. Entsprechend bereits dargestellter Vorüberlegungen hätte dies motorische Lernprozesse aber eher behindern müssen. Eine Erklärung für die überraschenden Lernvorteile dieser Gruppe bietet die Goal-Setting-Theorie (bspw. Locke & Latham, 1985; Tzetzis, Kioumourtzoglou & Mavromatis, 1997): Diese nimmt an, dass es für eine Leistungssteigerung notwendig ist, herausfordernde, spezifische Ziele zu formulieren und diese dem Lernverlauf stetig anzupassen. Ergebnisse, die eine unterdurchschnittliche Leistung darstellen bewirken, den Autoren zu Folge, stärkere Anstrengungen, Beharrlichkeit, den Einsatz von mehr Kapazitäten sowie eine optimierte Aufmerksamkeitslenkung, um die eigene Leistung zu verbessern. Der normative Bezugswert in dem vorliegenden Experiment könnte genau diese Funktion erfüllt und somit stetig Anlass für weitere Bewegungskorrekturen und Leistungssteigerungen in der NEG14 bewirkt haben. Dem lernhemmenden Effekt der negativen Normativität, der bspw. in Folge von *maladaptive short-term corrections* auftritt, könnte die reduzierte Feedbackhäufigkeit von durchschnittlich 14% entgegengewirkt haben, die in der NEG14 mit dem normativ negativen Feedback kombiniert wurde. Die Goal-Setting-Theorie bietet in diesem Zusammenhang auch eine Erklärung für das Ausbleiben einer Leistungssteigerung in den Gruppen mit normativ positivem Feedback: Die positive Normativität scheint zu einer Bestätigung der eigenen Leistung geführt zu haben, die keine weiteren Korrekturen mehr notwendig machte. Die Versuchspersonen fühlten sich somit nicht veranlasst weitere Kapazitäten und Anstrengungen zu investieren, da ihre Leistungen ja bereits überdurchschnittlich gut waren. Durch die Ergänzung einer aktiven Kontrollgruppe, die keinen normativen Bezugswert eingeblendet bekam, konnte aufgeklärt werden, dass es sich bei dem hier beobachteten Effekt um einen lernförderlichen Einfluss negativer Normativität handelt und nicht um einen hemmenden Effekt der positiven Normativität (siehe Kapitel 3.7): Die KGa, die Feedback nach dem gleichen Verteilungsplan erhielt wie die POS14 und NEG14, jedoch ohne den normativen Bezugswert, zeigte keine Reduktion des

AE vom Prä- zum Retentions-Test. Diese Ergebnisse müssen jedoch mit Vorsicht behandelt werden, da die KGa sich bereits zum Prä-Test bezüglich des AE signifikant von den anderen Experimentalgruppen unterscheidet.

Die Interpretation der vorliegenden Ergebnisse im Kontext der Goal-Setting-Theorie lässt darüber hinaus die Frage aufkommen, ob es sich bei dem gefundenen Effekt um einen allgemeinen Feedback-Valenz-Effekt oder den Einfluss des normativen Feedbacks als spezifische Operationalisierungsform handelt. Unter Feedback-Valenz wird, wie in Kapitel 2.3.1 genauer definiert, die Wertigkeit des Feedbacks mit den Ausprägungsformen positiv oder negativ verstanden. Der vorliegende Effekt lässt sich jedoch, im Sinne der Goal-Setting-Theorie und der Theorie des Anspruchsniveaus, auf die konkrete Zielvorgabe und Anpassung des Anspruchsniveaus durch den normativen Bezugswert zurückführen. Andere Valenz-Operationalisierungen, die bspw. eine reine Bewertung der Leistung als gut oder schlecht vornehmen, würden keine konkrete Zielvorgabe anbieten. Die Festlegung von Leistungszielen und die Anpassung des Anspruchsniveaus würden daher vom Individuum selbst abhängen und nicht direkt durch das Feedback induziert. Der Lernvorteil in der NEG14 könnte somit auf die negative Normativität begrenzt sein und ließe sich demnach nicht auf andere Feedback-Formen übertragen, die negative Valenzen ohne Zielvorgaben induzieren. In weiteren Untersuchungen sollte also eine Differenzierung zwischen Normativitäts- und Valenzeffekten erforscht werden.

Neben dem zentralen Einflussfaktor der Feedback-Valenz bzw. Normativität zeigte sich bereits zu Beginn der Experimente, dass als weitere Faktoren der Leistungssteigerung der Übungsumfang und die Feedbackhäufigkeit berücksichtigt werden müssen. Die Reduktion der Feedbackhäufigkeit scheint im Falle der positiven Normativität keinen Effekt auf die Leistungssteigerung zu haben, da sowohl die POS100, als auch die POS14 ihre Präzisionsleistung in der Interventionsphase nicht verbesserten. Die Effekte der NEG14 könnten jedoch in der günstigen Kombination aus negativer Normativität und reduzierter Feedbackhäufigkeit begründet sein. Der Literatur entsprechend scheinen negative Feedback-Valenzen und normativ negatives Feedback vorrangig Nachteile für Lernprozesse zu bieten (bspw. Glimcher, 2011; Masters & Maxwell, 2004; Wulf

et al., 2010a). Die reduzierte Feedbackhäufigkeit, die in dieser Untersuchung in einem Fading-Muster umgesetzt wurde, bietet hingegen Lernvorteile, die der hemmenden Wirkung der negativen Valenz möglicherweise entgegengewirkt haben. Um diese Annahme zu überprüfen, wäre es notwendig in zukünftigen Untersuchungen normativ negatives Feedback bzw. negative Feedback-Valenzen mit unterschiedlichen Feedbackhäufigkeiten zu kombinieren und miteinander zu vergleichen. Im Kontext dieser Untersuchung wäre die Gruppe NEG100 interessant gewesen. Jedoch deutete vor der Untersuchung nichts darauf hin, dass die negative Normativität einen lernförderlichen Effekt haben könnte. Aus diesem Grund wurde die Gruppe nicht in das Untersuchungsdesign eingebunden.

Neben der Feedbackhäufigkeit scheint auch der Übungsumfang einen erheblichen Einfluss auf das motorische Lernen zu haben: Alle Versuchsgruppen dieser Untersuchung führten vor dem eigentlichen Prä-Test die gleiche Aneignungsphase von 40 Übungsversuchen ohne gruppenspezifische Feedbackvariationen durch. Bereits in Folge dieser Übungsphase, bei der die Versuchspersonen zu 100% der Versuche Feedback ohne Valenzinduktion erhielten, zeigte sich über alle Gruppen eine signifikante Reduktion des *AE* von durchschnittlich  $8,23^\circ$  auf  $6,38^\circ$ ,  $t(1, 69) = 3.80$ ,  $p < .001$ ,  $d_z = 0.45$ . Diese Steigerung der Präzisionsleistung lag demnach schon zum Prä-Test vor. Bei der Interpretation der Ergebnisse zur Leistungssteigerung muss also berücksichtigt werden, dass in dieser ersten Akquisitionsphase deutliche Effekte für die Steigerung der Präzisionsleistung in allen Gruppen vorliegen. Diese lassen sich gut durch das von Chein und Schneider (2012) vorgestellte Modell erklären, welches in Kapitel 2.2.2.8 beschrieben wurde. Demnach ist zu Beginn des Lernens vorrangig das metakognitive System aktiv, welches dafür zuständig ist ein Grundverständnis der Handlung zu erarbeiten und eine Repräsentation der Bewegung auszubilden. Sobald die Handlung kontrolliert ausgeführt werden kann reduziert sich die Beteiligung dieses Systems, während das kognitive Kontrollnetzwerk an Bedeutung gewinnt. Übertragen auf die hier vorliegende Untersuchung könnten die starken Leistungssteigerungen aller Gruppen in der Aneignungsphase dem me-

takognitiven System zugeordnet werden, da sich zum Zeitpunkt des Prä-Tests bereits eine grundlegende Bewegungsrepräsentation ausgebildet hatte.

Nach dem Prä-Test zeigte sich jedoch im weiteren Verlauf der Interventionsphase, außer für die NEG14, keine weitere Steigerung der Leistung. In den Versuchsgruppen POS100, POS14, KGa und KGp konnte vom Prä- zum Retentions-Test keine weitere Reduktion des *AE* festgestellt werden,  $t_s(1, 13) \leq 0.62$ ,  $p \geq .271$ ,  $d_z \leq 0.17$ . In diesen Gruppen scheint also bereits durch die unspezifische Aneignungsphase ein Leistungsplateau erreicht worden zu sein. Wie bereits beschrieben, konnte nur in der NEG14 eine Reduktion des *AE* vom Prä- zum Retentions-Test festgestellt werden,  $t(1, 13) = 3.40$ ,  $p = .005$ ,  $d_z = 0.91$ . Demnach scheint bereits frühzeitig eine Leistungsasymptote auf einem relativ hohen Fehlerniveau erreicht zu werden, wenn nicht ein normativ negatives Feedback wie in der NEG14 eingesetzt wird, um eine weitere Steigerung der Präzisionsleistung herbeizuführen. Die Präzisionssteigerung scheint somit in der sehr frühen Lernphase auch ohne induzierte Feedback-Valenz oder eine reduzierte Feedbackhäufigkeit aufzutreten. Sie lässt sich im weiteren Verlauf des Lernens allerdings nur durch die spezifische Feedbackform des normativ negativen Feedbacks in Kombination mit einem Fading-Muster weiter steigern.

Dies steht im Kontrast zur empirischen Befundlage, die vor Beginn dieser Untersuchung zu der Annahme führte, dass sich eine Leistungssteigerung durch positive Feedback-Valenzen begünstigen lässt (bspw. Lewthwaite & Wulf, 2010; Wulf et al., 2010a; Wulf & Lewthwaite, 2016). Diese greift auf Experimente zurück, die mit 10-80 Trials an ein bis zwei Übungstagen deutlich geringere Übungsumfänge einsetzten, als die vorliegende Untersuchung mit 720 gruppenspezifischen Versuchen an fünf Übungstagen. Die Effekte dieser Untersuchung und der in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Experimente beziehen sich auf unterschiedliche Lernphasen und sind somit nicht direkt vergleichbar: Bei der hier durchgeführten Studie begann der Hauptteil der Intervention nämlich erst nach einer Anzahl von Übungsversuchen, nach der die anderen Untersuchungen bereits beendet waren. Die in der Literatur beschriebenen Lernvorteile durch positive Feedback-Valenzen sind also anscheinend auf sehr frühe Lernphasen

beschränkt, während negative Feedback-Valenz bzw. normativ negatives Feedback auch im fortschreitenden Lernverlauf zu weiteren Leistungssteigerungen zu führen scheint. Dabei dürfen die in der NEG14 gefundenen Effekte jedoch nicht überinterpretiert werden. Zwar zeigt sich zum Prä-Test kein signifikanter Unterschied bezüglich des *AE* in den Gruppen POS14, POS100, NEG14 und KGp (siehe Kapitel 3.3.3), dennoch sind die Versuchspersonen der NEG14 die einzigen, die ihre Präzisionsleistung in der Aneignungsphase nicht verbesserten, zum Prä-Test den größten *AE* aufwiesen und somit das stärkste Verbesserungspotential hatten. Im Gegensatz dazu steht die KGa, die ihre Leistung in der Aneignungsphase so stark verbesserte, dass sie sich bereits zum Prä-Test signifikant von den anderen Gruppen unterschied. Aus diesem Grund sind Vergleiche bezüglich des *AE* mit dieser Gruppe nur sehr vorsichtig zu interpretieren. Die KGa weicht zum Prä-Test nur durchschnittlich  $5,32^\circ$  von den anzusteuernenden Umkehrpunkten ab und zeigt damit bereits vor der Intervention einen *AE*, der geringer ist als in der POS14 und POS100 nach der Intervention. Möglicherweise war somit, unabhängig von der Interventionsform, eine weitere Steigerung der Präzisionsleistung in dieser Gruppe nicht mehr möglich. Für anschließende Untersuchungen mit der hier verwendeten Lernaufgabe sollte daher angedacht werden, die Aneignungsphase von 40 Versuchen ggf. zu reduzieren, da in dieser Phase anscheinend ein bedeutender Anteil des Lernprozesses stattfindet. Um den Einfluss der Interventionen auf die Leistungssteigerung besser beobachten zu können wäre es interessant diese früher einsetzen zu lassen. Dennoch muss eine Aneignungsphase erhalten bleiben, um die Ausbildung einer Bewegungsrepräsentation vor dem Prä-Test zu ermöglichen und somit eine valide Erhebung der Doppeltätigkeitskosten sicherzustellen.

Bezogen auf die erste allgemeine Forschungshypothese, die sich der Frage widmet, welchen Einfluss die Feedback-Valenz auf die Leistungssteigerung hat, kann also festgehalten werden, dass sich ein normativ negatives Feedback, welches in der Häufigkeit reduziert und nach einem Fading-Muster präsentiert wird, förderlich auf die Steigerung der Präzisionsleistung in fortgeschrittenen Lernphasen auswirkt. Dabei soll die Eingrenzung der Lernphase nur eine grobe Richtung vorgeben und darauf hinweisen, dass der Einfluss der Feedback-

Valenz in Abhängigkeit zum Übungsumfang und der Lernphase stehen kann. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung reichen jedoch nicht aus, um diesbezüglich generalisierbare Aussagen treffen zu können. In weiteren Studien sollte demnach der wechselseitige Einfluss des Übungsumfanges, der Lernphasen und der Feedback-Valenz bzw. Normativität auf das motorische Lernen untersucht werden. Die vorliegende Untersuchung liefert diesbezüglich Hinweise auf lernphasen- und übungsumfangbedingte Unterschiede.

