

Nico Lehmann¹

(2. Preisträger Referate wissenschaftlicher Nachwuchs)

Bedeutung der individuellen Prädisposition für die Akquisition einer komplexen motorischen Fertigkeit: Skizzierung eines Forschungsvorhabens und Implikationen für die Untersuchung motorischer Lernprozesse

Summary

Current evidence indicates that the acquisition of new motor skills depends heavily on the predispositions and capabilities of the learner *before* learning actually starts. These predispositions should be quantified by appropriate methods before subjects enter the learning process. Recent studies demonstrate that neuroimaging data are promising parameters to predict future motor skill acquisition and learning. Motivated by such findings, I want to discuss the possibility of the complementary use of cross-sectional and longitudinal designs in motor learning research before the background of my research project. Methodological implications for future neuroscientific oriented studies on motor skill learning are discussed.

Zusammenfassung

Die Akquisition neuer motorischer Fertigkeiten hängt entscheidend von vorhandenen Prädispositionen des Lerners *vor* der Aufnahme des Lernprozesses ab. Diese Prädispositionen sind daher möglichst vor dem Beginn des Lernprozesses zu erfassen. Jüngst konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften

¹ Betreuer der Arbeit ist Herr Prof. Dr. Jürgen Krug, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Sportwissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig. Die Arbeit entstand am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften Leipzig (Direktor: Prof. Dr. Arno Villringer, Mentor: Dr. Marco Taubert).

der grauen und weißen Hirnsubstanz vor dem Beginn des Übungsprozesses prädiktive Validität in Bezug auf den zukünftigen Lernerfolg aufweisen. Vor diesem Hintergrund sollen die Konzeption und erste Verhaltensdaten des eigenen Forschungsvorhabens zum motorischen Lernen vorgestellt werden, in dem sich Querschnitt- und Längsschnittstudie gegenseitig ergänzen. Forschungsmethodische Implikationen für zukünftige neurowissenschaftlich orientierte Arbeiten zum motorischen Lernen werden diskutiert.

Schlagworte: Motorisches Lernen, Prädisposition, Neuroplastizität, Forschungsmethodik, Interventionsforschung

1. Ausgangssituation und Problemstellung

Das Erlernen neuer Fertigkeiten ist von grundlegender Bedeutung für die Alltags-, Arbeits- und Sportmotorik des Menschen (Meinel, 1960). Folgerichtig werden der Untersuchung von motorischen Lernprozessen und den Möglichkeiten ihrer Beeinflussung beträchtliche Forschungsanstrengungen gewidmet. Die Frage nach der Wirksamkeit bestimmter Interventionen auf den motorischen Lernprozess wird aus forschungsmethodischer Sicht in der Regel mit längsschnittlichen Designs untersucht. Das bedeutet, dass die abhängigen Variablen über mehrere Messzeitpunkte erfasst werden, zwischen denen das möglichst kontrollierte Wirken des experimentellen Faktors auf die abhängigen Variablen liegt.

Ein Beispiel hierfür ist das Dissertationsvorhaben des Autors, in dem die Wirkung einer zweiwöchigen Ausdauerintervention auf das nachfolgende Erlernen einer komplexen Ganzkörper-Balancieraufgabe auf dem Stabilometer untersucht wird, wobei im Verlaufe der Untersuchung in regelmäßigen Abständen MRT-Aufnahmen des Gehirns gemacht werden. Dabei gehen wir allgemein von der Hypothese aus, dass diese Art der Intervention den motorischen Lernprozess förderlich beeinflusst (Lehmann & Taubert, in press).

