

**Katja Pipereit**

# Einflussgrößen auf die sensomotorische Adaptation, Kognition und Propriozeption

**Doktorarbeit / Dissertation**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2005 Diplom.de  
ISBN: 9783832493066

**Katja Pipereit**

**Einflussgrößen auf die sensomotorische Adaptation,  
Kognition und Propriozeption**



---

Katja Pipereit

# **Einflussgrößen auf die sensomotorische Adaptation, Kognition und Propriozeption**

Dissertation / Doktorarbeit  
Deutsche Sporthochschule Köln  
Institut für Physiologie und Anatomie  
Abgabe Oktober 2005



Diplomica GmbH \_\_\_\_\_  
Hermannstal 119k \_\_\_\_\_  
22119 Hamburg \_\_\_\_\_  
Fon: 040 / 655 99 20 \_\_\_\_\_  
Fax: 040 / 655 99 222 \_\_\_\_\_  
agentur@diplom.de \_\_\_\_\_  
www.diplom.de \_\_\_\_\_

ID 9306

Pipereit, Katja: Einflussgrößen auf die sensomotorische Adaptation, Kognition und Propriozeption

Druck Diplomica GmbH, Hamburg, 2006

Zugl.: Deutsche Sporthochschule Köln, Dissertation / Doktorarbeit, 2005

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2006

Printed in Germany

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name Katja Pipereit  
Anschrift Aachener Straße 336  
50933 Köln  
Geburtsdatum 27.02.1976  
Geburtsort Osnabrück  
Familienstand ledig

### **Akademische Laufbahn**

1982 – 1986 Grundschule Hellern, Osnabrück  
1986 – 1988 Orientierungsstufe „In der Wüste“, Osnabrück  
1988 – 1995 Ratsgymnasium, Osnabrück; Abschluss: Abitur  
WS 1995/96 Immatrikulation an der Universität zu Köln  
Lehramtsstudiengang Sonderpädagogik mit dem Fach Englisch  
SS 1996 Immatrikulation an der Deutschen Sporthochschule Köln  
Lehramtsstudiengang Sport  
SS 1997 Wechsel zum Diplomstudiengang Sportwissenschaft  
SS 2001 Abschluss Diplom Sportwissenschaft  
SS 2002 Immatrikulation an der Deutschen Sporthochschule Köln  
Promotionsstudium  
WS 2004 Examensprüfungen Englisch und Erziehungswissenschaft

### **Studienbegleitende Tätigkeit an der Deutschen Sporthochschule Köln**

07/2000 – 08/2001 Studentische Hilfskraft am Institut für Sportsoziologie

### **Berufliche Tätigkeit**

09/2001 – 02/2003 Wissenschaftliche Hilfskraft an der Deutschen Sporthochschule Köln im Physiologischen Institut  
02/2003 – 08/2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Deutschen Sporthochschule Köln im Institut für Physiologie und Anatomie

Köln, im Oktober 2005

---

Katja Pipereit

Teile dieser Arbeit sind bereits, mit Einverständnis des ehemaligen Vorsitzenden des Promotionsausschusses Herrn Prof. Dr. H.-D. Horch, bei der Zeitschrift *Experimental Brain Research* zur Veröffentlichung eingereicht und auf folgenden Kongressen als Posterpräsentation veröffentlicht worden:

32<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroscience, Orlando (2002)

Symposium „Neuro-Visionen – Perspektiven in NRW“, Düsseldorf (2003)

6<sup>th</sup> IBRO World Congress of Neuroscience, Prag (2003)

Symposium „Neuro-Visionen 2 – Perspektiven in NRW“, Düsseldorf (2004)

6th Meeting of the German Neuroscience Society, Göttingen (2005)

European Workshop Of Movement Science, Wien (2005)

Pipereit K, Bock O, Vercher JL (akzeptiert, in Revision) The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res*

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



## Abkürzungsverzeichnis

EA	Einzelaufgabe
FB	Folgebewegung
DA	Doppelaufgabe
KTR	Kontrolle
L / R	links / rechts
LA	Lernaufgabe
n.s.	nicht signifikant
RA	Reaktionsaufgabe
RM	Rückmeldung
RMS-Fehler	Root Mean Square-Fehler
V / H	vorne / hinten
V <sub>kompo</sub>	Kompositions-vorteil
V <sub>deko</sub>	Dekompositions-vorteil
VIB	Vibration
ZA	Zweitaufrage
ZB	Zeigebewegung