Im Folgenden sollen nun die erhobenen Befunde in Bezug zur zweiten allgemeinen Forschungshypothese, die einen Vorteil positiver Feedback-Valenzen für die Automatisierung annahm, diskutiert werden:

Eine Automatisierung ließ sich dabei nur in der POS14 beobachten (siehe Kapitel 3.5). Diese Gruppe reduzierte ihre Doppeltätigkeitskosten vom Prä- zum Retentions-Test signifikant. In allen anderen Gruppen ist in Folge der Interventionsphase keine Doppeltätigkeitskostenreduktion feststellbar. Bei diesem Befund ist eine Parallele zu den Ergebnissen bezüglich des *AE* zu erkennen: Entgegen der a priori aufgestellten Annahmen begünstigte die positive Feedback-Valenz mit einer 100%igen Feedbackhäufigkeit weder die Leistungssteigerung, noch die Automatisierung. Zwar war vor dem Beginn der Experimente bereits bekannt, dass die Feedbackhäufigkeit eine zentrale Bedeutung für Automatisierungsprozesse zu haben scheint (siehe bspw. Krause, Agethen & Zobe, 2017). Dennoch war der Effekt der positiven Valenz auf die Automatisierung, sowie die wechselseitige Beeinflussung dieser beiden Faktoren noch unklar. Da sich diese Untersuchung vorrangig dem Einfluss der Feedback-Valenz widmet, sollte mit der POS100 als erster Versuchsgruppe der Effekt der positiven Valenz durch die 100%ige Feedbackgabe maximiert werden. Im Experiment 1a (siehe Kapitel 3.4) blieb eine Automatisierung jedoch aus. Der Manipulationscheck deckte auf, dass die Versuchspersonen der POS100, genauso wie die der POS14, ihre Leistung in Folge des normativ positiven Feedbacks als überdurchschnittlich wahrnahmen. Die Valenz-Manipulation ist also in beiden Gruppen gelungen. Der zentrale Unterschied beider Gruppen liegt in der Feedback-

häufigkeit. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die hohe Feedbackfrequenz in der POS100 die lernförderlichen Effekte der positiven Feedback-Valenz überschattet haben. Die Probanden schätzten ihre Leistung zwar als überdurchschnittlich ein, da sie jedoch nach jedem Versuch eine Rückmeldung erhielten, scheint das Feedback weniger als Bestätigung der aktuellen Leistung, sondern eher als Fehlersignal aufgefasst worden zu sein, welches Anlass für Bewegungskorrekturen gegeben und bewusste Kontrollprozesse initiiert haben könnte, die wiederum eine Automatisierung behinderten. Diese Annahme wird dadurch bestätigt, dass es in der POS14 zu einer signifikanten Reduktion der Doppeltätigkeitskosten kommt (siehe Kapitel 3.5), welche aufgrund der validen Testmethodik (siehe Kapitel 3.3.6) als Automatisierung interpretiert werden kann. Die Probanden dieser Versuchsgruppe schätzten ihre Leistung in Folge der Feedback-Manipulation als überdurchschnittlich ein, erhielten jedoch, im Gegensatz zur POS100, nur zu 14% der Versuche Feedback nach einem Fading-Muster. Diese Kombination aus reduzierter Feedbackhäufigkeit und positiver Normativität scheint als Bestätigung der eigenen Leistung wahrgenommen worden zu sein, die zu einer Reproduktion erfolgreicher Bewegungsmuster und einem Verhindern von Bewegungskorrekturen geführt zu haben scheint, welche wiederum Automatisierungsprozesse begünstigen. Betrachtet man diese Erklärung im Zusammenhang mit der zuvor dargestellten Interpretation der Ergebnisse bezüglich des *AE*, scheinen die gleichen Mechanismen eine Automatisierung zu begünstigen, die eine weitere Leistungssteigerung offenbar verhindern. Dieser Umkehreffekt zeigt sich auch im Falle der negativen Normativität. Die NEG14, welche als einzige Gruppe eine Leistungssteigerung aufwies, konnte die erlernte Fertigkeit nicht automatisieren (siehe Kapitel 3.6). Die gleichen Gründe, welche als Erklärung für die Steigerung der Präzisionsleistung herangezogen werden, scheinen andersherum eine Automatisierung zu verhindern. Die negative Normativität veranlasst die Versuchspersonen die wahrgenommenen Bewegungsfehler bewusst zu korrigieren, indem explizite Verarbeitungsprozesse angestoßen und verstärkt Anstrengungen und Kapazitäten investiert werden. Diese Prozesse scheinen zwar eine Leistungssteigerung zu bewirken, behindern aber die Automatisierung.

Sehr aufschlussreich ist die Betrachtung der vorliegenden Befunde im Kontext des in Kapitel 2.2.2.8 vorgestellten Modells von Chein und Schneider (2012). Demnach werden im Repräsentationssystem, dem einzigen Lernsystem, welches zur automatischen Verarbeitung fähig ist, nur regelmäßig wiederkehrende Muster abgespeichert. Da durch die positive Feedback-Valenz immer wieder vermittelt wurde, dass die aktuelle Bewegungsausführung korrekt sei, könnten diese vermehrt Zugang zum Repräsentationssystem erhalten und somit eine rasche Automatisierung begünstigt haben. Die Rückmeldung von Bewegungsfehlern und die daraus resultierenden Korrekturen hingegen scheinen kein stabiles Muster darzustellen, so dass dementsprechend keine Speicherung im Repräsentationssystem erfolgte.

Dennoch stellt sich die Frage, ob es sich bei dem gefundenen Effekt um einen automatisierungsbegünstigenden Einfluss in Folge der positiven Feedback-Valenz oder einen automatisierungshemmenden Einfluss durch die negative Feedback-Valenz handelt, der in der POS14 einfach nur ausblieb. Zu diesem Zweck wurde die aktive Kontrollgruppe hinzugezogen. In dieser Gruppe, die ihr Feedback nach dem gleichen Schema erhielt wie die POS14 und die NEG14, jedoch ohne die Einblendung des zusätzlichen Normwertes, konnte keine Automatisierung festgestellt werden (siehe Kapitel 3.7). Demnach ist die Automatisierung in der POS14 durch die positive Feedback-Valenz begründet und nicht durch die reine Reduktion der Feedbackhäufigkeit oder das Ausbleiben einer negativen Normativität. Eine positive Feedback-Valenz scheint also die Automatisierung zu begünstigen, wenn das Feedback mit einer reduzierten Häufigkeit präsentiert wird.

Allerdings ist es überraschend, dass sich in der KGa keine Automatisierung zeigte. Vorausgegangene Experimente mit der gleichen Lernaufgabe und einem ähnlichen Untersuchungsdesign konnten eine Automatisierung durch einen Feedback-Plan mit ebenfalls ca. 14% Feedbackhäufigkeit und einem Fading-Muster erreichen. Im Vergleich zu der vorliegenden Untersuchung unterschieden sich die Experimente dabei lediglich geringfügig im Übungsumfang und der Skalierung der Feedbackpräsentation. Da der Übungsumfang in der vorliegenden Untersuchung um „nur“ 40 auf 720 Versuche verringert wurde,

wird dieser Einfluss als gering eingeschätzt. Der Grund ist eher in der größeren Skalierung zu vermuten, welche zu einer größeren Darstellung der Fehlerbalken und somit einer verstärkten Wahrnehmung von Fehlersignalen geführt haben könnte, die wiederum automatisierungshemmend wirken müssten. In zukünftigen Experimenten sollte demnach der Einfluss der Größe der Fehlerdarstellung untersucht werden.

Wie auch im Kontext der ersten allgemeinen Forschungshypothese, soll an dieser Stelle die Frage gestellt werden, ob die gefundenen Effekte auf die Operationalisierungsform des normativen Feedbacks beschränkt sind, oder eher generalisierbar auf die Feedback-Valenz zurückzuführen sind. Für den Fall der Automatisierung kann dabei eher von einem allgemeinen Valenz-Effekt ausgegangen werden. Die besondere Eigenschaft des normativen Feedbacks, welche als Grund für den lernförderlichen Effekt des normativ negativen Feedbacks angeführt wird, ist die Vorgabe eines Leistungsziels. Wie bereits erläutert, scheint in den Gruppen mit normativ positivem Feedback der normative Bezugswert als Zielvorgabe so deutlich bzw. häufig übertroffen zu werden, dass er eher zur Bewertung der eigenen Leistung als Erfolg dient und somit als pauschale Bestätigung der eigenen Leistung wirkt. Die besondere Funktion des normativen Feedbacks, eine konkrete Zielvorgabe zu bieten, scheint in den Gruppen mit positiver Feedback-Valenz also keine Wirkung zu haben. Für diesen Fall kann also eher von einem allgemeinen Valenz-Effekt ausgegangen werden, der durch das normative Feedback als eine mögliche Operationalisierungsform induziert wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das normative Feedback anscheinend einen dissoziativen Effekt auf die Automatisierung und Präzisionssteigerung hat. Negativ normiertes Feedback, welches nach einem Fading-Muster mit durchschnittlich 14% Feedbackhäufigkeit präsentiert wurde, scheint die Leistungssteigerung zu begünstigen. Im Gegensatz dazu scheint normativ positives Feedback, welches nach dem gleichen Feedbackplan eingesetzt wird, Automatisierungsprozesse zu fördern. Das normative Feedback hat also einen

unterschiedlichen Einfluss auf die beiden untersuchten Teilaspekte des motorischen Lernens.

Dieses Ergebnis macht deutlich, dass motorisches Lernen in seiner Gesamtheit nicht ausreichend erfasst werden kann, wenn die Leistungssteigerung, wie in den meisten Untersuchungen der Motorikforschung üblich, als einziges Kriterium motorischen Lernens herangezogen wird. Unter diesen Umständen wäre es nämlich zu der Schlussfolgerung gekommen, dass die Teilnehmer der POS14 nicht gelernt hätten. Infolgedessen wäre der für die weitere Grundlagenforschung sowie für die Sportpraxis bedeutende Befund des dissoziativen Effektes normativen Feedbacks unentdeckt geblieben.

Für die Praxis und die weitere Forschung stellt sich in Folge der hier vorliegenden Untersuchung die Frage, durch welche Übungsbedingungen es möglich ist, gleichsam eine Leistungssteigerung und Automatisierung zu erreichen. In der Sportpraxis, sowie im Alltag und der Rehabilitation sind sowohl die Leistungssteigerung, als auch die Automatisierung motorischer Fertigkeiten bedeutend. Daher sollte zukünftig empirisch überprüft werden, ob sich beide Ziele miteinander kombinieren lassen. Dabei kann nur vermutet werden, ob es sinnvoll wäre, die beiden Feedbackvarianten nacheinander zu schalten, oder miteinander zu kombinieren. Zunächst eine Leistungssteigerung durch normativ negatives Feedback zu erzielen und anschließend eine Automatisierung der erlernten Fertigkeit durch positive Valenzen zu fördern, erscheint logisch. Diese Annahme steht jedoch im Widerspruch zu den Annahmen des *errorless learning*, die ein anfänglich fehlerreduziertes Lernen als essenziell für Lern- und Automatisierungsprozesse ansehen (bspw. Masters & Maxwell, 2004; Maxwell, Masters, Kerr & Weedon, 2001). In einer vorausgegangenen Untersuchung von Agethen (2015) wurde ein Bandbreitenfeedback eingesetzt, welches eine Automatisierung der Armhebelbewegung bewirkte, jedoch keine Leistungssteigerung. Möglicherweise wäre ein Bandbreiten-Fading, bei dem sich die Bandbreite im Lernverlauf verringert und somit immer herausforderndere Ziele an die Probanden stellt, eine interessante Forschungsperspektive.

Darüber hinaus gilt es die in dieser Untersuchung erhobenen Befunde zu replizieren, da einige methodische Schwierigkeiten vorliegen, die die Interpretation der Ergebnisse einschränken. Dazu gehört unter anderem die nicht geglückte Parallelisierung in der KGa, oder aber der hohe *AE* zum Prä-Test in der NEG14. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind daher nicht generalisierbar. Sie müssten zunächst mehrfach repliziert und auch mit anderen Lernaufgaben und in Felduntersuchungen nachgewiesen werden.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Stichprobe, welche in diesem Fall aus sporttreibenden Erwachsenen bestand, besonders auf Valenzen oder den Vergleich der eigenen Leistung mit einem Referenzwert reagierte. Möglicherweise sind Sportler besonders sensibel für das normative Feedback, da sie es gewohnt sind, sich ständig mit Anderen zu vergleichen. Besonders das normativ negative Feedback könnte in diesem Fall einen starken Einfluss haben, wenn sich die Versuchspersonen beim Erlernen von Bewegungen generell als überdurchschnittlich einschätzen. Möglicherweise könnte dies einen besonderen Ehrgeiz geweckt haben, der sich in anderen Populationen gar nicht erst entwickeln würde.

## Literaturverzeichnis

- Abernethy, B. (1988). Dual-Task Methodology and motor skill research: Some applications and the methodological constraints. *Journal of Human Movement Studies*, 14 (101-132).
- Abernethy, B. (2001). Attention. In R.N. Singer, H.A. Hausenblas & C.M. Janelle (Hrsg.), *Handbook of sport psychology* (S. 53–85). New York: Wiley.
- Abernethy, B., Maxwell, J.P., Masters, R.S., van der Kamp, J. & Jackson, R.C. (2007). Attentional Processes in Skill Learning and Expert Performance. In G. Tenenbaum & R.C. Eklund (Hrsg.), *Handbook of Sport Psychology* (S. 245–263). Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Ltd.
- Adams, F.M. & Osgood, C.E. (1973). A Cross-Cultural Study of the Affective Meanings of Color. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 4 (2), 135–156.
- Agethen, M. (2015). *Zum Einfluss von Bandbreiten-Feedback auf Automatisierungsprozesse beim motorischen Lernen*. Taunusstein: Driesen.
- Agethen, M. & Jasarovski, N. (2011). *Effekte von Doppeltätigkeitsübungen auf die Automatisierung einer Armbewegungssequenz. Eine methodische Betrachtung der Konzeption von Doppeltätigkeitstests zur Überprüfung von Automatisierungsprozessen*. Paderborn: Unveröffentlichte Masterarbeit.
- Agethen, M. & Krause, D. (2012). Reduced dual task Interference in multiple repeated dual-task tests: Automatization or task integration? From Theory to Implementation. In, *Current Research in Motor Control IV. From Theory to Implementation* (8-14).
- Agethen, M. & Krause, D. (2016). Effects of bandwidth feedback on the automatization of an arm movement sequence. *Human movement science*, 45, 71–83.
- Ahmadi, P., Sabzi, A.H., Heirani, A. & Hasanvand, B. (2011). The effect of feedback after good, poor, good-poor trials, and self-control conditions in an acquisition and learning of force production task. *Physical Education and Sport*, 9 (1), 35–43.
- Allport, D.A., Antonis, B. & Reynolds, P. (1972). On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24 (2), 225–235.
- Andrieux, M., Boutin, A. & Thon, B. (2016). Self-Control of Task Difficulty During Early Practice Promotes Motor Skill Learning. *Journal of Motor Behavior*, 48 (1), 57–65.
- Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: a proposed system and its control processes. In K.W. Spence & J.T. Spence (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation. Advances in Research and Theory* (Psychology of Learning and Motivation, 2, S. 89–195). New York: Academic Press.
- Ávila, L.T., Chiviawosky, S., Wulf, G. & Lewthwaite, R. (2012). Positive social-comparative feedback enhances motor learning in children. *Psychology of Sport and Exercise*, 13 (6), 849–853.
- Badami, R., Kohestani, S. & Taghian, F. (2011). Feedback on More Accurate Trials Enhances Learning of Sport Skills. *World Applied Sciences Journal*, 13 (3), 537–540.

- Badami, R., VaezMousavi, M., Wulf, G. & Namazizadeh, M. (2011). Feedback After Good Versus Poor Trials Affects Intrinsic Motivation. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 82 (2), 360–364.
- Badami, R., VaezMousavi, M., Wulf, G. & Namazizadeh, M. (2012). Feedback About More Accurate Versus Less Accurate Trials: Differential Effects on Self-Confidence and Activation. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83 (2), 196–203.
- Baddeley, A. & Wilson, B.A. (1994). When implicit learning fails: amnesia and the problem of error elimination. *Neuropsychologia*, 32 (1), 53–68.
- Baddeley, A.D. (1992). Working Memory. *Science*, 255, 556–559.
- Baddeley, A.D. (1996). Exploring the Central Executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A (1), 5–28.
- Baddeley, A.D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4 (11), 417–423.
- Baddeley, A.D. (2002). Is Working Memory Still Working? *European Psychologist*, 7 (2), 85–97.
- Baddeley, A.D. (2004). The Psychology of Memory. In A.D. Baddeley, M.D. Kopelman & B.A. Wilson (Hrsg.), *The Essential Handbook of Memory Disorders for Clinicians* (S. 1–13). Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Baddeley, A.D. (2012). Working memory. Theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, 63, 1–29.
- Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1974). Working Memory. *The psychology of learning and motivation. Advances in research and theory*, 8, 47–89.
- Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1994). Developments in the Concept of Working Memory. *Neuropsychology*, 8 (4), 485–493.
- Baddeley, A.D. & Logie, R.H. (1999). Working Memory. The Multiple-Component Model. In A. Miyake & P. Shah (Hrsg.), *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bayer, H.M. & Glimcher, P.W. (2005). Midbrain Dopamine Neurons Encode a Quantitative Reward Prediction Error Signal. *Neuron*, 47 (1), 129–141.
- Beck, F., Blischke, K. & Abler, B. (2012). Dopaminerge Modulation striataler Plastizität. *Sportwissenschaft*, 42 (4), 271–279.
- Bender, R., St. Lange & Ziegler, A. (2002). Multiples Testen. *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 127, T4-T7.
- Bischoff-Grethe, A., Hazeltine, E., Bergren, L., Ivry, R. & Grafton, S. (2009). The influence of feedback valence in associative learning. *NeuroImage*, 44 (1), 243–251.
- Blischke, K. (2000). Two procedures, one mechanism? Recent findings on the automation of voluntary movements. *Journal of Human Kinetics*, 4, 3–16.
- Blischke, K. & Reiter, C. (2002). Bewegungsautomatisierung durch Doppeltätigkeits-Üben. *Spectrum*, 14 (1), 8–29.
- Blischke, K., Zehren, B., Utter, T. & Brückner, S. (2011). Doppeltätigkeitsübung zeitstrukturierter Fingerbewegungsfolgen. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 18 (1), 18–30.

- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (Springer-Lehrbuch) (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bühner, M. & Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson Education.
- Bund, A. & Wiemeyer, J. (2005). Selbstkontrolliertes Üben von Bewegungsfertigkeiten: Aktueller Forschungsstand und ein antagonistisches Erklärungsmodell. *Spectrum*, 17 (2), 8–25.
- Butler, M.S. & Fischman, M.G. (1996). Effects of Bandwidth Feedback on Delayed Retention of a Movement Timing Task. *Perceptual and Motor Skills*, 82, 527–530.
- Büsch, D., Hagemann, N. & Bender, N. (2010). The dimensionality of the Edinburgh Handedness Inventory: An analysis with models of the item response theory. *Laterality*, 15, 610–628.
- Carter, M.J. & Patterson, J.T. (2012). Self-controlled knowledge of results: Age-related differences in motor learning, strategies, and error detection. *Human Movement Science*, 31 (6), 1459–1472.
- Chein, J.M. & Schneider, W. (2012). The Brain's Learning and Control Architecture. *Current directions in psychological science*, 21 (2), 78–84.
- 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.
- 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 (2), 40–47.
- Chiviawosky, S., Wulf, G., Medeiros, F.L. de, Kaefer, A. & Tani, G. (2008). Learning Benefits of Self-Controlled Knowledge of Results in 10-Year-Old Children. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 79 (3), 405–410.
- Chiviawosky, S., Wulf, G., Wally, R. & Borges, T. (2009). Knowledge of results after good trials enhances learning in older adults. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 80, 663–668.
- Cohen, J.D., McClelland, J.L. & Dunbar, K. (1990). On the Control of Automatic Processes: A Parallel Distributed Processing Account of the Stroop Effect. *Psychological Review*, 97 (3), 332–361.
- Colombo, M. (2014). Deep and beautiful. The reward prediction error hypothesis of dopamine. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 45, 57–67.
- Curran, T. & Keele, S.W. (1993). Attentional and Nonattentional Forms of Sequence Learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19 (1), 189–202.
- Debaere, F., Wenderoth, N., Sunaert, S., van Hecke, P. & Swinnen, S. (2004). Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task. *Neuropsychologia*, 42 (7), 855–867.
- Di Luft, C.B. (2014). Learning from feedback: the neural mechanisms of feedback processing facilitating better performance. *Behavioural brain research*, 261, 356–368.

- Doya, K. (1999). What are the computations of the cerebellum, the basal ganglia and the cerebral cortex? *Neural Networks* (12), 961–974.
- Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., Lehéricy, S. & Benali, H. (2009). Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behavioural Brain Research*, 199 (1), 61–75.
- Doyon, J., Penhune, V. & Ungerleider, L.G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 14, 252–262.
- Doyon, J. & Ungerleider, L.G. (2002). Functional anatomy of motor skill learning. In L.R. Squire & D.L. Schacter (Hrsg.), *Neuropsychology of Memory* (S. 225–238). New York: Guilford Press.
- Eder, A.B. & Brosch, T. (2017). Emotion. In J. Müsseler & M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (S. 185–222). Berlin Heidelberg: Springer.
- Glimcher, P.W. (2011). Colloquium Paper: Understanding dopamine and reinforcement learning: The dopamine reward prediction error hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (3), 15647–15654.
- Gopher, D. & Sanders, A.F. (1984). S-Oh-R: Oh Stages! Oh Resources! In W. Prinz & A.F. Sanders (Hrsg.), *Cognition and Motor Processes* (S. 231–253). Berlin Heidelberg: Springer.
- Grafton, S.T., Hazeltine, E. & Ivry, R.B. (1995). Functional Mapping of Sequence Learning in Normal Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7 (4), 497–510.
- Grand, K.F., Bruzi, A.T., Dyke, F.B., Godwin, M.M., Leiker, A.M., Thompson, A.G., Buchanan, T.L. & Miller, M.W. (2015). Why self-controlled feedback enhances motor learning: Answers from electroencephalography and indices of motivation. *Human movement science*, 43, 23–32.
- Graybiel, A.M. (1995). Building action repertoires: memory and learning functions of the basal ganglia. *Current Opinion in Neurobiology* (5), 733–741.
- Hajcak, G., Holroyd, C.B., Moser, J.S. & Simons, R.F. (2005). Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes. *Psychophysiology*, 42 (2), 161–170.
- Hajcak, G., McDonald, N. & Simons, R.F. (2003). To err is autonomic: Error-related brain potentials, ANS activity, and post-error compensatory behavior. *Psychophysiology*, 40 (6), 895–903.
- Hazeltine, E., Grafton, S.T. & Ivry, R. (1997). Attention and stimulus characteristics determine the locus of motor-sequence encoding. A PET study. *Brain*, 120, 123–140.
- Heckhausen, J. & Heckhausen, H. (Hrsg.). (2010). *Motivation und Handeln* (4. Aufl.). Heidelberg: Springer. (2010).
- Hikosaka, O., Nakahara, H., Rand, M.K., Sakai Katsuyuki, Lu, X., Nakamura, K., Miyachi, S. & Doya, K. (1999). Parallel neural networks for learning sequential procedures. *Trends in Neuroscience*, 22 (10), 464–471.
- Hikosaka, O., Nakamura, K., Katsuyuki, S. & Nakahara, H. (2002). Central mechanisms of motor skill learning. *Current Opinion in Neurobiology*, 12, 217–222.

- Hirst, W., Spelke, E.S., Reaves, C.C., Caharack, G. & Neisser, U. (1980). Dividing attention without alternation or automaticity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109 (1), 98–117.
- Holroyd, C.B. & Coles, M.G. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109 (4), 679–709.
- Hopkins, K. & Weeks, D. (1990). Tests for normality and measures of skewness and kurtosis: Their place in research reporting. *Educational and psychological measurement*, 50, 717-729.
- 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.
- Janelle, C.M., Barba, D.A., Frehlich, S.G., Tennant, L.K. & Cauraugh, J.H. (1997). Maximizing Performance Feedback Effectiveness through Videotape Replay and a Self-Controlled Learning Environment. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 68 (4), 269–279.
- Kahnemann, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Kantak, S.S. & Winstein, C.J. (2012). Learning–performance distinction and memory processes for motor skills: A focused review and perspective. *Behavioural Brain Research*, 228 (1), 219–231.
- Keele, S.W., Mayr, U., Ivry, R., Hazeltine, E. & Heuer, H. (2003). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychological Review*, 110 (2), 316–339.
- Kelley, C.M. & McLaughlin, A.C. (2012). Differences in Feedback use for Correct and Incorrect Responses. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56 (1), 2427–2431.
- Kibele, A. (2001). *Unbewusste Informationsverarbeitung - ein Thema für die Sportwissenschaft?! Theoretische Darstellung und ausgewählte Grundlagenuntersuchungen zu einem bislang in der Sportwissenschaft verkannten Phänomen*. Frankfurt am Main: Europäischer Verlag der Wissenschaften.
- Koehn, J.D., Dickinson, J. & Goodman, D. (2008). Cognitive demands of error processing. *Psychological Reports*, 102, 532–538.
- Könneker, C. (2017). *Lexikon der Psychologie. Valenz*. Zugriff am 10. Januar 2017 unter <http://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/valenz/16097>.
- Kovacs, A.J., Han, D.-W. & Shea, C.H. (2009a). Representation of movement sequences is related to task characteristics. *Acta Psychologica*, 132 (1), 54–61.
- Kovacs, A.J., Mühlbauer, T. & Shea, C.H. (2009b). The coding and effector transfer of movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35 (2), 390–407.
- Krause, D. (2012). *Zur Darstellungsperspektive beim visuomotorischen Imitationslernen*. Köln: Strauß.
- Krause, D., Agethen, M. & Zobe, C. (2017). Error feedback frequency affects automaticity but not accuracy and consistency after extensive motor skill practice. *Manuscript submitted for publication*.

- Krause, D., Zobe, C., Agethen, M., Glage, D. & Potjomkin, N. (2015). Zum Einfluss der Feedback-Häufigkeit und der Feedback-Verteilung auf die motorische Automatisierung. In J. Hermsdörfer, W. Stadler & L. Johannsen (Hrsg.), *The Athlete's Brain: Neuronale Aspekte motorischer Kontrolle im Sport. Abstractband zur 14. Jahrestagung der dvs-Sektion Sportmotorik vom 5.-7. März 2015 in München* (S. 127–128). Hamburg: Feldhaus Verlag.
- Lam, W.K., Maxwell, J.P. & Masters, R.S.W. (2010). Probing the allocation of attention in implicit (motor) learning. *Journal of Sports Sciences*, 28 (14), 1543–1554.
- Laughlin, D.D., Fairbrother, J.T., Wrisberg, C.A., Alami, A., Fisher, L.A. & Huck, S.W. (2015). Self-control behaviors during the learning of a cascade juggling task. *Human movement science*, 41, 9–19.
- Lee, T.D. & Carnahan, H. (1990). Bandwidth knowledge of results and motor learning: More than just a relative frequency effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 42 (4), 777–789.
- Lee, T.D. & Maraj, B.K.V. (1994). Effects of Bandwidth Goals and Bandwidth Knowledge of Results on Motor Learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65 (3), 244–249.
- Lega, B.C., Kahana, M.J., Jaggi, J., Baltuch, G.H. & Zaghoul, K. (2011). Neuronal and oscillatory activity during reward processing in the human ventral striatum. *NeuroReport*, 22 (16), 795–800.
- Lerner, B.S., Ostrow, A.C., Yura, M.T. & Etzel, E.F. (1996). The Effects of Goal-Setting and Imagery Training Programs on the Free-Throw Performance of Female Collegiate Basketball Players. *The Sport Psychologist* (10), 382–397.
- Lewthwaite, R. & Wulf, G. (2010). Social-comparative feedback affects motor skill learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63 (4), 738–749.
- Lindquist, K. & Guadagnoli, M.A. (2008). Neuroanatomical Correlates of Motor Skill Learning: Inferences from Neuroimaging to Behavior. In A.S. Benjamin, J.S. de Belle, B. Etnyre & T.A. Polk (Hrsg.), *Human learning. Biology, brain, and neuroscience* (S. 167–187). Amsterdam: Elsevier/North-Holland.
- Locke, E.A. & Latham, G.P. (1985). The application of goal setting to sports. *Journal of Sport Psychology*, 7, 205–222.
- Logan, G.D. (1985). Skill and Automaticity: Relations, Implications, and Future Directions. *Canadian Journal of Psychology*, 39 (2), 367–386.
- Logan, G.D. (1988). Toward an Instance Theory of Automatization. *Psychological Review*, 95 (4), 492–527.
- Logie, R.H. (1995). *Visuo-spatial Working Memory*. Hove: Lawrence Erlbaum.
- Lohse, K.R., Wadden, K., Boyd, L.A. & Hodges, N.J. (2014). Motor skill acquisition across short and long time scales. A meta-analysis of neuroimaging data. *Neuropsychologia*, 59, 130–141.
- Luft, Caroline Di Bernardi. (2014). Learning from feedback: the neural mechanisms of feedback processing facilitating better performance. *Behavioural Brain Research*, 261, 356–368.

- Lutz, K., Pedroni, A., Nadig, K., Luechinger, R. & Jäncke, L. (2012). The rewarding value of good motor performance in the context of monetary incentives. *Neuropsychologia*, 50 (8), 1739–1747.
- Magill, R.A. (2014). *Motor learning and control. Concepts and Applications* (10. Aufl.). New York: McGraw Hill.
- Manzey, D. (1988). *Determinanten der Aufgabeninterferenz bei Doppeltätigkeiten und ressourcentheoretische Modellvorstellungen in der Kognitiven Psychologie*. Köln: Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt DFVLR.
- Manzey, D. (1993). Doppelaufgabeninterferenz: Neue theoretische und methodische Perspektiven für ein altes Paradigma. In R. Daus & K. Blischke (Hrsg.), *Aufmerksamkeit und Automatisierung in der Sportmotorik. 10. Symposium der dvs-Sektion "Bewegung & Training" vom 16.-18. Januar 1992 in Saarbrücken* (S. 79–96). Sankt Augustin: Academia.
- Marschall, F., Bund, A. & Wiemeyer, J. (2007). Does Frequent Augmented Feedback Really Degrade Learning? A Meta-Analysis. *E-Journal Bewegung und Training*, 1, 74–85.
- Marschall, F. & Daus, R. Feedback. In H. Mechling & J. Munzert (Hrsg.), *Handbuch Bewegungswissenschaft-Bewegungslehre* (S. 281–294). Schorndorf: Hofmann.
- Masters, R. & Maxwell, J. (2008). The theory of reinvestment. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 1 (2), 160–183.
- Masters, R.S. (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., Eves, F.F. & Maxwell, J.P. (2005). Development of a Movement Specific Reinvestment Scale. In T. Morris, P. Terry, S. Gordon, S. Hanrahan, L. Ilevleva, G. Kolt & P. Tremayne (Hrsg.), *Proceedings of the ISSP 11th World Congress of Sport Psychology, Sydney, Australia, 15-19 August*. Sydney.
- Masters, R.S. & Maxwell, J.P. (2004). Implicit motor learning, reinvestment and movement disruption. What you don't know won't hurt you. In A.M. Williams & N.J. Hodges (Hrsg.), *Skill Acquisition in Sport: Research, Theory & Practice* (S. 207–228). London: Routledge.
- Maxwell, J., Masters, R., Kerr, E. & Weedon, E. (2001). The implicit benefit of learning without errors. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 54 (4), 1049–1068.
- Meier, B.P., Robinson, M.D. & Clore, G.L. (2004). Why Good Guys Wear White: Automatic Inferences About Stimulus Valence Based on Brightness. *Psychological Science*, 15 (2), 82–87.
- Miyake, A. & Shah, P. (Hrsg.). (1999). *Models of Working Memory. Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge: Cambridge University Press. (1999).
- Mullen, R., Hardy, L. & Oldham, A. (2007). Implicit and explicit control of motor actions: Revisiting some early evidence. *British Journal of Psychology*, 98, 141–156.
- Müller, H. & Blischke, K. (2009). Motorisches Lernen. In W. Schlicht & B. Strauß (Hrsg.), *Grundlagen der Sportpsychologie* (Enzyklopädie der Psychologie: Themenbereich D, Praxisgebiete: Serie 5, Sportpsychologie, 1). Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.