Wie in Folge zu zeigen sein wird, ergibt sich dabei aus forschungsmethodischer Sicht das Problem, dass die motorische Lernfähigkeit sehr stark von individuellen Prädispositionen abhängig ist, die das aktuelle Verhaltensrepertoire der Lernenden begrenzen (Kelso, 1995). Dies ist insbesondere für Interventionsstudien von Bedeutung, denn die gemessenen Verhaltensdaten können sowohl ein Produkt des (erwünschten) Wirkens des experimentellen Faktors als auch der vor dem Lernprozess vorhandenen individuellen Prädispositionen der Lerner sein.² In diesem Sinne ist zu fordern, dass interindividuelle Unter-

² Als problematisch ist deshalb anzusehen, dass die interindividuelle Varianz in den Verhaltensdaten zu Beginn des Lernprozesses meist als eine Quelle von Messfehlern behandelt wird und bestehende Leistungsunterschiede normalisiert werden, weshalb

schiede zu Beginn des Lernprozesses nicht ignoriert werden dürfen, sondern stattdessen über geeignete Parameter möglichst sorgfältig quantifiziert und untersucht werden müssen.

In vorliegendem Artikel wird daher die Position vertreten, dass der komplementäre Einsatz von Längsschnitt- und Querschnittstudien in der motorischen Lernforschung ein lohnenswerter Ansatz ist. Zunächst soll die bestehende empirische Evidenz für die Bedeutung von individuellen Prädispositionen für motorische Lernprozesse kurz zusammengefasst werden. Dabei werden strukturelle Parameter der grauen und weißen Hirnsubstanz als Parameter identifiziert, die potentiell eine prädiktive Validität in Bezug auf die motorische Lernleistung aufweisen. Anschließend werden die Konzeption sowie erste Verhaltensergebnisse einer eigenen Querschnittstudie vorgestellt, in der *a priori* erhobene hirnstrukturelle Parameter auf Zusammenhänge mit verschiedenen Indizes der Akquisition der Stabilometer-Aufgabe überprüft werden sollen. Ergebnisse und forschungsmethodische Implikationen werden abschließend diskutiert.

2. Individuelle Prädisposition und motorische Lernprozesse

In experimentalpsychologisch orientierten Arbeiten wurde das Problem interindividueller Differenzen beim Erlernen neuer Fertigkeiten bereits zum Beginn des letzten Jahrhunderts intensiv bearbeitet. Seither wurde in einer Vielzahl von Arbeiten wurde festgestellt, dass

- Individuen typischerweise unterschiedliche Leistungsniveaus einer zu lernenden Fertigkeit zu Beginn des Übungsprozesses aufweisen,
- die Leistungsverbesserung in definierter Zeiteinheit ("Lernrate") ebenfalls interindividuell variiert und dass
- die Leistungsverbesserung in negativer Relation zum Ausgangsniveau der Fertigkeit zu stehen scheint (Adams, 1987).

Der letzte Punkt wirft zudem die Frage auf, inwiefern eingangs bestehende interindividuelle Unterschiede im Fertigkeiteniveau im Laufe des Lernprozesses eher konvergieren oder ob sie stabil bleiben oder gar divergieren (Adams, 1987). Wir werden uns diesen Aspekten später anhand des eigenen Datensatzes widmen. Es stellt sich nun die Aufgabe, geeignete Parameter zu identifizieren, die eine Aussage über die inhärente Befähigung von Personen erlauben, eine bestimmte motorische Fertigkeit zu erlernen.

Die Arbeitsgruppe von Kelso versuchte dies erfolgreich, indem sie in Lernexperimenten motorische Aufgaben einsetzten, die eine mathematische Model-

individuelle Prädispositionen der Lerner und ihr Einfluss auf den Prozess der Akquisition der Fertigkeit zwangsläufig unberücksichtigt bleiben (Kelso, 1995; Kanai & Rees, 2011).

lierung und damit eine Analyse vor dem Übungsprozess vorhandener *Attraktorenlandschaften* erlauben (Kelso, 1995). Dieser Ansatz bleibt gegenwärtig jedoch weitgehend auf zyklische bzw. periodische Bewegungen oder bestenfalls einfache diskrete Bewegungen beschränkt (Sternad, 2008). Da eine Vielzahl von Fertigkeiten jedoch nicht-zyklischen Charakter aufweisen, müssen andere Wege beschritten werden, um die individuellen Prädispositionen zu erfassen.