## Gleichungsverzeichnis

Gl. 1:	Gleichung für die Berechnung des $\Delta$ RMS-Fehlers.....	35
Gl. 2:	Gleichung für die Berechnung des prozentualen Transfers.....	43
Gl. 3:	Gleichung für die Berechnung des Kompositions- und Dekompositions-vorteils.....	54

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Überblick über die Probanden der einzelnen Experimente.....	29
Tab. 2:	Ablauf des Experiments A.....	42
Tab. 3:	Ablauf des Experiments B.....	53
Tab. 4:	Ablauf des Experiments C am zweiten Tag.....	65
Tab. 5:	Ablauf des Experiments D am zweiten Tag.....	74
Tab. 6:	Ablauf des Experiments F.....	88
Tab. 7:	Ablauf des Experiments G.....	94

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der beiden Varianten des Versuchsaufbaus...	30
Abb. 2: Aufbau des DA-Experiments mit Zeigebewegungen.....	34
Abb. 3: Rohdaten von Bewegungen des Zielpunkts und des Fadenkreuzes.....	35
Abb. 4: Rohdaten von Bewegungen des Fadenkreuzes bei Zeigebewegungen....	36
Abb. 5: Darstellung der Berechnung des Fehlerwinkels bei Zeigebewegungen....	36
Abb. 6: Beispiel einer Anpassungsfunktion.....	38
Abb. 7: Gruppeneinteilung am ersten Testtag.....	41
Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen A-D.....	43
Abb. 9: Ergebnis des Post hoc-Tests.....	44
Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der beiden Gruppen $-45^\circ$ und $+45^\circ$ ....	45
Abb. 11: Prozentualer Transfer auf das ungeübte Feld.....	46
Abb. 12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Experiment B.....	52
Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen.....	55
Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der linearen Distanz der vier Gruppen.....	56
Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Maximalgeschwindigkeit der vier Gruppen.....	57
Abb. 16: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers aller Probanden am zweiten Tag.....	66
Abb. 17: Verlauf der $\Delta$ RMS-Fehler Experiment C.....	67
Abb. 18: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment C.....	68
Abb. 19: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers am zweiten Tag Experiment D.....	75
Abb. 20: Verlauf der $\Delta$ Zeigefehler Experiment D.....	76
Abb. 21: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment D.....	77
Abb. 22: Sitz der Vibratoren.....	82
Abb. 23: Im Experiment benutzte Formen.....	83
Abb. 24: Ergebnisse des Erfühlens von Formen.....	84
Abb. 25: Ergebnisse der Druckeinschätzung.....	85
Abb. 26: Ergebnisse der Winkelreproduktion.....	86
Abb. 27: Zeitlicher Verlauf des initialen Zeigefehlers der beiden Gruppen.....	89
Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (F)	90
Abb. 29: Darstellung des Roboteraufbaus.....	93
Abb. 30: Rohdaten der Zeigebewegungen.....	95
Abb. 31: Verlauf des initialen Zeigefehlers Experiment G.....	95
Abb. 32: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (G)	97

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motorisches Lernen.....	1
1.2	Mechanismen der sensomotorischen Adaptation.....	3
1.2.1	Strategische Anpassung und Rekalibrierung.....	6
1.2.2	Auswirkungen aufeinander folgender Adaptationsvorgänge.....	8
1.3	Phasen des motorischen Lernens und die Doppelaufgaben-Methode.....	15
1.4	Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation.....	20
1.4.1	Die Propriozeption.....	21
1.4.2	Einfluss der Propriozeption auf die sensomotorische Adaptation.....	21
1.5	Intention dieser Arbeit.....	25
2	Experimente.....	28
2.1	Experimentübergreifende Methodik.....	28
2.1.1	Versuchspersonen.....	28
2.1.2	Versuchsaufbau.....	29
2.1.3	Versuchsablauf.....	30
2.1.4	Auswertung.....	34
2.2	Vorexperimente.....	40
2.2.1	Einfluss der Zielpunktverteilung bei Zeigebewegungen.....	40
2.2.1.1	Spezielle Methodik.....	40
2.2.1.2	Ergebnisse.....	43
2.2.1.3	Diskussion.....	46
2.2.2	Erprobung eines elastischen Stabes als elastische Störung.....	51
2.2.2.1	Spezielle Methodik.....	52
2.2.2.2	Ergebnisse.....	55
2.2.2.3	Diskussion.....	58
2.3	Experimente zur Kognition.....	63
2.3.1	Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Folgebewegungen.....	63
2.3.1.1	Spezielle Methodik.....	64
2.3.1.2	Ergebnisse.....	66
2.3.1.3	Diskussion.....	69