- Müller, H.J. & Krummenacher, J. (2003). Aufmerksamkeit. In J. Müsseler & W. Prinz (Hrsg.), *Lehrbuch Allgemeine Psychologie* (S. 102–152). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Mummendey, H.D. (1999). *Die Fragebogen-Methode. Grundlagen und Anwendung in Persönlichkeits-, Einstellungs- und Selbstkonzeptforschung* (3. unveränderte Auflage). Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe Verl. für Psychologie.
- Neumann, O. (1984). Automatic Processing: A Review of Recent Findings and a Plea for an Old Theory. In W. Prinz & A.F. Sanders (Hrsg.), *Cognition and Motor Processes* (S. 255–293). Berlin Heidelberg: Springer.
- Neumann, O. (1992). Theorien der Aufmerksamkeit: von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau*, 43, 83–101.
- Neumann, O. (1996). Theories of Attention. In O. Neumann & A.F. Sanders (Hrsg.), *Handbook of perception and action. Volume 3* (S. 389–446). London: Academic Press.
- Nieuwenhuis, S., Slagter, H.A., Geusau, N.J.A. von, Heslenfeld, D.J. & Holroyd, C.B. (2005). Knowing good from bad: differential activation of human cortical areas by positive and negative outcomes. *European Journal of Neuroscience*, 21 (11), 3161–3168.
- Ogden, G., Levine, J.M. & Eisner, E.J. (1979). Measurement of Workload by Secondary Tasks. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 21 (5), 529–548.
- Ohlsson, S. (1996). Learning From Performance Errors. *Psychological Review*, 103 (2), 241–262.
- Olivier, N., Marschall, F. & Büsch, D. (2008). *Grundlagen der Trainingswissenschaft und -lehre* (Grundlagen der Sportwissenschaft, 3). Schorndorf: Hofmann.
- Olivier, N., Rockmann-Rüger, U. & Krause, D. (2013). *Grundlagen der Bewegungswissenschaft und -lehre* (2., überarb. und erw. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Panzer, S., Büsch, D., Shea, C.H., Mühlbauer, T., Naundorf, F. & Krüger, M. (2007). Research Notes. Dominanz visuell-räumlicher Codierung beim Lernen von Bewegungssequenzen. *Zeitschrift für Sportpsychologie*, 14 (3), 123–129.
- Panzer, S., Krueger, M., Muehlbauer, T., Kovacs, A.J. & Shea, C.H. (2009). Inter-manual transfer and practice: Coding of simple motor sequences. *Acta Psychologica*, 131 (2), 99–109.
- Patterson, J.T. & Azizieh, J. (2012). Knowing the good from the bad: Does being aware of KR content matter? *Human Movement Science*, 31 (6), 1449–1458.
- Patterson, J.T. & Carter, M. (2010). Learner regulated knowledge of results during the acquisition of multiple timing goals. *Human Movement Science*, 29 (2), 214–227.
- Poldrack, R.A., Sabb, F.W., Foerde, K., Tom, S.M., Asarnow, R.F., Bookheimer, S.Y. & Knowlton, B.J. (2005). The Neural Correlates of Motor Skill Automaticity. *Journal of Neuroscience*, 25 (22), 5356–5364.
- Poolton, J., Masters, R. & Maxwell, J. (2005). The relationship between initial errorless learning conditions and subsequent performance. *Human Movement Science*, 24 (3), 362–378.
- Posner, M.I. & Boies, S.J. (1971). Components of Attention. *Psychological Review*, 78 (5), 391–408.

- Posner, M.I. & Snyder, C.R.R. (1975). Attention and cognitive control. In R.L. Solso (Hrsg.), *Information Processing and Cognition: The Loyola Symposium* (S. 55–85). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Puttemans, V., Wenderoth, N. & Swinnen, S.P. (2005). Changes in Brain Activation during the Acquisition of a Multifrequency Bimanual Coordination Task: From the Cognitive Stage to Advanced Levels of Automaticity. *Journal of Neuroscience*, 25 (17), 4270–4278.
- Raab, M., Masters, R.S., Maxwell, J.P., Arnold, A., Schlapkohl, N. & Poolton, J.M. (2009). Discovery Learning in Sports: Implicit or Explicit Processes? *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 7 (4).
- Ramirez-Moreno, D.F. & Sejnowski, T.J. (2012). A computational model for the modulation of the prepulse inhibition of the acoustic startle reflex. *Biological cybernetics*, 106 (3), 169–176.
- Repovš, G. & Baddeley, A. (2006). The multi-component model of working memory: Explorations in experimental cognitive psychology. *Neuroscience*, 139 (1), 5–21.
- Reynolds, J.N.J., Hyland, B.I. & Wickens, J.R. (2001). A cellular mechanism of reward-related learning. *Nature*, 413 (6), 67–70.
- Reynolds, J.N.J. & Wickens, J.R. (2002). Dopamin-dependent plasticity of corticostriatal synapses. *Neural Networks* (15), 507–521.
- Ruthruff, E., Selst, M., Johnston, J.C. & Remington, R. (2006). How does practice reduce dual-task interference: Integration, automatization, or just stage-shortening? *Psychological Research Psychologische Forschung*, 70 (2), 125–142.
- Saemi, E., Porter, J.M., Ghotbi-Varzaneh, A., Zarghami, M. & Maleki, F. (2012). Knowledge of results after relatively good trials enhances self-efficacy and motor learning. *Psychology of Sport and Exercise*, 13 (4), 378–382.
- Salmoni, A.W., Schmidt, R.A. & Walter, S.B. (1984). Knowledge of Results and Motor Learning: A Knowledge of Results and Motor Learning: A Review and Critical Reappraisal. *Psychological Bulletin & Review*, 95 (3), 355–386.
- Schallberger, U. (2005). Kurzskaalen zur Erfassung der Positiven Aktivierung, Negativen Aktivierung und Valenz in Experience Sampling Studien (PANAVA-KS). Theoretische und methodische Grundlagen, Konstruktvalidität und psychometrische Eigenschaften bei der Beschreibung intra- und interindividueller Unterschiede.
- Schallberger, U. (2007). PANAVA-KS PANAVA-KS Kurzskaalen zur Erfassung der Positiven Aktivierung, Negativen Aktivierung und Valenz.
- Schmidt, R.A. & Lee, T.D. (2011). *Motor control and learning. A behavioral emphasis* (5. Aufl.). Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Schmidt, R.A. & Wrisberg, C.A. (2004). *Motor Learning and Performance* (3. Aufl.). Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Schmidtke, V. & Heuer, H. (1997). Task integration as a factor in secondary-task effects on sequence learning. *Psychological Research*, 60 (1-2), 53–71.
- Schneider, W. & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84 (1), 1–66.

- Schultz, W. (2002). Getting Formal with Dopamine and Reward. *Neuron*, 36, 241–263.
- Schultz, W., Apicella, P. & Ljungberg, T. (1993). Responses of Monkey Dopamine Neurons to Reward and Conditioned Stimuli during Successive Steps of Learning a Delayed Response Task. *Journal of Neuroscience*, 13 (3), 900–913.
- Schultz, W., Dayan, P. & Montague, P.R. (1997). A Neural Substrate of Prediction and Reward. *Science*, 275 (5306), 1593–1599.
- Seidler, R.D., Kwak, Y., Fling, B.W. & Bernard, J.A. (2013). Neurocognitive mechanisms of error-based motor learning. *Advances in experimental medicine and biology*, 782, 39–60.
- Shea, C.H., Wulf, G., Whitacre, C.A. & Park, J.-H. (2001). Surfing the implicit wave. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 54 (3), 841–862.
- Sherwood, D.E. (1988). Effect of Bandwidth Knowledge of Results on Movement Consistency. *Perceptual and Motor Skills*, 66, 535–542.
- Shiffrin, R.M. & Schneider, W. (1977). Controlled and Automatic Human Information Processing: II. Perceptual Learning, Automatic Attending, and a General Theory. *Psychological Review*, 84 (2), 127–190.
- Spelke, E., Hirst, W. & Neisser, U. (1976). Skills of divided attention. *Cognition*, 4 (3), 215–230.
- Styles, E. (2008). *The psychology of attention* (2. Aufl.). Hove: Psychology Press.
- Swinnen, S.P. (1996). Information Feedback for Motor Skill Learning: A Review. In H.N. Zelaznik (Hrsg.), *Advances in Motor Learning and Control* (S. 37-66). Champaign: Human Kinetics.
- Thorndike, E.L. (1927). The law of effect. *The American Journal of Psychology*, 39, 212–222.
- Thut, G., Schultz, W., Roelcke, U., Nienhusmeier, M., Missimer, J., Maguire, R.P. & Leenders, K. (1997). Activation of the human brain by monetary reward. *NeuroReport*, 8, 1225–1228.
- Tzetzis, G., Kioumourtzoglou, E. & Mavromatis, G. (1997). Goal setting and feedback for the development of instructional strategies. *Perceptual and Motor Skills* (84), 1441-1427.
- Underwood, G. & Everatt, J. (1996). Automatic and Controlled Information Processing: The Role of Attention in the Processing of Novelty. In O. Neumann & A.F. Sanders (Hrsg.), *Handbook of perception and action. Volume 3* (S. 185–227). London: Academic Press.
- Vidoni, E.D. & Boyd, L.A. (2007). Achieving Enlightenment: What Do We Know About the Implicit Learning System and Its Interaction With Explicit Knowledge? *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 31, 145–154.
- Volz, K.G., Schubotz, R.I. & Cramon, D.Y. von. (2005). Frontomedian activation depends on both feedback validity and valence: fMRI evidence for contextual feedback evaluation. *NeuroImage*, 27 (3), 564–571.
- Webster, G.D., Urland, G.R. & Correll, J. (2012). Can Uniform Color Color Aggression? Quasi-Experimental Evidence From Professional Ice Hockey. *Social Psychological and Personality Science*, 3 (3), 274–281.
- Wickens, C.D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50 (3), 449–455.

- Wickens, C.D. (1980). The Structure of Attentional Resources. In E.S. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance VIII* (S. 239–257). Hillsday, NJ: Erlbaum.
- Wickens, C.D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3 (2), 159–177.
- Winstein, C.J. & Schmidt, R.A. (1990). Reduced Feedback of Knowledge of Results Enhances Motor Skill Learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16 (4), 677–691.
- Wirtz, M.A. (2017). *Lexikon der Psychologie*. Valenz. Zugriff am 10. Januar 2017 unter <https://portal.hogrefe.com/dorsch/valenz/>.
- Wu, T., Chan, P. & Hallett, M. (2008). Modifications of the interactions in the motor networks when a movement becomes automatic. *The Journal of Physiology*, 586 (17), 4295–4304.
- Wulf, G. (2007). Self-controlled practice enhances motor learning: implications for physiotherapy. *Physiotherapy*, 93 (2), 96–101.
- Wulf, G., Chiviacowsky, S. & Lewthwaite, R. (2010a). Normative Feedback Effects on Learning a Timing Task. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 81 (4), 425–431.
- Wulf, G., Chiviacowsky, S. & Lewthwaite, R. (2012). Altering mindset can enhance motor learning in older adults. *Psychology and Aging*, 27 (1), 14–21.
- Wulf, G. & Lewthwaite, R. (2016). Optimizing performance through intrinsic motivation and attention for learning: The OPTIMAL theory of motor learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23 (5), 1382–1414.
- Wulf, G., Lewthwaite, R. & Hooyman, A. (2013). Can Ability Conceptualizations Alter the Impact of Social Comparison in Motor Learning? *Journal of Motor Learning and Development*, 1 (1), 20–30.
- Wulf, G. & Mornell, A. (2008). Insights about practice from the perspective of motor learning: a review. *Music Performance Research* (2), 1–25.
- Wulf, G. & Shea, C.H. (2004). Understanding the role of augmented feedback: The good, the bad, and the ugly. In A.M. Williams & N.J. Hodges (Hrsg.), *Skill Acquisition in Sport: Research, Theory & Practice* (S. 121–144). London: Routledge.
- Wulf, G., Shea, C. & Lewthwaite, R. (2010b). Motor skill learning and performance: a review of influential factors. *Medical Education*, 44 (1), 75–84.
- Zaghloul, K.A., Blanco, J.A., Weidemann, C.T., McGill, K., Jaggi, J.L., Baltuch, G.H. & Kahana, M.J. (2009). Human Substantia Nigra Neurons Encode Unexpected Financial Rewards. *Science*, 323 (5920), 1496–1499.
- Zimmer, H.D. (2008). Visual and spatial working memory: From boxes to networks. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 32, 1373–1395.
- Zobe, C. (2013). *Zum Einfluss der Reinvestmentdisposition auf die Automatisierung einer Arm-bewegungssequenz*. Paderborn: Unveröffentlichte Masterarbeit.

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorgelegte Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe. Ferner, dass ich sie nicht schon als Doktorarbeit, Diplomarbeit, Bachelorarbeit oder Masterarbeit an einer anderen Hochschule oder als Zulassungs- bzw. Hausarbeit oder als Teil solcher Arbeiten eingereicht habe.

(Datum)

(Unterschrift)

## Anhang

### I. Teilnehmerinformation Interventionsgruppen

Allgemeine Teilnehmerinformation

1



Department Sport & Gesundheit

Universität Paderborn

Dr. Daniel Krause

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

M.A. Christina Zobe

Telefon: 05251-605303

#### Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung

*Department Sport & Gesundheit*

*Universität Paderborn*

#### **Titel der Studie: Zum Einfluss unterschiedlicher Feedbackbedingungen auf die Automatisierung einer Armbewegungssequenz**

Herzlich willkommen bei unserer Studie "Zum Einfluss unterschiedlicher Feedbackbedingungen auf die Automatisierung einer Armbewegungs-Sequenz"! Wir danken Ihnen für Ihr Interesse an dieser Studie.

Wir untersuchen mit dieser Studie, ob mit unterschiedlich gestaltetem Feedback motorische Automatisierungsprozesse beeinflusst werden können.

#### **Ablauf der Studie**

Das folgende Experiment besteht aus sieben Untersuchungsterminen, die über drei Wochen verteilt sind und jeweils circa 20-45 Minuten dauern.

Ihre Aufgabe ist es, eine Ellenbogen-Extensions-Flexions-Bewegung mit drei Umkehrpunkten zu erlernen, welche an einem Armhebel durchgeführt wird.

Am ersten Untersuchungstermin werden, nachdem Sie die Einwilligungserklärung unterschrieben haben, zunächst organisatorische Dinge geklärt (Terminabsprachen, Pseudonymisierung der Kontaktdaten, etc.). Anschließend füllen Sie einen Eingangs-Fragebogen aus und lernen in der darauffolgenden Aneignungsphase den Versuchsaufbau, die experimentellen Aufgaben und den Testablauf kennen. Dazu werden Sie mit Hilfe einer PowerPoint-Präsentation und ergänzenden verbale Instruktionen angeleitet. Sie lernen zunächst die zu übende Sollbewegung kennen und werden anschließend 5 eigene Übungsversuche ausführen. Nach jeder Bewegungsausführung erhalten Sie Feedback zur Bewegungsausführung. Anschließend werden Ihnen die kognitive Zusatzaufgabe und der Ablauf des in dieser Untersuchung verwendeten Tests vorgestellt und in einem Probedurchlauf ausprobiert. Abschließend werden 20-40 Übungsversuche der Bewegungsaufgabe durchgeführt.

Am zweiten Untersuchungstermin wird der Eingangs-Test durchgeführt, sowie ein erster Übungsblock von 120 Wiederholungen der Bewegungsaufgabe. Nach jeweils 40 Wiederholungen der Armbewegungs-Sequenz findet eine kurze Pause statt.

An den weiteren vier Untersuchungsterminen (Termin 3 bis 6) werden jeweils 150 Wiederholungen der Bewegungsaufgabe durchgeführt. Während der Übungsblöcke findet nach jeweils 40 Wiederholungen der Armbewegungs-Sequenz eine kurze Pause statt.