Die Befähigung zum Erlernen einer neuen motorischen Fertigkeit kann theoretisch von zwei wesentlichen Faktoren sowie deren Interaktion beeinflusst werden: es sind dies (1) Genetik und Epigenetik sowie (2) Umwelteinflüsse, die einen positiven oder negativen Einfluss (Transfer) auf den aktuellen Lernprozess haben. Methoden der Genetik, wie z. B. die Zwillingsforschung (Williams & Gross, 1980; Fox, Hershberger & Bouchard, 1996; Missitzi et al., 2013) oder auch die Untersuchung bestimmter lernrelevanter Genpolymorphismen (McHughen et al., 2010), wurden in diesem Sinne bereits erfolgreich eingesetzt und indizieren eine zum Teil beträchtliche Heritabilität der Fertigungsakquisition. Auch Umwelteinflüsse wie vielseitiges Koordinationstraining (Hirtz & Wellnitz, 1985) oder jahrelanges Leistungsturnen (Pereira, Abreu & Castro-Caldas, 2013) beeinflussen die Qualität des Erlernens neuer Fertigkeiten, wobei bei diesen Studien eine Interaktion mit genetischen Faktoren nicht ausgeschlossen werden kann.

Tab.1. *Übersicht von Studien, die einen Zusammenhang zwischen Indizes der Akquisition motorischer Fertigkeiten und der Beschaffenheit der Mikrostruktur der weißen Hirnsubstanz (fraktionelle Anisotropie, FA) und/oder des Volumens der grauen Hirnsubstanz (GMV) vor dem Lernprozess zeigen.*

Studienautoren	untersuchte Fertigkeit	Korrelation mit...
Johansen-Berg et al., 2007	Bimanuelle Koordination	Corpus callosum (FA)
Della-Maggiore et al., 2009	Visuomotorische Adaptation	Pedunculus cerebellaris superior (FA)
Tomassini et al., 2011	Griffkraftdifferenzierung	Prämotorischer Cortex (FA), Cerebellum (GMV, FA)
Gryga et al., 2012	Pinch force task	Cerebellum (GMV)
Sampaio-Baptista et al., 2014	Jonglieren (3-Ball-Kaskade)	Visueller und parietaler Cortex (jeweils rechts) (GMV)

Ein Parameter, in dessen Ausprägung sich sowohl genetische Einflüsse als auch die Wirkung vergangener Umwelteinflüsse (Plastizität) widerspiegeln, ist die Hirnstruktur, die mittels Magnetresonanztomographie (MRT) erfasst wer-

den kann (Kanai & Rees, 2011). In diesem Sinne vertreten Lövdén et al. (2010) die Position, dass die gegebene Hirnstruktur vor dem Lernprozess den gegenwärtig möglichen Bereich der funktionellen Reorganisationsfähigkeit als Anpassung an einen neuen Umweltreiz beeinflusst. Die MRT erlaubt eine Objektivierung der Eigenschaften der Mikrostruktur der weißen (z. B. die fraktionale Anisotropie, ein Maß der Integrität der Nervenfaservertrakte) und grauen Hirnsubstanz (z. B. das Volumen der grauen Substanz an bestimmten Orten [Voxeln] im Gehirn) und deren Korrelation mit unabhängigen Verhaltensdaten. In der Tat konnten diese strukturellen Parameter in bisherigen Studien mehrfach erfolgreich für eine Prädiktion der zukünftigen Fertigungsakquisition genutzt werden (Tab. 1).

3. Methodik der Querschnittstudie

Im vorherigen Abschnitt wurde Evidenz dafür zusammengetragen, dass individuelle Prädispositionen den motorischen Lernerfolg zumindest in frühen Lernphasen maßgeblich beeinflussen. Zudem wurde die MRT als geeignete Methode identifiziert, mit deren Hilfe diese Prädispositionen potentiell erfasst werden können.