2.3.2 Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Zeigebewegungen.....	72
2.3.2.1 Spezielle Methodik.....	72
2.3.2.2 Ergebnisse.....	75
2.3.2.3 Diskussion.....	78
2.4 Experimente zur Propriozeption.....	81
2.4.1 Auswirkung von Vibration auf die propriozeptive Rückmeldung.....	81
2.4.1.1 Methodik und Ergebnisse.....	81
2.4.1.2 Diskussion.....	86
2.4.2 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine visuelle Störung.....	87
2.4.2.1 Spezielle Methodik.....	87
2.4.2.2 Ergebnisse.....	88
2.4.2.3 Diskussion.....	90
2.4.3 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine mechanische Störung	93
2.4.3.1 Spezielle Methodik.....	93
2.4.3.2 Ergebnisse.....	94
2.4.3.3 Diskussion.....	97
3 Experimentübergreifende Diskussion.....	100
3.1 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick.....	100
3.2 Kritische Betrachtung der Methodik.....	106
3.3 Praktische Relevanz.....	107
4 Zusammenfassung.....	110
5 Literaturverzeichnis.....	112
6 Anhang.....	120

# 1 Einleitung

Die Aneignung kognitiver und motorischer Fähig- und Fertigkeiten spielt in der Entwicklung des Menschen eine zentrale Rolle. Nicht nur im Sport sondern auch in vielen anderen alltäglichen und beruflichen Situationen müssen neue Dinge und Bewegungen erlernt oder bereits bekannte verändert oder verbessert werden. So erfordern wechselnde Pistenqualitäten beim Skifahren ebenso eine ständige Anpassung wie das Laufen auf verschiedenen Untergründen oder die Benutzung eines Touch-Pads eines neuen Laptops anstatt der gewohnten Maus.

Für jeden von uns ist es demnach normal, Bewegungsabläufe neu zu erlernen oder anzupassen. Oft geschieht das nebenbei und unbewusst. Aber was geht dabei vor sich? Wie läuft dieses Lernen ab und wovon wird es beeinflusst? Hat das, was wir früher gelernt haben, einen Einfluss auf das Lernen neuer Dinge? Zu einigen dieser Fragen gibt es wissenschaftliche Untersuchungen, doch sowohl viele Mechanismen des Lernens als auch Einflussfaktoren auf das Lernen sind bis heute noch unklar. Mit den einzelnen Experimenten dieser Arbeit werden Grundlagen des motorischen Lernens untersucht, vor allem im Hinblick auf die Rolle der Kognition und der Propriozeption.

In dieser Einleitung werden zunächst alle für diese Arbeit wichtigen Aspekte erläutert und relevante bisherige Studien beschrieben und diskutiert. Im Anschluss daran wird die Intention dieser Arbeit definiert und die sich daraus ergebenden Fragestellungen vorgestellt.

## 1.1 Motorisches Lernen

Das motorische Lernen ist ein komplexeres Gebiet, als von vielen angenommen wird. Dieses macht die Aussage von Pöhlmann (1994, S.11) deutlich: „Es ist nicht richtig zu glauben, daß man über (motorisches) Lernen alles weiß, nur weil man in der frühen Kindheit gelehrt wurde, die Schuhe richtig zu schnüren und es trotz zunehmender Mühen auch jetzt noch selbst kann.“ Das motorische Lernen wird von vielen Autoren beschrieben und dabei auf unterschiedliche Art definiert. Gemeinsam ist den meisten