Am letzten Untersuchungstermin (Termin 7) wird der Abschluss-Test durchgeführt, sowie ein postexperimenteller Fragebogen ausgefüllt.

Zwei Wochen nach dem letzten Untersuchungstermin wird Ihnen der letzte auszufüllende Fragebogen per Mail zugeschickt.

**Unannehmlichkeiten**

Während der Test- und Übungszeiträume sind Gespräche mit dem Untersuchungsleiter zu unterlassen.

Die Teilnehmer werden dazu angehalten keine Informationen über das Experiment an Dritte weiterzugeben.

**Risiken**

Durch die Übungs- und Testsituationen sind keine Risiken zu erwarten.

**Freiwilligkeit und Anonymität**

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihre Einwilligung zur Teilnahme an dieser Studie widerrufen, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

Die im Rahmen dieser Studie erhobenen Daten und persönlichen Mitteilungen werden vertraulich behandelt. So unterliegen diejenigen Mitarbeiter, die durch direkten Kontakt mit Ihnen über personenbezogene Daten verfügen, der Schweigepflicht. Des Weiteren wird die Veröffentlichung der Ergebnisse der Studie in anonymisierter Form erfolgen, d. h. ohne dass Ihre Daten Ihrer Person zugeordnet werden können.

**Datenschutz**

Die Erhebung der Daten erfolgt pseudonymisiert, d. h. in namentlich nicht gekennzeichnete Form. Ihre Antworten und Ergebnisse werden unter einer Nummer gespeichert. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die Ihren Namen mit der Nummer verbindet, was für die Auswertung der Daten erforderlich sein könnte. Die Kodierliste ist nur den Projektmitarbeitern zugänglich; sie wird in einem abschließbaren Schrank aufbewahrt und nach Abschluss der Datenerhebung vernichtet. Nach Vernichtung der Kodierliste liegen die Daten nur noch als Nummer in vollständig anonymisierter Form vor; ein Rückschluss auf den einzelnen Probanden ist dann nicht mehr möglich. Die anonymisierten Daten werden mindestens 10 Jahre gespeichert. Sie können, wann immer Sie möchten, die Löschung aller von Ihnen erhobenen Daten verlangen. Wenn die Kodierliste aber erst einmal gelöscht ist, können wir Ihren Datensatz nicht mehr identifizieren. Deshalb können wir Ihrem Verlangen nach Löschung Ihrer Daten nur solange nachkommen, wie die Kodierliste existiert.

**Vergütung**

Die Teilnahme an der Untersuchung ist freiwillig und unentgeltlich.

Sollten Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich damit bitte an den Versuchsleiter.

## II. Teilnehmerinformation passive Kontrollgruppe

Allgemeine Teilnehmerinformation

1



Department Sport & Gesundheit

Universität Paderborn

Dr. Daniel Krause

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

M.A. Christina Zobe

Telefon: 05251-605303

### Allgemeine Teilnehmerinformation über die Untersuchung

*Department Sport & Gesundheit*

*Universität Paderborn*

#### **Titel der Studie: Zum Einfluss unterschiedlicher Feedbackbedingungen auf die Automatisierung einer Armbewegungssequenz**

Herzlich willkommen bei unserer Studie "Zum Einfluss unterschiedlicher Feedbackbedingungen auf die Automatisierung einer Armbewegungs-Sequenz"! Wir danken Ihnen für Ihr Interesse an dieser Studie.

Wir untersuchen mit dieser Studie, ob mit unterschiedlich gestaltetem Feedback motorische Automatisierungsprozesse beeinflusst werden können.

#### **Ablauf der Studie**

Das folgende Experiment besteht aus drei Untersuchungsterminen, die über drei Wochen verteilt sind und jeweils circa 20-45 Minuten dauern.

Ihre Aufgabe ist es, eine Ellenbogen-Extensions-Flexions-Bewegung mit drei Umkehrpunkten zu erlernen, welche an einem Armhebel durchgeführt wird.

Am ersten Untersuchungstermin werden, nachdem Sie die Einwilligungserklärung unterschrieben haben, zunächst organisatorische Dinge geklärt (Terminabsprachen, Pseudonymisierung der Kontaktdaten, etc.). Anschließend füllen Sie einen Eingangs-Fragebogen aus und lernen in der darauffolgenden Aneignungsphase den Versuchsaufbau, die experimentellen Aufgaben und den Testablauf kennen. Dazu werden Sie mit Hilfe einer PowerPoint-Präsentation und ergänzenden verbale Instruktionen angeleitet. Sie lernen zunächst die zu übende Sollbewegung kennen und werden anschließend 5 eigene Übungsversuche ausführen. Nach jeder Bewegungsausführung erhalten Sie Feedback zur Bewegungsausführung. Anschließend werden Ihnen die kognitive Zusatzaufgabe und der Ablauf des in dieser Untersuchung verwendeten Tests vorgestellt und in einem Probedurchlauf ausprobiert. Abschließend werden 20-40 Übungsversuche der Bewegungsaufgabe durchgeführt.

Am zweiten Untersuchungstermin wird der Eingangs-Test durchgeführt.

Am letzten Untersuchungstermin (Termin 3) wird der Abschluss-Test durchgeführt, sowie ein postexperimenteller Fragebogen ausgefüllt.

Zwei Wochen nach dem letzten Untersuchungstermin wird Ihnen der letzte auszufüllende Fragebogen per Mail zugeschickt.

**Unannehmlichkeiten**

Während der Test- und Übungszeiträume sind Gespräche mit dem Untersuchungsleiter zu unterlassen.

Die Teilnehmer werden dazu angehalten keine Informationen über das Experiment an Dritte weiterzugeben.

**Risiken**

Durch die Übungs- und Testsituationen sind keine Risiken zu erwarten.

**Freiwilligkeit und Anonymität**

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihre Einwilligung zur Teilnahme an dieser Studie widerrufen, ohne dass Ihnen daraus Nachteile entstehen.

Die im Rahmen dieser Studie erhobenen Daten und persönlichen Mitteilungen werden vertraulich behandelt. So unterliegen diejenigen Mitarbeiter, die durch direkten Kontakt mit Ihnen über personenbezogene Daten verfügen, der Schweigepflicht. Des Weiteren wird die Veröffentlichung der Ergebnisse der Studie in anonymisierter Form erfolgen, d. h. ohne dass Ihre Daten Ihrer Person zugeordnet werden können.

**Datenschutz**

Die Erhebung der Daten erfolgt pseudonymisiert, d. h. in namentlich nicht gekennzeichnete Form. Ihre Antworten und Ergebnisse werden unter einer Nummer gespeichert. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die Ihren Namen mit der Nummer verbindet, was für die Auswertung der Daten erforderlich sein könnte. Die Kodierliste ist nur den Projektmitarbeitern zugänglich; sie wird in einem abschließbaren Schrank aufbewahrt und nach Abschluss der Datenerhebung vernichtet. Nach Vernichtung der Kodierliste liegen die Daten nur noch als Nummer in vollständig anonymisierter Form vor; ein Rückschluss auf den einzelnen Probanden ist dann nicht mehr möglich. Die anonymisierten Daten werden mindestens 10 Jahre gespeichert. Sie können, wann immer Sie möchten, die Löschung aller von Ihnen erhobenen Daten verlangen. Wenn die Kodierliste aber erst einmal gelöscht ist, können wir Ihren Datensatz nicht mehr identifizieren. Deshalb können wir Ihrem Verlangen nach Löschung Ihrer Daten nur solange nachkommen, wie die Kodierliste existiert.

**Vergütung**

Die Teilnahme an der Untersuchung ist freiwillig und unentgeltlich.

Sollten Sie noch Fragen haben, wenden Sie sich damit bitte an den Versuchsleiter.

### III. Einwilligungserklärung

Einwilligungserklärung

1



Department Sport &amp; Gesundheit

Universität Paderborn

Dr. Daniel Krause

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

M.A. Christina Zobe

Telefon: 05251-605303

#### Einwilligungserklärung

Department Sport & Gesundheit

Universität Paderborn

#### Zum Einfluss unterschiedlicher Feedbackbedingungen auf die Automatisierung einer Armbewegungssequenz

Ich (Name des Teilnehmers /der Teilnehmerin in Blockschrift)

\_\_\_\_\_

bin schriftlich über die Studie und den Versuchsablauf aufgeklärt worden. Ich habe alle Informationen vollständig gelesen und verstanden. Sofern ich Fragen zu dieser vorgesehenen Studie hatte, wurden sie von Herrn/Frau \_\_\_\_\_ vollständig und zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

*Mit der beschriebenen Handhabung der erhobenen Daten bin ich einverstanden. Die Aufzeichnung und Auswertung der Daten erfolgt pseudonymisiert, d. h. unter Verwendung einer Nummer und ohne Angabe meines Namens. Es existiert eine Kodierliste auf Papier, die meinen Namen mit dieser Nummer verbindet. Diese Kodierliste ist nur dem Versuchsleiter zugänglich und wird nach Abschluss der Datenerhebung oder der Datenauswertung gelöscht. Mir ist bekannt, dass ich mein Einverständnis zur Aufbewahrung bzw. Speicherung dieser Daten widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich bin darüber informiert worden, dass ich jederzeit eine Löschung all meiner Daten verlangen kann. Wenn allerdings die Kodierliste bereits gelöscht ist, kann mein Datensatz nicht mehr identifiziert und also auch nicht mehr gelöscht werden. Meine Daten sind dann anonymisiert. Ich bin einverstanden, dass meine anonymisierten Daten zu Forschungszwecken weiter verwendet werden können und mindestens 10 Jahre gespeichert bleiben.*

Ich hatte genügend Zeit für eine Entscheidung und bin bereit, an der o.g. Studie teilzunehmen. Ich weiß, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig ist und ich die Teilnahme jederzeit ohne Angaben von Gründen beenden kann.

Ich verpflichte mich dazu keine Informationen über dieses Experiment an Dritte weiterzugeben.

Eine Ausfertigung der Teilnehmerinformation über die Untersuchung und eine Ausfertigung der Einwilligungserklärung habe ich erhalten. Die *Teilnehmerinformation* ist Teil dieser Einwilligungserklärung.

Ort, Datum &amp; Unterschrift des Teilnehmers:

Name des Teilnehmers in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ort, Datum &amp; Unterschrift des Versuchsleiters:

Name des Versuchsleiters in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Zusatzvereinbarung für künftige Kontaktaufnahmen im Rahmen dieser Studie**

*Ich gebe mein Einverständnis, dass im Falle einer Fortführung dieser Studie oder von Anschlussstudien meine personenbezogenen Daten für eine erneute Kontaktaufnahme weiter verwendet werden dürfen. Ich bin darüber informiert, dass meine Daten bis zum endgültigen Abschluss der Datenerhebung und/oder Auswertung weiterhin in pseudonymisierter Form (Kodierliste) vorliegen und nur die Studienleitung darauf Zugriff hat. Nach spätestens 10 Jahren werden meine personenbezogenen Daten gelöscht. Bis dahin kann ich jederzeit Auskunft über meine personenbezogenen Daten erhalten und die Löschung meiner Daten verlangen.*

JA     NEIN.

**Rückmeldung von Ergebnissen**

*Ich bin daran interessiert, etwas über die Ergebnisse der Studie zu erfahren, und bitte hierzu um Übersendung entsprechender Informationen.*

JA     NEIN.

Bei Fragen oder anderen Anliegen kann ich mich an folgende Personen wenden:

<p>Versuchsleiterin: M.A. Christina Zobe Raum: SP 1.410 Department Sport &amp; Gesundheit Universität Paderborn Warburgerstr. 100 05251-605303 christina.zobe@upb.de</p>	<p>Projektleiter: Dr. Daniel Krause Raum: SP 0.422 Department Sport &amp; Gesundheit Universität Paderborn Warburgerstr. 100 05251-603133 daniel.krause@upb.de</p>
--	--

## IV. Eingangsfragebogen

Eingangsfragebogen

1



### Eingangsfragebogen

Vom Versuchsleiter auszufüllen

VP-Nr.: \_\_\_\_\_

VG: \_\_\_\_\_

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: m  w 

Beruf/Studiengang: \_\_\_\_\_

#### Zum Sehvermögen:

 Uneingeschränkt Eingeschränkt (Dioptrien: \_\_\_\_\_) kurzsichtig weitsichtig andere Einschränkungen: \_\_\_\_\_

Die benötigte Sehhilfe/Korrektur wird bei der Untersuchung

 getragen  nicht getragen

#### Zur Vorerfahrung:

 Ich habe schon einmal an einer ähnlichen Untersuchung teilgenommen

Wenn ja, an welcher:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Eingangs-Fragebogen

2

Zu Bewegungseinschränkungen der oberen Extremitäten: Keine Linke Seite:

Art der Verletzung/Schmerzen/Beeinträchtigung	Dadurch ergeben sich für mich		
	Keine	Mittel- mäßige	Große
	Bewegungseinschränkungen		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

 Rechte Seite:

Art der Verletzung/Schmerzen/ Beeinträchtigung	Dadurch ergeben sich für mich		
	Keine	Mittel- mäßige	Große
	Bewegungseinschränkungen		
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Edinburgh Handedness Inventory (nach Oldfield, 1971)**

Bitte geben Sie Ihre bevorzugte Hand bei den folgenden Tätigkeiten oder bei der Benutzung der aufgeführten Gegenstände an.

Tragen Sie ein „+“ in die Spalte LINKS oder RECHTS hinter der jeweiligen Tätigkeit ein, wenn Sie dabei die linke oder rechte Hand bevorzugen. Ist die Bevorzugung einer Hand so stark, dass Sie die andere niemals verwenden würden, tragen Sie bitte „++“ in das zugehörige Feld ein. Können Sie bei einer Tätigkeit wirklich keine bevorzugte Hand angeben, tragen Sie bitte ein „+“ in beide Felder hinter der Tätigkeit ein. Bei manchen Tätigkeiten oder der Benutzung der Gegenstände werden beide Hände benötigt. In diesen Fällen ist in Klammern angegeben, auf welche Tätigkeit sich die Frage genau bezieht.

Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten. Lassen Sie nur dann eine Tätigkeit aus, wenn Sie überhaupt keine Erfahrung damit haben.

	Links	Rechts
1 Schreiben		
2 Malen		
3 Werfen		
4 Schere		
5 Zähneputzen		
6 Messer (ohne Gabel)		
7 Löffel		
8 Besen (obere Hand)		
9 Streichholz anzünden (Streichholz)		
10 Dose öffnen (Deckel)		

LQ		Hier bitte nichts eintragen	Decile	
----	--	-----------------------------	--------	--



## VI. Manipulationscheck

Zwischenfragebogen

2

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, ohne lange darüber nachzudenken und geben Sie Ihre spontane Meinung ab. Dabei ist uns besonders wichtig, dass Sie die Fragen ehrlich beantworten.

		Sehr schlecht	Schlecht	Mittelmäßig	Gut	Sehr gut
1	Wie schätzen Sie Ihre derzeitige Leistung in der Armhebelaufgabe ein?	<input type="checkbox"/>				
2	Wie schätzen Sie Ihre Leistung in der Armhebelaufgabe im Vergleich zu anderen ein?	<input type="checkbox"/>				

## VII. Verpflichtung zum Stillschweigen

Verpflichtung zum Stillschweigen

1



Department Sport & Gesundheit

Universität Paderborn

Dr. Daniel Krause

Ansprechpartner für eventuelle Rückfragen:

M.A. Christina Zobe

Telefon: 05251-605303

### Verpflichtung zum Stillschweigen

Ich (Name des Teilnehmers /der Teilnehmerin in Blockschrift)

\_\_\_\_\_

verpflichte mich hiermit keine Informationen über das Experiment an Dritte weiterzugeben.