Um in unserem konkreten Falle zu gewährleisten, dass sich Querschnitt- und Längsschnittstudie gegenseitig ergänzen, ist es notwendig a) in beiden vergleichbare MRT-Parameter zu nutzen und b) dieselbe motorische Lernaufgabe zu untersuchen. Zunächst wurden Verhaltensdaten verschiedener Studien des Max-Planck-Instituts (MPI) zusammengetragen, in denen die Stabilometer-Aufgabe zum Einsatz kam (zur Lernaufgabe s. Taubert et al., 2010). Voraussetzung für die Inkludierung war ein vollständiger und vergleichbarer Datensatz einer Trainingseinheit³ und Rechtshändigkeit. Im nächsten Schritt wurde aus der MRT-Datenbank des MPI nach T1-gewichteten MPRAGE-Scans recherchiert, die in einem Zeitraum ≤ 2 Jahre vor der Stabilometer-Trainingseinheit am selben Gerät gemessen wurden. In die retrospektive Querschnittstudie konnten insgesamt 75 junge Erwachsene im Alter zwischen 20 und 35 Jahren eingeschlossen werden (34 ♀, 41 ♂; Alter $25,77 \pm 3,32$ y; Körperhöhe $1,74 \pm 0,08$ m; Körpergewicht $68,80 \pm 11,49$ kg). In den laufenden statistischen Analysen kann somit das Volumen der grauen Substanz mit Indizes der Akquisition der Stabilometer-Aufgabe korreliert werden⁴. Im nächsten Abschnitt

³ Das bedeutet, dass das Lernkriterium (Zeit in der Mittelposition, die durch eine Schwankungsamplitude von 3° nach beiden Seiten definiert ist), das Belastungsgefüge der Trainingseinheit (15 Versuche à 30 s Durchgangsdauer), das Feedback (knowledge of results nach jedem Versuch) und die Aufmerksamkeitsfokussierung (external) für alle VPn identisch war.

⁴ Zudem liegen von 59 der inkludierten Probanden Datensätze der Diffusionsgewichteten Bildgebung vor, womit zudem eine Korrelation der Verhaltensdaten mit der Mikrostruktur der weißen Substanz möglich wird.

sollen diese Indizes vorgestellt sowie erste Verhaltensergebnisse berichtet werden.

4. Erste Verhaltensergebnisse

Die Charakterisierung interindividueller Differenzen wird in Anlehnung an Adams (1987) und Fox et al. (1996) nachfolgend anhand verschiedener Indizes untersucht⁵.

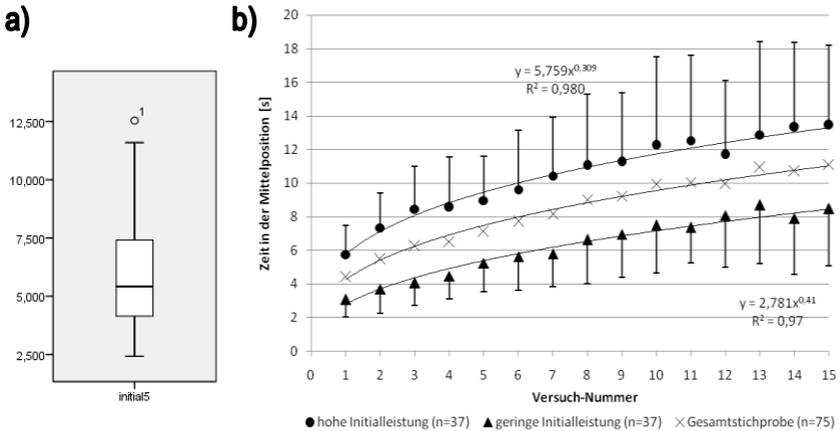


Abb. 1: a) Linksschiefe Verteilung der Initialleistung (gemittelte Zeit in der Mittelposition) der ersten 5 Versuche für die Gesamtstichprobe (n=75). b) Basierend auf dieser Initialleistung wurden mittels Median-Split zwei Gruppen zu jeweils 37 VPn gebildet. Entgegen der Vorannahmen (Adams, 1987) konvergieren eingangs vorhandene Leistungsunterschiede nicht. Darstellung der Punkte als Mittelwert mit Standardabweichung.