Definitionen die Nennung interner Prozesse, die auf Übung und Erfahrung beruhen und relativ dauerhaft sind (Meinel und Schnabel 1998; Schmidt und Lee 1999). Die Lernprozesse können dabei implizit und explizit ablaufen. Implizite Prozesse laufen ohne die Beteiligung des Bewusstseins ab, also ohne direkten Zugriff auf bereits vorhandene Gedächtnisinhalte. Als explizites Lernen wird dagegen die bewusste Auseinandersetzung mit den Lerninhalten bezeichnet. Beide Prozesse können isoliert, aber auch kombiniert vorkommen, wie in der Einteilung von Leonard (1998) deutlich wird, der zwischen vier verschiedenen Arten des motorischen Lernens unterscheidet. Zuerst nennt er die *Adaptation*, welche die Fähigkeit eines Individuums beschreibt, eine motorische Antwort als Reaktion auf veränderte sensorische Informationen in der Umwelt anzupassen. Dies kann entweder bewusst geschehen oder automatisch und unbewusst, wie es häufig der Fall ist, z. B. nach Verschreibung einer neuen Brille. Als zweites nennt Leonard die *konditioniert-assoziativen Antworten*. Diese Art des Lernens bezeichnet er als adaptiv und automatisch. Ein Beispiel dieser Lernart ist der Pavlow'sche Hund, der gelernt hat, das Klingeln einer Glocke mit der Fütterung zu verbinden. Nach einer Lernphase war er so konditioniert, dass bereits das Glockenklängen für seinen Speichelfluss ausreichte. Das *nicht-assoziative Lernen* beinhaltet Gewöhnung und Sensibilisierung auf wiederholte Reize. Hierbei wird die Unterdrückung einer Antwort auf einen Reiz als Gewöhnung bezeichnet, und die Verstärkung einer Antwort auf einen Reiz als Sensibilisierung, wobei letzteres häufig mit Schmerzen assoziiert wird. Das *Erlernen motorischer Fertigkeiten* nennt Leonard als vierte Form. Gemeint ist damit die Formierung neuer Bewegungssequenzen mit dem Ziel schneller, genauer und effizienter zu werden. Letzteres ist die komplexeste Art des motorischen Lernens und umfasst häufig auch einige der mit den anderen Lernarten verbundenen Mechanismen.

Im täglichen Leben ist es nicht immer leicht, diese verschiedenen Formen des motorischen Lernens exakt voneinander zu trennen. Handelt es sich beim Erlernen des In-line-Skatens z. B. um das Erlernen einer neuen Fertigkeit oder ist es „nur“ die Adaptation an die Rollen? In dieser Arbeit werden die Begriffe Adaptation und motorisches Lernen synonym benutzt.

Ein wichtiger und häufig diskutierter Faktor beim motorischen Lernen ist die Rückmeldung. Hierbei wird zwischen der exterozeptiven und der propriozeptiven Rück-

meldung unterschieden (Schmidt 1991). Erstere beinhaltet Informationen, die von außerhalb des Körpers kommen, wobei die wichtigste die visuelle Rückmeldung ist. Letztere beinhaltet die Sammlung aller sensorischer Informationen aus unserem Körper, wie z. B. die relative Position und Bewegung von Gelenken, die Spannung in Muskeln und die Orientierung im Raum. Körperbewegungen können im offenen Regelkreis (open-loop) oder im geschlossenen Regelkreis (closed-loop) erfolgen. Auf der einen Seite gibt es Bewegungen, die auf Grund der kurzen Zeitspanne, in der sie ablaufen, nicht während der Ausführung angepasst werden können. Diese werden als open-loop bezeichnet (Pew 1966; Schmidt 1976). Es findet also keine direkte Verbesserung mit Hilfe der Rückmeldung statt. Beispiele solcher ballistischer, nur den Bruchteil einer Sekunde dauernder, unkorrigierter Bewegungen sind fast alle Aktionen im Fecht sport, besonders aber Paraden, bei denen man den Ablauf nicht selbst plant, sondern nur auf Aktionen des Gegners reagiert. Für gut bekannte Situationen scheinen demnach motorische Programme zur Verfügung zu stehen, die dann ohne Einflussnahme ablaufen. Zu diesem Bereich gehören sowohl ballistische Bewegungen wie Zeigebewegungen als auch Bewegungen ohne visuelle Rückmeldung. Auf der anderen Seite gibt es die closed-loop Bewegungen, bei denen einmal erlernte Bewegungen eine Spur hinterlassen, die ständig mit dem Handlungsergebnis verglichen und verändert werden kann (Pew 1966; Adams 1971; Schmidt 1976). Besteht eine Diskrepanz zwischen dem Soll- und dem Istwert, wird die Spur solange modifiziert, bis sie übereinstimmen. Da dieses während der Bewegung geschieht, spielt die visuelle Rückmeldung eine entscheidende Rolle. Es handelt sich somit um einen geschlossenen Regelkreis wie er z. B. bei Folgebewegungen mit visueller Rückmeldung vorkommt. Bei der Erklärung von Bewegungshandlungen können diese beiden Theorien allerdings meistens nicht voneinander getrennt werden, sondern es sind gleichzeitig sowohl Anteile von Programmsteuerung (open-loop Modell) als auch von willkürlicher Steuerung (closed-loop Modell) vorhanden.

## **1.2 Mechanismen der sensomotorischen Adaptation**

Die Anpassung von Bewegungen an neue Situationen geschieht auf Grund der Rückmeldung, die z. B. visuell, auditiv oder propriozeptiv sein kann. Kommt es durch