Ort, Datum & Unterschrift des Teilnehmers:

Name des Teilnehmers in Druckschrift:

Ort, Datum & Unterschrift des Versuchsleiters:

Name des Versuchsleiters in Druckschrift:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## VIII. Postexperimenteller Fragebogen

Postexperimenteller Fragebogen

1



### Postexperimenteller Fragebogen

Vom Versuchsleiter auszufüllen
VP-Nr.: _____
VG: _____

Wir danken Ihnen für die Teilnahme an dieser Untersuchung. In zwei Wochen erhalten Sie einen letzten Fragebogen per E-Mail zugeschickt. Um Ihre experimentellen Daten vollständig auswerten zu können, ist es für uns sehr wichtig, dass Sie uns diesen letzten Fragebogen ausgefüllt zurückschicken.

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, ohne lange darüber nachzudenken und geben Sie Ihre spontane Meinung ab. Dabei ist uns besonders wichtig, dass Sie die Fragen ehrlich beantworten.

		Sehr schlecht	Schlecht	Mittelmäßig	Gut	Sehr gut
1	Wie schätzen Sie Ihre derzeitige Leistung in der Armhebelaufgabe ein?	<input type="checkbox"/>				
2	Wie schätzen Sie Ihre Leistung in der Armhebelaufgabe im Vergleich zu anderen ein?	<input type="checkbox"/>				
3	Wie schätzen Sie Ihre Leistungsentwicklung in der Armhebelaufgabe im Verlauf des gesamten Experiments ein?	<input type="checkbox"/>				

## Postexperimenteller Fragebogen

2

Folgende Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die heutigen Tests mit Einzelaufgabenbedingung (nur Bewegungsaufgabe).

Bitte geben Sie Ihre **spontane** Zustimmung zu den folgenden Aussagen an. Dabei ist uns besonders wichtig, dass Sie die Fragen ehrlich beantworten.

		Trifft zu	Trifft eher zu	Weder/ noch	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu
1	Ich habe bei den Tests versucht die Armbewegung in unter 1,2 Sekunden auszuführen.	<input type="checkbox"/>				
2	Ich habe versucht die Bewegung bei den Tests so genau wie möglich auszuführen.	<input type="checkbox"/>				

Folgende Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die heutigen Tests mit Doppelaufgabenbedingung (gleichzeitig Bewegungsaufgabe und 2-back-Aufgabe).

Bitte geben Sie Ihre **spontane** Zustimmung zu den folgenden Aussagen an. Dabei ist uns besonders wichtig, dass Sie die Fragen ehrlich beantworten.

		Trifft zu	Trifft eher zu	Weder/ noch	Trifft eher nicht zu	Trifft nicht zu
1	Mir ist es gelungen die Armbewegung primär und so gut wie möglich zu absolvieren.	<input type="checkbox"/>				
2	Mir ist es schwer gefallen, mich bei den Tests auf die priorisierte Aufgaben (Armbewegung) zu konzentrieren	<input type="checkbox"/>				

Zu Störungen/Einschränkungen/ Behinderungen während der Untersuchung:

Keine

Folgendes hat mich während der Untersuchung gestört/ eingeschränkt/ behindert:

---



---



---



---

Zu Informationen von Dritten:

Postexperimenteller Fragebogen

3

Haben Sie von Dritten (bspw. Kommilitonen) Informationen über das Experiment erhalten?

Nein

Ja

Wenn ja, welche:

---

---

---

---

---

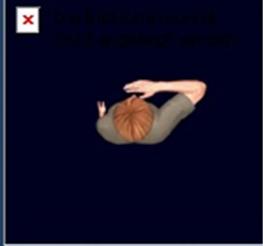
---



## X. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 1

Folgende Präsentation wurde in den allen Versuchsgruppen (*POS100*, *POS14*, *NEG14*, *KGa* und *KGp*) verwendet:

<p>Willkommen zu Untersuchungstag 1</p>	<p>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</p> <p>Es wird Dir gleich ein Instruktionsvideo mit der zu lernenden Ellbogen-Streck-Beuge-Bewegung gezeigt.</p> <p>Die Bewegung besteht aus 3 Umkehrpunkten.</p>
1	2
<p>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</p> 	<p>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</p> <p>Beschreibung zu dem Instruktionsvideo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Unterarm befindet sich zu Beginn der Bewegung parallel zum Oberkörper → dies ist die 0°-Position</li> <li>• Ausgehend von dieser 0°-Position sollst Du 3 Umkehrpunkte ansteuern.</li> <li>• Die drei Umkehrpunkte liegen bei 70°, 20° und 70°.</li> <li>• Um die Bewegung zu beenden durchlaufe die 0°-Position ohne anzuhalten</li> </ul>
3	4
<p>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</p> 	<p>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</p> <p>Ziele der Aufgabenausführung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Treffe die Umkehrpunkte möglichst <b>genau!</b></li> <li>• Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!</li> </ul>
5	6

<p><b>Instruktion zur Bewegungsaufgabe</b></p> <p>Erläuterungen zur Hebelaufgabe:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Am oberen Rand des Bildschirms ist ein roter Balken zu sehen</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>Führe die Armbewegung aus während der Balken grün ist</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>Spätestens wenn der Balken wieder rot ist muss die Bewegung beendet sein</li> </ul>	<p><b>Feedback zur Bewegungsaufgabe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:</li> <li>Jeder der drei blauen Balken steht für einen Umkehrpunkt.</li> <li>Ragt der Balken von der Mittellinie aus nach unten, war der produzierte Winkel zu gering (Unterarm zu nah am Körper).</li> <li>Ragt der Balken von der Mittellinie aus nach oben, war der produzierte Winkel zu groß (Unterarm zu weit weg vom Körper).</li> <li>In dem oberen gelben Balken sind zur Erinnerung die Werte der anzusteuern Umkehrpunkte eingeblendet.</li> </ul>
<p><b>Feedback zur Bewegungsaufgabe</b></p> 	<p><b>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</b></p> <p>Es folgen 5 Übungsversuche. Diese bestehen jeweils aus einer Videopräsentation mit anschließender Bewegungsausführung.</p>
<p><b>Videoinstruktion zur Bewegungsaufgabe</b></p> 	<p><b>Durchführung Übungsversuch</b></p>

7



8



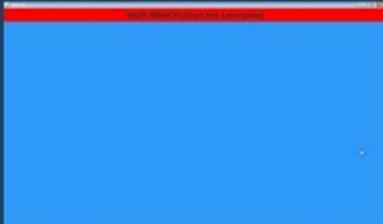
9

10



11

12

<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Es folgt ein Probe-Testblock bestehend aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3 x n-Back-Aufgabe</li> <li>3 x Hebelaufgabe</li> <li>6 x Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe zusammen</li> <li>3 x Hebelaufgabe</li> <li>3 x n-Back-Aufgabe</li> </ul>	<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p><b>Erläuterungen zur n-Back-Aufgabe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In beliebiger Reihenfolge werden gelbe Rechtecke in einer 3 x 3 Matrix präsentiert.</li> <li>• Es sollen Übereinstimmungen zwischen dem aktuellen Rechteck und dem vorletzten Rechteck erkannt werden</li> <li>• Bei Übereinstimmung → Drücken der Leertaste</li> </ul> 																		
☆	13	14																	
<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Beispiel für die n-Back-Aufgabe:</p> <p>Aktuell präsentierte Kästchen</p> <table border="1" data-bbox="352 902 552 1077"> <tr><td></td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>Kästchen die bereits gezeigt und sich gemerkt wurden</p> <table border="1" data-bbox="592 902 791 1077"> <tr><td></td><td></td><td>4</td></tr> <tr><td></td><td>2</td><td></td></tr> <tr><td>1/3</td><td></td><td></td></tr> </table> <p><b>2. und 3. Rechteck stimmen überein → Leertaste drücken</b></p>			4		2		3					4		2		1/3			<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Der Ablauf der n-Back-Aufgabe im Test wird Dir nun exemplarisch präsentiert:</p> 
		4																	
	2																		
3																			
		4																	
	2																		
1/3																			
☆	15	16																	
<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Der Probe-Testblock besteht aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3 x n-Back-Aufgabe</li> <li>3 x Hebelaufgabe</li> <li>6 x Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe zusammen</li> <li>3 x Hebelaufgabe</li> <li>3 x n-Back-Aufgabe</li> </ul>	<p><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p><b>Erläuterungen zur Hebelaufgabe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Am oberen Rand des Bildschirms ist ein roter Balken zu sehen</li> <li>• Führe die Armbewegung aus während der Balken grün ist</li> <li>• Spätestens wenn der Balken wieder rot ist muss die Bewegung beendet sein</li> </ul>																		
☆	17	18																	

<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Der Probe-Testblock besteht aus:</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x n-Back-Aufgabe</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x Hebelaufgabe</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">6 x Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe zusammen</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x Hebelaufgabe</div> <div style="border: 1px solid green; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x n-Back-Aufgabe</div>	<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;"><b>Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe</b></div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es startet zuerst die n-Back-Aufgabe. Wird der rote Balken grün darf mit der Hebelaufgabe begonnen werden. Sie muss spätestens beendet sein wenn der Balken nach 5 Sekunden wieder rot ist.</li> <li>• Während die Hebelaufgabe ausgeführt wird läuft die n-Back-Aufgabe weiter und muss parallel ausgeführt werden.</li> </ul>
19	20
<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;"><b>Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe</b></div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Während der Doppelaufgabenbedingungen soll die Armbewegung primär und so gut wie möglich absolviert werden.</li> <li>• Die Armbewegung ist in erster Linie wichtig!</li> <li>• Führe die zweite Aufgabe so gut es geht parallel aus, ohne dass die Armbewegung darunter leidet!</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Der Probe-Testblock besteht aus:</p> <div style="border: 1px solid green; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x n-Back-Aufgabe</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x Hebelaufgabe</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">6 x Hebelaufgabe und n-Back-Aufgabe zusammen</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x Hebelaufgabe</div> <div style="border: 1px solid green; padding: 2px; margin-bottom: 2px; text-align: center;">3 x n-Back-Aufgabe</div>
21	22
<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Zur Erinnerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Treffe die Umkehrpunkte möglichst <b>genau!</b></li> <li>• Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!</li> <li>• Während der Doppelaufgabenbedingungen soll die Armbewegung primär und so gut wie möglich absolviert werden.</li> <li>• Die Armbewegung ist in erster Linie wichtig!</li> <li>• Führe die zweite Aufgabe so gut es geht parallel aus, ohne dass die Armbewegung darunter leidet!</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Instruktion zum Probe-Testblock</b></p> <p>Der folgende Testblock ist nur ein Probedurchlauf. Falls Du währenddessen noch Fragen hast kannst Du diese jederzeit gerne stellen.</p>
23	24

### Durchführung Probe-Testblock

25

### Instruktion zum Übungsblock

- Im Folgenden führst du einen ersten Übungsblock mit 40 Versuchen aus.

26

### Instruktion zum Übungsblock

Zur Erinnerung:

- Treffe die Umkehrpunkte möglichst **genau!**
- Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!

27

### Durchführung Übungsblock

28

Ende Tag 1

29

## XI. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 2

Folgende Präsentation wurde in der Versuchsgruppe *POS100* verwendet:

1

2

3

4

5

6

### Instruktion zum Zwischenfragebogen

- Fülle bitte den folgenden Zwischenfragebogen aus, während der/die Untersuchungsleiter/in deine Ergebnisse auswertet.

7

### Durchführung Zwischenfragebogen

8

### Instruktion zum Übungsblock

- Im Folgenden führst du deinen ersten Übungsblock mit 120 Versuchen aus.
- Die ersten 6 Versuche wirst du ohne Feedback durchführen.
- Nach einem Block von 40 Versuchen besteht jeweils die Möglichkeit eine kurze Pause zu machen.

9

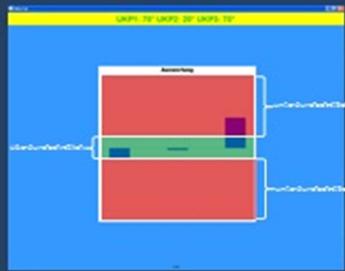
### Instruktion zum Übungsblock

- Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:
- Zusätzlich zum bereits bekannten Feedback werden weiße Striche ober- und unterhalb der Mittellinie eingeblendet.
- Diese kennzeichnen die durchschnittliche Leistung von 89 sportlich aktiven Probanden, die im Jahr 2012 an einem Experiment mit der gleichen Armhebel-Aufgabe teilgenommen haben.

☆

10

### Instruktion zum Übungsblock

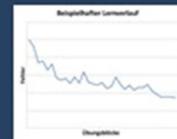


☆

11

### Instruktion zum Übungsblock

- Der Durchschnittswert der Vergleichsgruppe bezieht sich immer auf den jeweiligen Block von 6 Versuchen.
- Der Durchschnittswert kann sich also von Block zu Block verändern.
- In der Tendenz wird der Durchschnittswert im Verlauf der Übungsphasen geringer werden.
- Geringe Schwankungen sind dabei jedoch normal.



☆

12

### Instruktion zum Übungsblock

Zur Erinnerung:

- Treffe die Umkehrpunkte möglichst **genau!**
- Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!

13

### Durchführung Übungsblock

14

### Instruktion zum Zwischenfragebogen

- Fülle abschließend für heute bitte den bereits bekannten Zwischenfragebogen aus.

15

### Durchführung Zwischenfragebogen

16

### Hinweis: Verpflichtung zum Stillschweigen

- Es ist enorm wichtig, dass du über dieses Experiment Stillschweigen bewahrst.
- Sprich bitte mit niemandem über:
  - Deine individuelle Leistung in diesem Experiment
  - Den eingeblendeten Durchschnittswert (weiße Linie)
- Dies ist besonders wichtig, weil einige andere Probanden das Experiment sehr ähnlich durchführen, zum Beispiel ohne die Einblendung des Durchschnittswertes.
- Durch diese Informationen würden die Ergebnisse unbrauchbar.

17

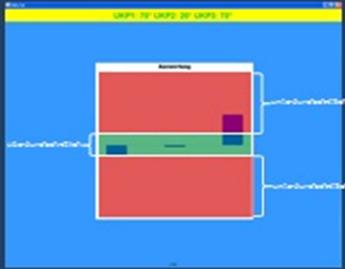
### Ende Tag 2

18



## XII. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 3

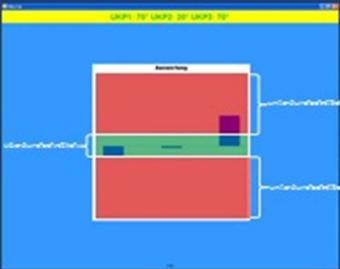
Folgende Präsentation wurde in der Versuchsgruppe *POS100* verwendet:

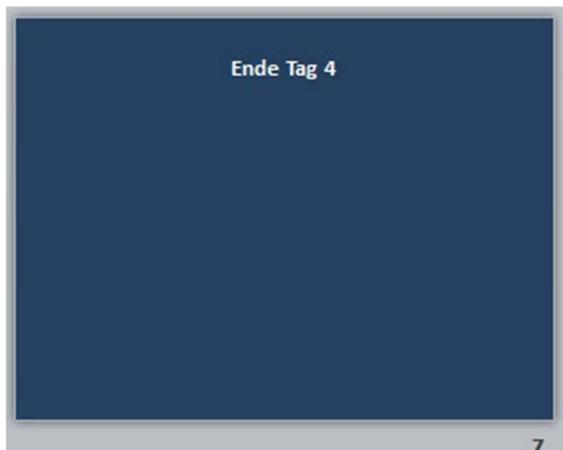
<p style="text-align: center;">Willkommen zu Untersuchungstag 3</p>	<p style="text-align: center;">Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Folgenden führst du deinen zweiten Übungsblock mit 150 Versuchen aus.</li> <li>• Die ersten 6 Versuche wirst du ohne Feedback durchführen.</li> <li>• Nach einem Block von 40 Versuchen besteht jeweils die Möglichkeit eine kurze Pause zu machen.</li> </ul>
1	2
<p style="text-align: center;">Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:</li> <li>• Die weißen Striche ober- und unterhalb der Mittellinie kennzeichnen den Durchschnittswert der Vergleichsgruppe</li> <li>• Der Durchschnittswert bezieht sich dabei immer auf den jeweiligen Block von 6 Versuchen.</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Instruktion zum Übungsblock</p> 
3	4
<p style="text-align: center;">Instruktion zum Übungsblock</p> <p>Zur Erinnerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Treffe die Umkehrpunkte möglichst <b>genau!</b></li> <li>• Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Durchführung Übungsblock</p>
5	6



### XIII. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 4

Folgende Präsentation wurde in der Versuchsgruppe *POS100* verwendet:

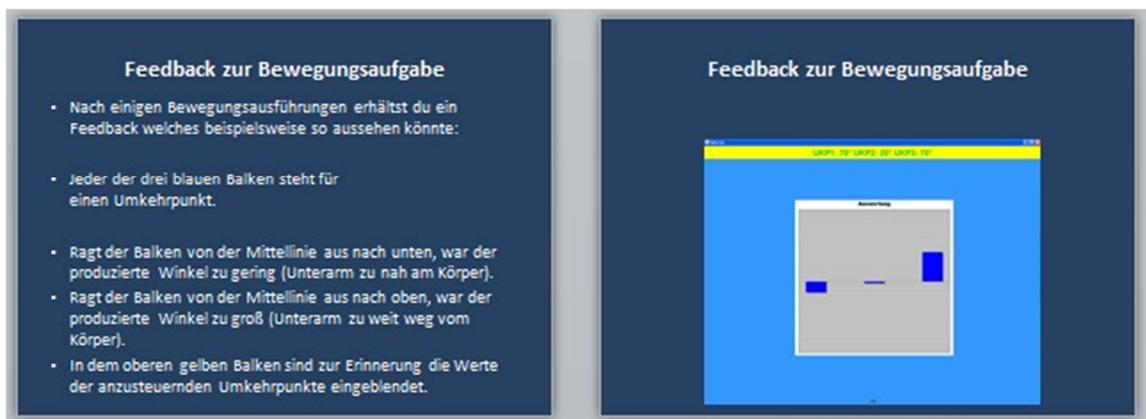
<p>Willkommen zu Untersuchungstag 5</p>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Im Folgenden führst du deinen vierten Übungsblock mit 150 Versuchen aus.</li><li>• Die ersten 6 Versuche wirst du ohne Feedback durchführen.</li><li>• Nach einem Block von 40 Versuchen besteht jeweils die Möglichkeit eine kurze Pause zu machen.</li></ul>
1	2
<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:</li><li>• Die weißen Striche ober- und unterhalb der Mittellinie kennzeichnen den Durchschnittswert der Vergleichsgruppe</li><li>• Der Durchschnittswert bezieht sich dabei immer auf den jeweiligen Block von 6 Versuchen.</li></ul>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p> 
☆ 3	☆ 4
<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <p>Zur Erinnerung:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Treffe die Umkehrpunkte möglichst <b>genau!</b></li><li>• Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!</li></ul>	<p>Durchführung Übungsblock</p>
5	6



In den Versuchsgruppen *POS14* und *NEG14* wurde an Stelle der Folie 3 folgende Folie verwendet:

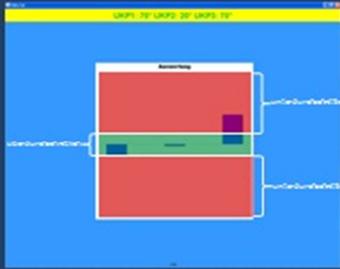


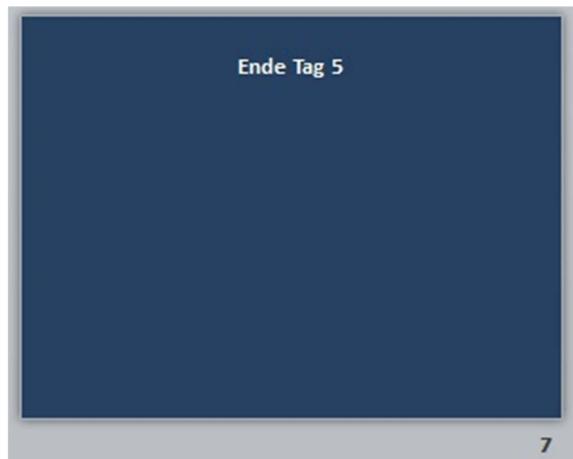
In der Gruppe *KGa* wurden an Stelle der Folien 3 und 4 folgende zwei Folien verwendet:



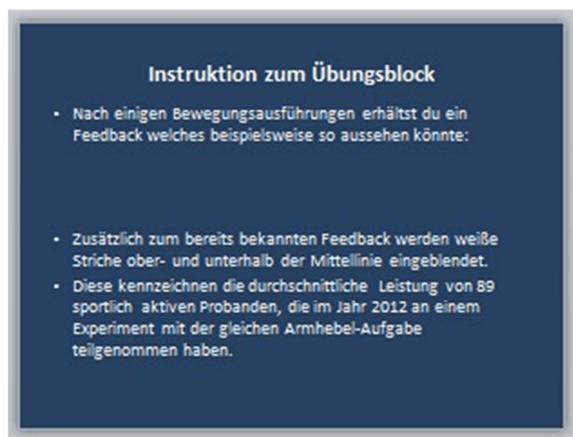
## XIV. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 5

Folgende Präsentation wurde in der Versuchsgruppe *POS100* verwendet:

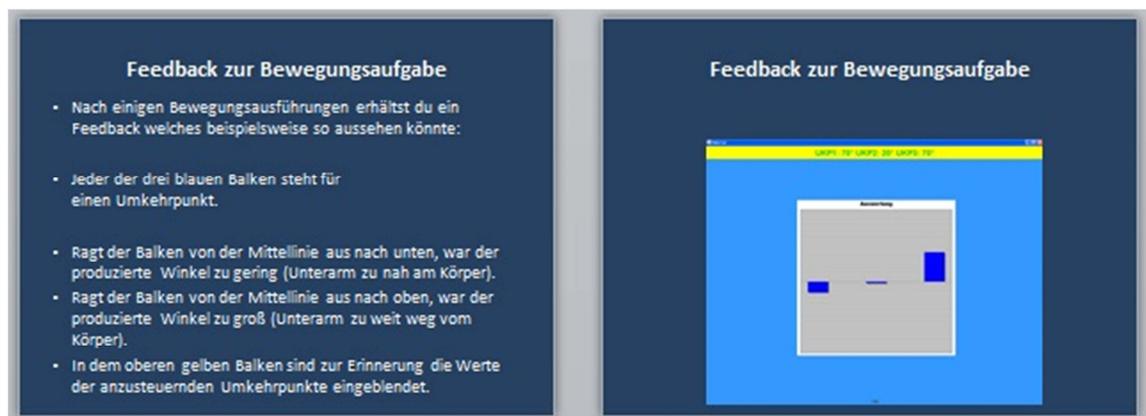
<p>Willkommen zu Untersuchungstag 6</p>	<p>Instruktion zum Zwischenfragebogen</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fülle bitte zunächst den folgenden Zwischenfragebogen aus.</li></ul>
1	2
<p>Durchführung Zwischenfragebogen</p>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Im Folgenden führst du deinen letzten Übungsblock mit 150 Versuchen aus.</li><li>• Die ersten 6 Versuche wirst du ohne Feedback durchführen.</li><li>• Nach einem Block von 40 Versuchen besteht jeweils die Möglichkeit eine kurze Pause zu machen.</li></ul>
3	4
<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:</li><li>• Die weißen Striche ober- und unterhalb der Mittellinie kennzeichnen den Durchschnittswert der Vergleichsgruppe</li><li>• Der Durchschnittswert bezieht sich dabei immer auf den jeweiligen Block von 6 Versuchen.</li></ul>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p> 
☆	☆
5	6



In den Versuchsgruppen *POS14* und *NEG14* wurde an Stelle der Folie 3 folgende Folie verwendet:

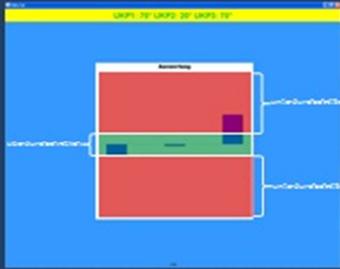


In der Gruppe *KGa* wurden an Stelle der Folien 3 und 4 folgende zwei Folien verwendet:



## XV. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 6

Folgende Präsentation wurde in der Versuchsgruppe *POS100* verwendet:

<p>Willkommen zu Untersuchungstag 6</p>	<p>Instruktion zum Zwischenfragebogen</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fülle bitte zunächst den folgenden Zwischenfragebogen aus.</li></ul>
<p>Durchführung Zwischenfragebogen</p>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Im Folgenden führst du deinen letzten Übungsblock mit 150 Versuchen aus.</li><li>• Die ersten 6 Versuche wirst du ohne Feedback durchführen.</li><li>• Nach einem Block von 40 Versuchen besteht jeweils die Möglichkeit eine kurze Pause zu machen.</li></ul>
<p>Instruktion zum Übungsblock</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nach jeder Bewegungsausführung erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:</li><li>• Die weißen Striche ober- und unterhalb der Mittellinie kennzeichnen den Durchschnittswert der Vergleichsgruppe</li><li>• Der Durchschnittswert bezieht sich dabei immer auf den jeweiligen Block von 6 Versuchen.</li></ul>	<p>Instruktion zum Übungsblock</p>  <p>The screenshot shows a feedback window titled 'Anpassung' with a blue background. It features a central bar chart with three bars: a tall red bar, a shorter green bar, and a very short purple bar. Two horizontal white lines are drawn above and below the green bar, representing comparison group values. The chart is set against a grid background.</p>
☆ 5	☆ 6

### Instruktion zum Übungsblock

Zur Erinnerung:

- Treffe die Umkehrpunkte möglichst **genau!**
- Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!

7

### Durchführung Übungsblock

8

### Instruktion zum Zwischenfragebogen

- Fülle abschließend für heute bitte den bereits bekannten Zwischenfragebogen aus.

9

### Durchführung Zwischenfragebogen

10

Ende Tag 6

11

In den Versuchsgruppen *POS14* und *NEG14* wurde an Stelle der Folie 5 folgende Folie verwendet:



**Instruktion zum Übungsblock**

- Nach einigen Bewegungsausführungen erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:
- Zusätzlich zum bereits bekannten Feedback werden weiße Striche ober- und unterhalb der Mittellinie eingeblendet.
- Diese kennzeichnen die durchschnittliche Leistung von 89 sportlich aktiven Probanden, die im Jahr 2012 an einem Experiment mit der gleichen Armhebel-Aufgabe teilgenommen haben.

In der Gruppe *KGa* wurden an Stelle der Folien 5 und 6 folgende zwei Folien verwendet:



**Feedback zur Bewegungsaufgabe**

- Nach einigen Bewegungsausführungen erhältst du ein Feedback welches beispielsweise so aussehen könnte:
- Jeder der drei blauen Balken steht für einen Umkehrpunkt.
- Ragt der Balken von der Mittellinie aus nach unten, war der produzierte Winkel zu gering (Unterarm zu nah am Körper).
- Ragt der Balken von der Mittellinie aus nach oben, war der produzierte Winkel zu groß (Unterarm zu weit weg vom Körper).
- In dem oberen gelben Balken sind zur Erinnerung die Werte der anzusteuenden Umkehrpunkte eingeblendet.

**Feedback zur Bewegungsaufgabe**



## XVI. Powerpoint-Präsentation Untersuchungstag 7

Folgende Präsentation wurde in den Versuchsgruppen *POS100*, *POS14* und *NEG14* verwendet:

The presentation consists of six slides arranged in a 3x2 grid:

- Slide 1:** Willkommen zu Untersuchungstag 7
- Slide 2:** Instruktion zum Abschlusstest
  - Bevor es losgeht darfst du dich erst einmal „warm machen“:
  - Führe 6 Bewegungen der Armhebelbewegung ohne die Steuer- und Feedbacksoftware aus
- Slide 3:** Durchführung Aufwärm-Phase
- Slide 4:** Instruktion zum Abschlusstest
  - Der Abschlusstest läuft genauso ab, wie der Eingangstest, den du zu Beginn des Experiments durchgeführt hast.
  - 3 x Kästchen – Memory - Aufgabe
  - 3 x Hebelaufgabe
  - 6 x Hebelaufgabe und Kästchen - Memory - Aufgabe zusammen
  - 3 x Hebelaufgabe
  - 3 x Kästchen –Memory Aufgabe
- Slide 5:** Instruktion zum Abschlusstest
  - Zur Erinnerung:
  - Treffe die Umkehrpunkte möglichst **genau!**
  - Realisiere die Bewegung in unter 1,2 Sek.!
  - Während der Doppelaufgabenbedingungen soll die Armbewegung primär und so gut wie möglich absolviert werden.
  - Die Armbewegung ist in erster Linie wichtig!
  - Führe die zweite Aufgabe so gut es geht parallel aus, ohne dass die Armbewegung darunter leidet!
- Slide 6:** Durchführung Abschlusstest

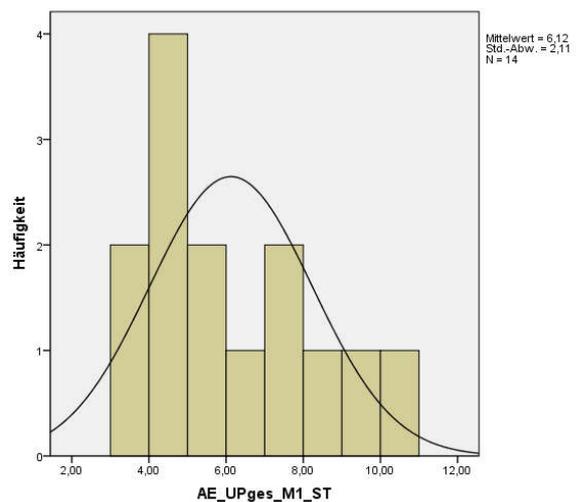
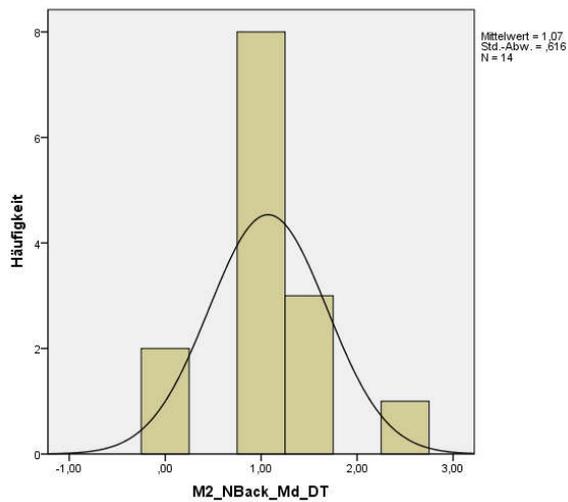
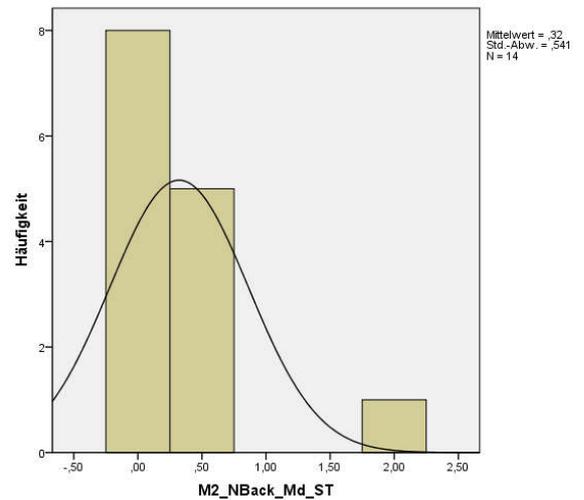
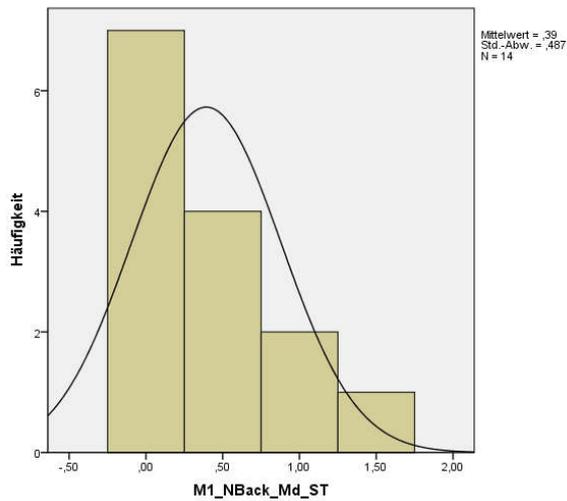
<h3>Hinweis zur Verpflichtung auf Stillschweigen</h3> <p>Als kleine Erinnerung:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Es ist enorm wichtig, dass du über dieses Experiment Stillschweigen bewährst.</li><li>• Sprich bitte mit niemandem über:<ul style="list-style-type: none"><li>- Deine individuelle Leistung in diesem Experiment</li><li>- Den eingeblendeten Durchschnittswert (weiße Linien)</li></ul></li><li>• Dies ist besonders wichtig, weil einige andere Probanden das Experiment sehr ähnlich durchführen, zum Beispiel ohne die Einblendung des Durchschnittswertes.</li><li>• Durch diese Informationen würden die Ergebnisse unbrauchbar.</li></ul>	<h3>Hinweis zum weiteren Ablauf</h3> <ul style="list-style-type: none"><li>• In zwei bis drei Wochen schicken wir dir einen allerletzten kurzen Fragebogen per Mail zu (dauert maximal 5 Minuten).</li><li>• Bitte schicke diesen ausgefüllt an uns zurück.</li> <li>• Abschließend für heute bitten wir dich noch einen Abschlussfragebogen auszufüllen.</li></ul>
<h3>Durchführung Abschlussfragebogen</h3>	<h3>Ende Tag 7</h3> <p>Herzlichen Dank für deine Teilnahme an diesem Experiment</p> 
7	8
9	10

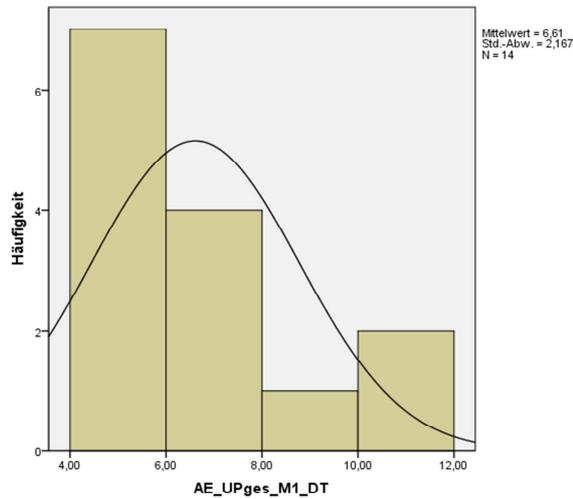
In den Versuchsgruppen *KGa* und *KGp* entfiel die Folie 7.

## XVII. Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der POS100

Nicht normalverteilt sind in dieser Gruppe folgende Variablen:

	D	df	p	Schiefe	Kurtosis
M1_Nback_Md_ST	.290	14	.002	1.073	0.367
M2_Nback_Md_ST	.299	14	.001	2.547	7.638
M2_Nback_Md_DT	.311	14	.001	0.265	2.036
AE_Upges_M1_ST	.235	14	.035	0.755	-0.753
AE_Upges_M1_DT	.242	14	.026	1.449	1.198

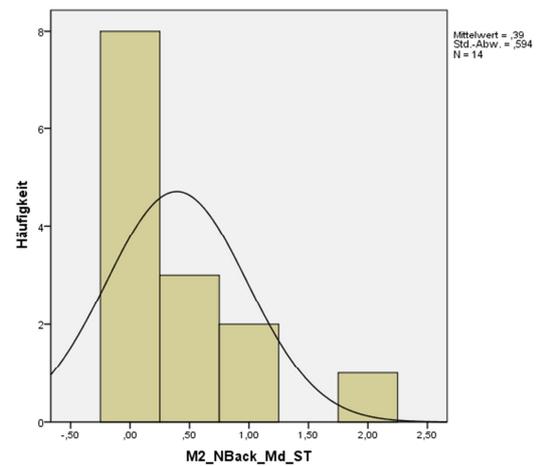
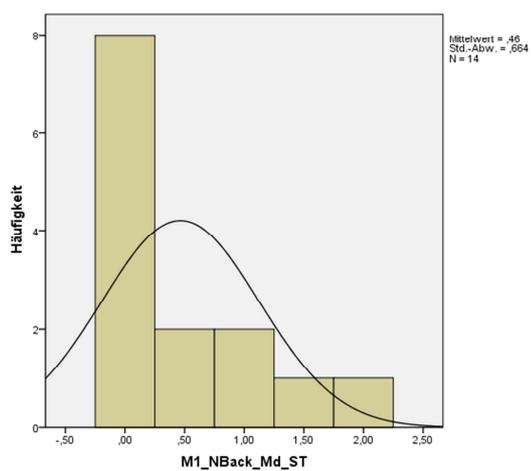


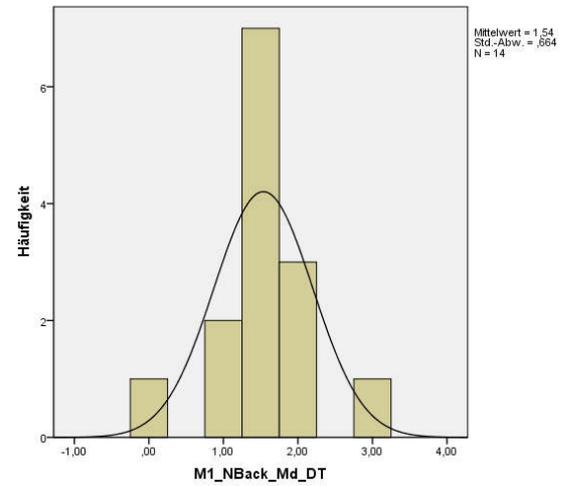
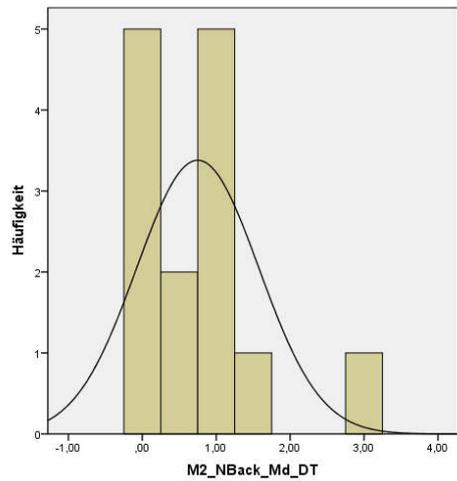


## XVIII. Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der POS14

Nicht normalverteilt sind in dieser Gruppe folgende Variablen:

	D	df	p	Schiefe	Kurtosis
M1_Nback_Md_ST	.329	14	.000	1.300	0.722
M1_Nback_Md_DT	.264	14	.009	-0.150	2.745
M2_Nback_Md_ST	.317	14	.000	1.762	3.165
M2_Nback_Md_DT	.238	14	.030	1.551	3.394

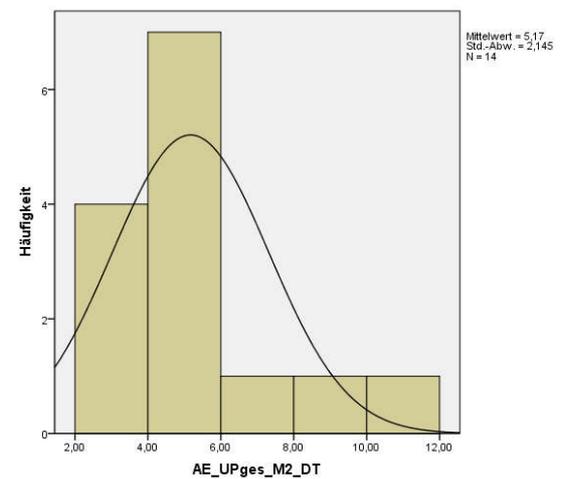
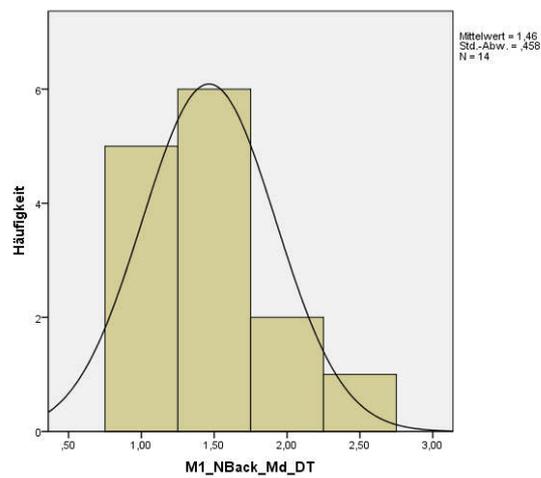
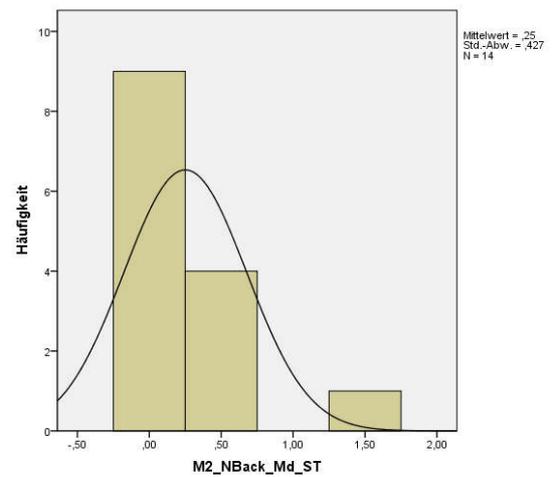
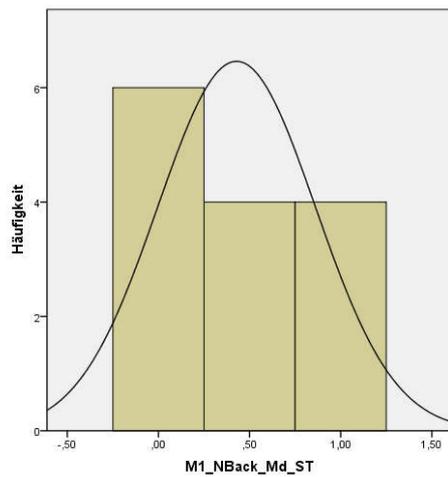




## XIX. Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der NEG14

Nicht normalverteilt sind in dieser Gruppe folgende Variablen:

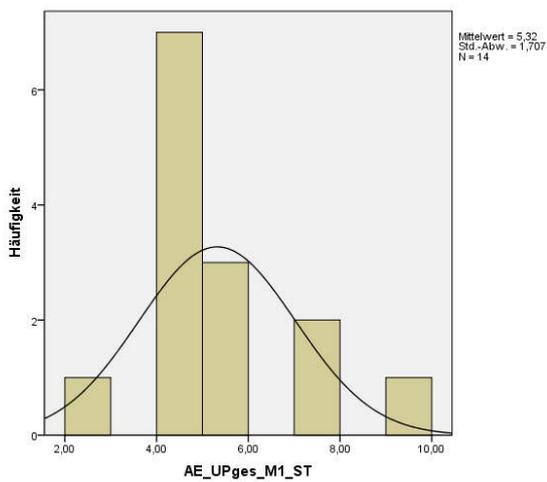
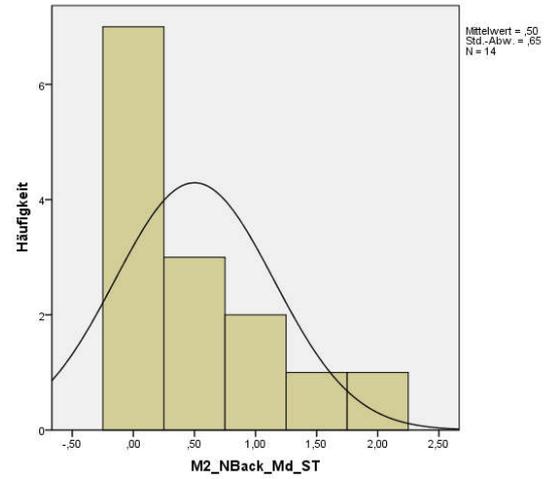
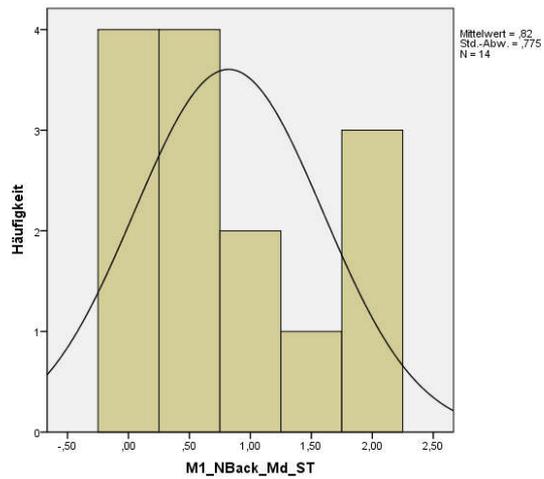
	D	df	p	Schiefe	Kurtosis
M1_Nback_Md_ST	.268	14	.007	0.306	-1.635
M1_Nback_Md_DT	.255	14	.014	0.855	0.447
M2_Nback_Md_ST	.364	14	.000	2.155	5.297
AE_Upges_M2_DT	.230	14	.043	1.460	1.567



## XX. Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der KGa

Nicht normalverteilt sind in dieser Gruppe folgende Variablen:

	D	df	p	Schiefe	Kurtosis
M1_Nback_Md_ST	,232	14	,039	0,557	-1,169
M2_Nback_Md_ST	,279	14	,004	1,223	0,689
AE_Upges_M1_ST	,282	14	,004	1,269	1,422



## XXI. Tests auf Gaußsche Normalverteilung in der KGp

Nicht normalverteilt sind in dieser Gruppe folgende Variablen:

	D	df	p	Schiefe	Kurtosis
M1_Nback_Md_ST	,351	14	,000	0.824	-0.895
M2_Nback_Md_ST	,279	14	,004	1.382	1.825