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, ob das relative Leistungsniveau der Probanden innerhalb der Trainingseinheit konstant bleibt. Eine Rangkorrelation von Initialleistung und Finalleistung indiziert, dass die Probanden ihr relatives Standing während der Trainingseinheit behalten ($r_{\text{Spearman}} = .76$, $p < .001$). Dieser Zusammenhang bleibt auch bei einer Korrektur für Körperhöhe bestehen (bivariate Korrelation: $r = .71$, $p < .001$). Des Weiteren soll geklärt werden, wie Gruppen mit unterschiedlicher Initialleistung vom Training profitieren, d. h. ob eingangs des Lernprozesses vorhandene Leistungsunterschiede

⁵ Initialleistung = Mittelwert (MW) der ersten 5 Versuche einer VP; Finalleistung = MW der letzten 5 Versuche einer VP; Bestwert = bester Versuch der VP in der Übungseinheit; Leistungsverbesserung (nach Adams, 1987) = Initialleistung subtrahiert von Finalleistung.

dazu tendieren, aufrecht erhalten zu werden oder nicht. Eine Einschätzung hierüber kann nach Adams (1987) über eine Korrelation der Parameter Initialleistung und Leistungsverbesserung erfolgen. Hierbei zeigt sich, dass beide Parameter schwach positiv korrelieren ($r_{\text{Spearman}} = .27, p = .02$; Partialkorrelation korr. für Körperhöhe: $r = .24, p = .04$). Unterschiede in der Initialleistung neigen im Laufe der Trainingseinheit also nicht zur Konvergenz. Diese Beobachtung wird gestützt, wenn man die Gesamtstichprobe artifiziell durch einen Median-Split der Initialleistung teilt und die Leistungsverläufe der Gruppen während der Übungseinheit betrachtet (Abb. 1). Die sich ergebenden Gruppen unterscheiden sich zudem nicht nur signifikant im Initialniveau ($t_{(51,33)} = 10,83, p < .001$), sondern auch hinsichtlich des Finalniveaus ($t_{(58,57)} = 5,50, p < .001$) und der Bestleistung innerhalb der Trainingseinheit ($t_{(60,82)} = 5,51, p < .001$) zugunsten der Gruppe mit hoher Initialleistung. Trotz des bereits berichteten Zusammenhangs zwischen Initialleistung und Leistungsverbesserung konnte kein signifikanter Unterschied beider Gruppen für den Parameter Leistungsverbesserung gefunden werden ($t_{(63,09)} = 1,43, p = .16$).

5. Diskussion und Schlussbetrachtung

Das Verhaltensrepertoire des Menschen, z. B. in Form der unmittelbaren Reorganisationsfähigkeit des Gehirns beim Erlernen neuer Fertigkeiten, wird wesentlich durch dessen inhärente Eigenschaften (Prädispositionen) zu Beginn des Übungsprozesses bestimmt (Kelso, 1995; Lövdén et al., 2010). Im vorigen Abschnitt wurden Verhaltensergebnisse der Akquisition einer komplexen Fertigkeit präsentiert, die diese Annahme stützen. Hier sind v. a. die hohe Korrelation von Initial- und Finalleistung und die schwache, aber positive Korrelation zwischen Initialleistung und Leistungsverbesserung zu nennen. Durch Median-Split-Analysen konnte des Weiteren gezeigt werden, dass eine hohe Initialleistung der Fertigkeit in drei der vier untersuchten Indizes ebenfalls bessere Leistungen nach sich zieht. Überraschenderweise indizieren diese Ergebnisse nicht die zu erwartende Konvergenz der Leistungsverläufe von Probanden mit schlechter und guter Initialleistung mit zunehmender Übungsdauer (Adams, 1987).

Während diese Resultate die Annahme einer wichtigen Rolle individueller Prädispositionen in frühen motorischen Lernphasen stützen, sollte die nicht beobachtete Konvergenz aus mehreren Gründen nicht einer generellen *Leistungsgrenze* gleichgesetzt werden. Erstens ist zu betonen, dass hier nur eine Übungseinheit einer komplexen Fertigkeit betrachtet wurde, zukünftige Leistungssteigerungen also wahrscheinlich sind. Die Untersuchungen, auf die Adams (1987) in seinem Review rekurriert um eine Abnahme interindividueller Differenzen im Übungsverlauf zu attestieren, nutzen indes recht einfache Fertigkeiten, bei denen schon früh ein Leistungsplateau (Deckeneffekt) erreicht

wird, weshalb diese Arbeiten eher einem testing-the-limits-Ansatz gerecht werden. Unter der Prämisse eines generell negativ akzelerierten Lernverlaufs von motorischen Fertigkeiten (Newell & Rosenbloom, 1981) ist eine spätere Konvergenz der Leistungsverläufe auch bei unserer betrachteten Fertigkeit möglich. Zweitens ist festzuhalten, dass die individuellen Prädispositionen selbst nicht statisch sind, sondern sich aus einer Interaktion von genetischen und Umwelteinflüssen ergeben. Damit ist die *motorische Lernfähigkeit* selbst plastisch und durch geeignete Interventionen beeinflussbar.

Die Tatsache, dass sich sowohl genetische als auch Umwelteinflüsse eines Individuums in dessen Hirnstruktur manifestieren (Kanai & Rees, 2011), qualifiziert diesen Parameter für eine Erfassung individueller Prädispositionen. Die Prädiktion interindividueller Verhaltensunterschiede mittels hirnstruktueller Parameter ist folgerichtig ein florierendes Forschungsthema in den Neurowissenschaften (Kanai & Rees, 2011; Zatorre, 2013). Im Bereich des motorischen Lernens wurden hierzu bereits mehrere Studien vorgelegt (Tab. 1). Jüngst wurde z. B. ein Zusammenhang der Beschaffenheit der grauen Hirnsubstanz mit der Lernrate einer vergleichsweise komplexen Fertigkeit wie dem Jonglieren gezeigt (Sampaio-Baptista et al., 2014).

In diesem Sinne werden im nächsten Schritt der hier vorgestellten Querschnittsstudie mögliche Zusammenhänge zwischen den Indizes der Fertigkeitsakquisition und strukturellen Parametern der grauen und weißen Hirnsubstanz untersucht. Eine Identifikation struktureller Korrelate der Fertigkeitsakquisition kann damit potentiell einen Beitrag zur Identifikation wesentlicher neuraler Leistungsvoraussetzungen der untersuchten Fertigkeit leisten. Dies ist gleichsam von großer Bedeutung für unsere Interventionsstudie (s. Abschn. 1), da interindividuelle Differenzen in diesen Leistungsvoraussetzungen als Störfaktoren im experimentellen System aufzufassen sind. Mögliche Unterschiede in der Prädisposition können über die Analyse der Hirnstruktur quantifiziert und auf initiale Unterschiede in den Stichproben hin geprüft werden. Gegebenenfalls kann in späteren statistischen Modellen, in denen die Wirksamkeit der Intervention überprüft wird, der Einfluss dieses wichtigen Störfaktors kontrolliert werden. Für neurowissenschaftlich orientierte Forschungsvorhaben, in denen die Wirkung bestimmter Interventionen auf den motorischen Lernprozess untersucht werden soll, birgt der komplementäre Einsatz von Querschnitt- und Längsschnittstudie damit große Chancen und kann u. E. die forschungsmethodische Qualität erhöhen.

Literatur

- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, *101*, 41–74.
- Della-Maggiore, V., Scholz, J., Johansen-Berg, H. & Paus, T. (2009). The rate of visuomotor adaptation correlates with cerebellar white-matter microstructure. *Human Brain Mapping*, *30*, 4048–4053.
- Fox, P. W., Hershberger, S. L. & Bouchard, T. J. (1996). Genetic and environmental contributions to the acquisition of a motor skill. *Nature*, *384*, 356–358.
- Gryga, M., Taubert, M., Dukart, J., Vollmann, H., Conde, V., Sehm, B., Villringer, A. & Ragert, P. (2012). Bidirectional gray matter changes after complex motor skill learning. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *6*, Article 37.
- Hirtz, P. & Wellnitz, I. (1985). Hohes Niveau koordinativer Fähigkeiten führt zu besseren Ergebnissen im motorischen Lernen. *Körpererziehung*, *35*, 151–154.
- Johansen-Berg, H., Della-Maggiore, V., Behrens, T. E. J., Smith, S. M. & Paus, T. (2007). Integrity of white matter in the corpus callosum correlates with bimanual co-ordination skills. *NeuroImage*, *36 Suppl 2*, T16-21.
- Kanai, R. & Rees, G. (2011). The structural basis of inter-individual differences in human behaviour and cognition. *Nature Reviews. Neuroscience*, *12*, 231–242.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns. The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Lehmann, N. & Taubert, M. (in press). Exercise-induced improvements in motor learning. In: H. Budde & M. Wegner (Eds.), *Exercise and Mental Health: Neurobiological Mechanisms*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lövdén, M., Bäckman, L., Lindenberger, U., Schaefer, S. & Schmiedek, F. (2010). A theoretical framework for the study of adult cognitive plasticity. *Psychological Bulletin*, *136*, 659–676.
- McHughen, S. A., Rodriguez, P. F., Kleim, J. A., Kleim, E. D., Marchal Crespo, L., Procaccio, V. & Cramer, S. C. (2010). BDNF val66met polymorphism influences motor system function in the human brain. *Cerebral Cortex*, *20*, 1254–1262.
- Meinel, K. (1960). *Bewegungslehre. Versuch einer Theorie der sportlichen Bewegung unter pädagogischem Aspekt*. Berlin: Volk und Wissen.
- Missitzi, J., Gentner, R., Misitzi, A., Geladas, N., Politis, P., Klissouras, V. & Classen, J. (2013). Heritability of motor control and motor learning. *Physiological Reports*, *1*, e00188.

Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In: J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (pp. 1-55). Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates.

Pereira, T., Abreu, A. M. & Castro-Caldas, A. (2013). Understanding task- and expertise specific motor acquisition and motor memory formation and consolidation. *Perceptual and Motor Skills*, 117, 108–129.

Sampaio-Baptista, C., Scholz, J., Jenkinson, M., Thomas, A. G., Filippini, N., Smit, G., Douaud, G. & Johansen-Berg, H. (2014). Gray matter volume is associated with rate of subsequent skill learning after a long term training intervention. *NeuroImage*, 96, 158–166.

Sternad, D. (2008). Towards a Unified Theory of Rhythmic and Discrete Movements — Behavioral, Modeling and Imaging Results. In: A. Fuchs & V. K. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics* (pp. 105–133). Berlin, Heidelberg: Springer.

Taubert, M., Draganski, B., Anwander, A., Müller, K., Horstmann, A., Villringer, A. & Ragert, P. (2010). Dynamic properties of human brain structure: learning-related changes in cortical areas and associated fiber connections. *The Journal of Neuroscience*, 30, 11670–11677.

Tomassini, V., Jbabdi, S., Kincses, Z. T., Bosnell, R., Douaud, G., Pozzilli, C., Matthews, P. M. & Johansen-Berg, H. (2011). Structural and functional bases for individual differences in motor learning. *Human Brain Mapping*, 32, 494–508.

Williams, L. R. & Gross, J. B. (1980). Heritability of motor skill. *Acta Geneticae Medicae et Gemellologiae*, 29, 127–136.

Zatorre, R. J. (2013). Predispositions and plasticity in music and speech learning: neural correlates and implications. *Science*, 342, 585–589.

Verfasser

Lehmann, Nico, Abteilung für Neurologie, Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig