

## **Nico Lehmann**

(Meinel-Preis, 1. Preisträger Referate Studierende)

# **Auswirkung einer intensiven Ausdauerbelastung auf die Konsolidierung motorischer Gedächtnisinhalte: Ergebnisse einer Pilotstudie<sup>1</sup>**

## **Summary**

This study investigates the effectiveness of acute, high intensive endurance exercises on motor skill learning. It is well established that motor memory traces are in a labile state immediately after encoding and retrieval. Furthermore, acute, high intensive bouts of exercise promote neuroplasticity and cognitive function in humans. The central idea of the study is to harness exercise-induced neuroplasticity to improve the (re-)stabilization of motor memory traces. In this randomized, controlled study, subjects were instructed to perform a whole body balancing task on the stabilometer for a period of two consecutive weeks. The initial results suggest beneficial effects of acute, high intensive bouts of exercise on motor skill learning.

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob intensive Ausdauerbelastungen, durchgeführt unmittelbar nach Beendigung eines motorischen Lerntrainings, die Gedächtniskonsolidierung der geübten Fertigkeit optimieren können. Dabei werden die Grundannahmen vertreten, dass sich motorische

---

<sup>1</sup> Betreuer der Arbeit sind Herr Dr. Bernd Hoffmann, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Sportwissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig und Herr Dr. Marco Taubert, Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig.

Gedächtnisspuren unmittelbar nach ihrer Aneignung oder ihrem Wiederabruf in einem labilen Zustand befinden und dass sich durch akute, hochintensive Ausdauerbelastungen die neuroplastischen Potenzen des Organismus steigern lassen und sie die (Re-)Stabilisierung von motorischen Gedächtnisspuren fördernd beeinflussen können. Diese Annahmen wurden in einem längsschnittlichen Lernexperiment über zwei Wochen auf dem Stabilometer überprüft. Die ersten Ergebnisse zeigen positive Effekte von akuten, hochintensiven Ausdauerbelastungen auf das motorische Lernen.

**Schlagworte:** Motorisches Lernen, Neuroplastizität, Konsolidierung, Interferenz, Retention

## 1. Problemanriss

Prof. Dr. Kurt Meinel (1898-1973), Begründer der pädagogischen Bewegungslehre, hob bereits vor über 50 Jahren die Bedeutung der interdisziplinären Arbeit in der Sportwissenschaft hervor. So wurde in der ersten Auflage des Lehrbuches *Bewegungslehre* formuliert, dass „Pädagogisches Handeln [...] zu allen Zeiten auf eine Synthese der Erkenntnisse aus sehr unterschiedlichen Einzelwissenschaften angewiesen“ war (Meinel, 1960, S. 13).

Einen solchen Versuch des inter- oder zumindest multidisziplinären Arbeitens unternimmt auch der vorliegende Beitrag, dessen Thema die Konsolidierung motorischer Fertigkeiten im Gedächtnis ist. Konsolidierung beschreibt im Wesentlichen den Prozess, bei dem Gedächtnisspuren von einem gegenüber Störeinflüssen (Interferenzen) anfälligen, labilen Zustand in einen persistierenden, stabilen Zustand überführt werden (McGaugh, 2000; Schnabel, Krug & Panzer, 2007). Dies impliziert aber auch, dass pro- oder retroaktive Interferenzen, die absichtlich oder unabsichtlich in den ersten Stunden nach dem Erwerb einer motorischen Gedächtnisspur appliziert werden, den Prozess der motorischen Gedächtniskonsolidierung beeinträchtigen können (Robertson, Pascual-Leone & Miall, 2004; Krakauer & Shadmehr, 2006; Robertson, 2012; Abb. 1).

Während in der bestehenden Literatur zum motorischen Lernen die Optimierung der Gestaltung des aktiven Übungsprozesses per se im Vordergrund stand (Schmidt & Wrisberg, 2008; Schnabel et al., 2007), wurde die Effektivierung der Konsolidierungsphase weitgehend vernachlässigt. Das lässt sich allein an der Tatsache erkennen, dass bis dato nur ein einziger sportwissenschaftlicher Handbuchartikel existiert, der sich dieser Thematik annimmt (Trempe & Proteau, 2012). Die gegenwärtige Situation ist in zweierlei Hinsicht als unbefriedigend zu charakterisieren:

1. Die Aneignungsleistung (*performance*) liefert keine Aussagen zum – *per definitionem* des Begriffs ‚motorisches Lernen‘ entscheidenden (Hossner &

Künzell, 2003) – zeitlich überdauernden Behalten einer motorischen Fertigkeit (*learning*). Dies verdeutlichen Studien zur Feedbackvergabe/ Guidance im Lernprozess oder auch zum Kontextinterferenz-Paradigma, in denen häufig ein *reversal effect* zu beobachten ist (Vickers, 1994).<sup>2</sup> Gut zu üben allein reicht also nicht aus, um auch viel zu lernen! Konsequenterweise wird in der forschungsmethodischen Literatur gefordert, motorisches Lernen im Sinne einer *learning-performance-distinction* nur über Transfer- und Retentionstests zu erfassen (Schmidt & Lee, 2011). Diese Tests sollten zudem in einem solchen zeitlichen Abstand zur Akquisition der Fertigkeit durchgeführt werden, dass die Konsolidierung des Gelernten gewährleistet ist (Kantak & Winstein, 2012).

2. Den eben genannten verhaltenswissenschaftlich orientierten Befunden können auch aktuelle neurowissenschaftliche Forschungsergebnisse zur Seite gestellt werden. Es steht außer Frage, dass sich die entscheidenden neurobiologischen Prozesse, die die zeitlich überdauernde Repräsentation des Gelernten gewährleisten, nicht *während*, sondern *nach* der aktiven Übungstätigkeit vollziehen (McGaugh, 2000; Trempe & Proteau, 2012). Es wurde bereits darauf verwiesen, dass das gewollte oder ungewollte Auftreten von Interferenzen in einem Zeitfenster bis mindestens 6 h nach Beendigung der Übungstätigkeit (Konsolidierungsphase) zu erheblichen Einbußen in der Retentionsleistung führen kann (Brashers-Krug, Shadmehr & Bizzi, 1996; Muellbacher, Ziemann, Wissel et al., 2002; Abb. 1).

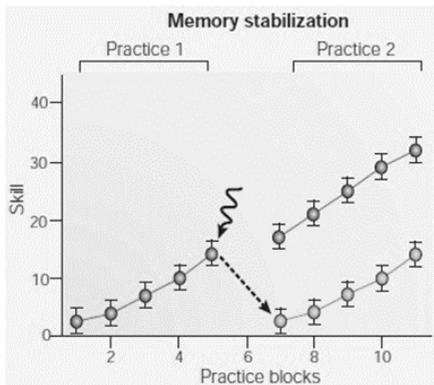


Abb. 1. In Experimenten zur *memory stabilization* werden nach Beendigung der Fertigungsakquisition gezielt Störeinflüsse (Interferenzen), symbolisiert durch den Blitz, appliziert. Die Stabilisierung des Gelernten wird dadurch beeinträchtigt. Hingegen erlaubt eine ruhende Gestaltung der ersten Stunden nach der Übungseinheit die Konsolidierung des Gelernten (Abb. aus Robertson et al., 2004, p. 577)

<sup>2</sup> Darunter ist zu verstehen, dass sich die besseren Aneignungsleistungen der unter hochstrukturierten Bedingungen übenden Gruppen in später durchgeführten Retentionstests ‚umkehren‘. Hier wiesen, trotz geringerer Aneignungsleistung, zumeist die weniger strukturiert übenden Gruppen Vorteile auf (Überblick bei Schmidt & Lee, 2011).

Vor dem Hintergrund der hohen Bedeutung des technisch-kordinativen Leistungsfaktors (Schnabel, 2011) ist ein erhebliches Erkenntnisdefizit hinsichtlich der motorischen Gedächtniskonsolidierung und potentiellen Effektivierungsstrategien zu konstatieren.

Der vorliegende Beitrag ist so aufgebaut, dass zunächst einige essentielle theoretische Grundlagen referiert und problematisiert werden sollen, um anschließend die Ableitung der Arbeitshypothese vornehmen zu können (Punkt 2). Zur Prüfung der Arbeitshypothese wurde ein Lernexperiment konzipiert und durchgeführt, dessen methodische Gestaltung in Punkt 3 näher gekennzeichnet wird. Die Ergebnisse dieser Pilotstudie sowie ihre Diskussion werden den Artikel abschließen (Punkte 4 und 5).

## **2. Theoretische Positionen und Ableitung der Arbeitshypothese**

Motorisches Lernen bedingt zielgerichtete Veränderungen in der motorischen Kontrolle, die über lange Zeiträume durch die Mechanismen der *Neuroplastizität* im zentralen Nervensystem festgeschrieben werden müssen (Müller & Blichke, 2009). Zeitlich überdauernde Veränderungen in der motorischen Kontrolle sollten sich deshalb aus Veränderungen in der Konnektivität neuronaler Netze heraus erklären lassen (Ebd.). Somit wird auch den nachfolgenden Ausführungen die Annahme zugrunde gelegt, dass der Grundmechanismus des motorischen Lernens in biochemischen Veränderungen an den synaptischen Membranen liegt (Mayford, Siegelbaum & Kandel, 2012). Zielgerichtete motorische Aktivität stellt somit einen Stimulus für funktionelle Veränderungen in der Übertragungsstärke der Synapsen dar. Adaptationserscheinungen an motorische Übungsprozesse zeigen sich dabei nicht nur auf synaptischer Ebene. Motorisches Lernen zeitigt gleichsam funktionelle und strukturelle Änderungen des Gehirns (Dayan & Cohen, 2011). Dies ließ sich insbesondere durch die Untersuchung motorischer Lernprozesse bei Gleichgewichtsaufgaben demonstrieren (Taubert, 2012; Überblick bei Taube & Gollhofer, 2012).

Übereinstimmend besagen eher psychologische und eher neurowissenschaftliche Theorien zum motorischen Lernen, dass sich eine Gedächtnisspur unmittelbar nach ihrem Erwerb oder nach ihrem Wiederabruf (*retrieval*) in einem labilen, gegenüber Interferenzen anfälligen Zustand befindet (Trempe & Proteau, 2012; Müller & Blichke, 2009). Durch Prozesse der motorischen Gedächtniskonsolidierung kommt es im Zeitverlauf zu einer langfristigen Festigung der durch ein motorisches Lerntraining gebildeten synaptischen Verbindungen zwischen den verschiedenen dissipativen Neuronenensembles des Gehirns und zu einer Abnahme der Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen. Aus neurobiologischer Perspektive wird dieser Prozess mit den Mechanismen der Langzeitpotenzierung (LTP) und Langzeitdepression (LTD) erklärt (Dayan &

Cohen, 2011). Die neurobiologische Analogie des motorischen Kurzzeitgedächtnisses wird in der frühen Langzeitpotenzierung (E-LTP) vermutet (Mayford et al., 2012). Müllbacher (2011) vertritt darüber hinaus die Position, dass der primäre Motorkortex für die frühe motorische Gedächtniskonsolidierung eine Schlüsselrolle innehat und somit das Phänomen *motorisches Kurzzeitgedächtnis* repräsentieren könnte.

Unter der Prämisse, dass durch aktive motorische Übungstätigkeit ein labiler, gegenüber Interferenzen anfälliger Gedächtnisinhalt ausgebildet wird, stellt sich die Frage, wie es durch eine entsprechende Gestaltung des Zeitraums nach Beendigung der aktiven Übungstätigkeit gelingen kann, diesen bestmöglich in das motorische bzw. prozedurale Langzeitgedächtnis zu *überführen*.

Eine Möglichkeit der adäquaten Gestaltung dieses wichtigen Zeitfensters ist es, potentiell interferierende Einflüsse zu meiden oder mithin zu ruhen (Müller & Blichke, 2009). Allerdings ist auch bekannt, dass akute und chronische Ausdauerbelastungen die neuroplastischen Potenzen des zentralen Nervensystems steigern können (Roig, Nordbrandt, Geertsen & Nielsen, 2013). Nachfolgend sollen mögliche akute (metabole) Effekte von intensiven Ausdauerbelastungen auf die motorische Gedächtniskonsolidierung diskutiert werden.

So kann der Aktivitätszustand der Großhirnrinde über Afferenzen aus der Körperperipherie, wie z. B. kardioafferente Informationen oder Ia-Afferenzen der Muskelspindeln, gesteigert werden. Die aktivierende Wirkung afferenter Informationen sollte sich allerdings eher auf die Aufmerksamkeitskapazität als auf die Gedächtniskonsolidierung auswirken (Weineck, 2010). Unter den Bedingungen von Ausdauerbelastungen ist zudem eine verstärkte Durchblutung des Gehirns feststellbar, die sich auf einen erhöhten Energiebedarf desselben zurückführen lässt (Hollmann & Strüder, 2009). Durch die Vasodilatation ist eine erhöhte Sauerstoff- und Substratversorgung des Gehirns gewährleistet (Ogoh & Ainslie, 2009).

Die Verfügbarkeit von Energieträgern und Wachstumsfaktoren wie *brain-derived neurotrophic factor* (BDNF) ist auch für die langfristige Speicherung von Gedächtnisspuren im Gehirn unabdingbar (Hollmann & Strüder, 2009). Deshalb ist für das Thema dieser Untersuchung der Zusammenhang zwischen dem Metabolismus des Gehirns unter den Bedingungen intensiver Ausdauerbelastungen, der Freisetzung von BDNF und biochemischen Gedächtniskonsolidierungsprozessen von besonderer Relevanz.

Unter den Bedingungen hoher körperlicher Belastung kann das ursprünglich im Skelettmuskel gebildete Laktat vermehrt durch das Gehirn aufgenommen werden und zur Deckung des erhöhten Energiebedarfs beitragen (Dalsgaard, Quistorff, Danielsen et al., 2004; Quistorff, Secher & van Lieshout, 2008). Laktat kann die Blut-Hirn-Schranke in beiden Richtungen durch den Mechanismus des *Astrozyten-Neuronen-Laktat-Shuttles* passieren (Rojas Vega, Hollmann & Strüder, 2012; Newington, Harris & Cumming, 2013). Bedeutend ist in

diesem Zusammenhang, dass ein ‚pseudohormoneller‘ Effekt von Laktat auf die BDNF-Expression im Gehirn angenommen wird (Schiffer, Schulte, Sperlich et al. 2011; Rojas Vega, Strüder, Vera Wahrmann et al., 2006).<sup>3</sup> So gelang in aktuellen Untersuchungen der Nachweis, dass es einen Zusammenhang zwischen hohen Laktatspiegeln und dem Release von BDNF im Gehirn gibt (Schiffer et al., 2011; Rojas Vega, Hollmann, Vera Wahrmann & Strüder, 2012). Dieser vermutete Zusammenhang wird durch Originalia (Rojas Vega et al., 2006; Ferris, Williams & Shen, 2007) und Reviews (Knaepen, Goekint, Heyman & Meeusen, 2010; Huang, Larsen, Ried-Larsen et al., 2013) erhärtet, die zeigen, dass die höchsten peripheren BDNF-Level unter den Bedingungen körperlicher Belastung in Relation zu einer hohen Belastungsintensität – und damit auch hohen peripheren Laktatspiegeln – stehen.

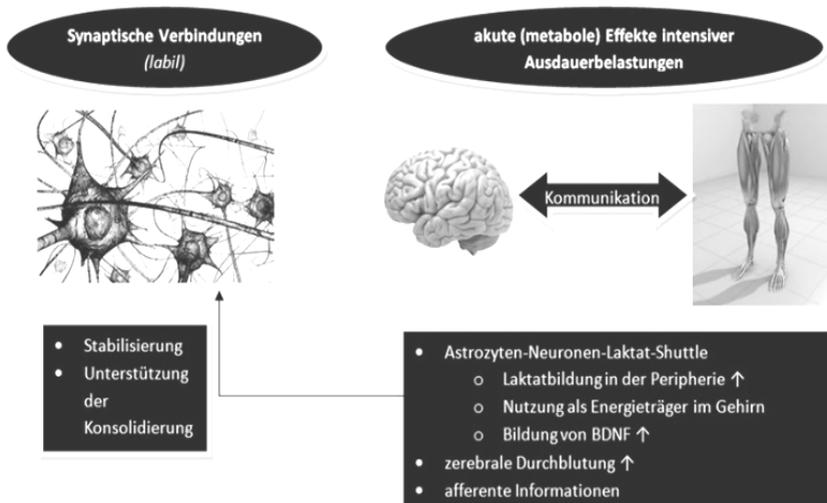
BDNF wiederum ist ein Nervenwachstumsfaktor aus der Familie der Neurotrophine, der mit synaptischer Plastizität, Lernen und sogar der Neubildung von Nervenzellen (Neurogenese) assoziiert wird (Huang et al., 2013; Bekinschtein, Cammarota & Medina, 2014). BDNF ist an nahezu jedem Schritt der Gedächtnisformierung involviert (Gómez-Pinilla & Feng, 2012), was insbesondere auch für die bereits geschilderten Mechanismen der LTP und LTD gilt (Woo & Lu, 2009). Des Weiteren ist bekannt, dass eine Blockade der physiologischen BDNF-Funktion die Gedächtnisverarbeitung schwer beeinträchtigen und damit übungsinduzierte Lerneffekte beseitigen kann. Dies gilt auch für die prozedurale bzw. motorische Gedächtniskonsolidierung im primären Motorkortex (Bekinschtein et al., 2014; Robertson, 2012). In tierexperimentellen Untersuchungen wurde außerdem beobachtet, dass sich eine exogene Neurotrophin-Supplementierung positiv auf die kognitiven Funktionen der Tiere auswirkte (Haas & Schmidtbleicher, 2008). Daher kann auch für den Menschen vermutet werden, dass durch eine vermehrte Verfügbarkeit von BDNF motorische Lernleistungen gesteigert werden können.

Gegenwärtig liegt nur eine experimentelle Studie vor, die sich mit den Effekten akuter, hochintensiver Ausdauer-Nachbelastungen auf das motorische Langzeitgedächtnis befasste (Roig, Skriver, Lundbye-Jensen et al., 2012). Im Hauptexperiment ging es darum, den Effekt von drei verschiedenen Belastungsprotokollen (Vorbelastung, Nachbelastung, Kontrollbedingung) auf die Lernleistung einer visuomotorischen Tracking-Aufgabe zu erfassen. Die Messung der Lernleistung erfolgte mit zwei Retentionstests, die im zeitlichen Abstand von 24 h und 7 d zur Akquisition der Fertigkeit lagen. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden intensiv belasteten Versuchsgruppen (Laktatwerte >10 mmol/l) eine bessere motorische Lernleistung aufwiesen als die unbelastete Versuchsgruppe. Darüber hinaus war festzustellen, dass die nachbelastete Versuchsgruppe besser abschnitt als die vorbelastete Versuchsgruppe.

---

<sup>3</sup> Im Sinne dieser Annahme zeigen auch die Resultate einer Studie von Coco, Caggia, Musumeci et al., 2013, dass Laktat die BDNF-Transkription in Gang setzt.

Bernstein (1988, S. 181) begriff das Problem der Bewegungskoordination als die „Überwindung der überflüssigen Freiheitsgrade des sich bewegenden Organs, mit anderen Worten, seine Umwandlung in ein steuerbares System“. Es ist einleuchtend, dass die Kriteriums-aufgabe mit einem Freiheitsgrad aus der Untersuchung von Roig et al. (2012) nicht den koordinativen Anforderungen einer viele Gelenke einschließenden Ganzkörperbewegung entspricht. Damit ist auch die Generalisierbarkeit der Befunde von Roig et al. (2012) auf komplexe sportmotorische Fertigkeiten nicht zwangsläufig gegeben (Krug, Hartmann & Schnabel, 2002). Zudem gibt es bis dato keine Erkenntnisse darüber, wie sich die Anwendung akuter Ausdauer-Nachbelastungen auf die Rekonsolidierung eines bereits geübten, durch das *Relearning* erneut destabilisierten, motorischen Gedächtnisinhaltes auswirkt.



Im Schaubild verwendete Bildquellen: <http://code-spot.co.za/blog/wp-content/uploads/2009/10/neuron1.jpg>; <http://www.medical-3d-eyes.de/1/fuskelmann3.jpg>; <http://magazin.woskon.de/wp-content/uploads/2012/08/Das-Gehirn-300x240.jpg>. Alle zuletzt geprüft am 02.12.2013, 10:00 Uhr).

**Abb. 2.** Schematische Zusammenfassung des vermuteten Zusammenhangs der metabolischen Effekte intensiver Ausdauerbelastungen und der Konsolidierung motorischer Gedächtnisinhalte. Durch ein motorisches Lerntraining wird zunächst ein labiler Gedächtnisinhalt ausgebildet. Mit der Durchführung einer intensiven Ausdauer-Nachbelastung und findet eine Kommunikation zwischen der Körperperipherie und dem Gehirn über verschiedene Mechanismen statt (s. Fließtext). Diese sollten sich im Endeffekt förderlich auf die Stabilisierung und Konsolidierung der Gedächtnisspur auswirken.

Durch die Anwendung einer in der motorischen Lernforschung etablierten Ganzkörper-Balancieraufgabe (Stabilometer) und durch die Konzipierung eines längsschnittlichen Lernexperiments wurde ein erster Versuch unternommen, die offenen Fragen und Erkenntnisdefizite zu adressieren. Im Untersuchungsaufbau wurde angestrebt, die akuten neuroplastischen Effekte von Aus-

dauerbelastungen für eine vorher erlernte komplexe motorische Fertigkeit nutzbar zu machen. Basierend auf der Synthese der Erkenntnisse des theoretischen Teils wird die Hypothese formuliert, dass die Durchführung einer intensiven Ausdauerbelastung, unmittelbar nach Beendigung eines motorischen Lerntrainings, zu einer Optimierung der Behaltensleistung dieser motorischen Fertigkeit führt. Das kann in der Praxis sowohl einen *off-line gain* (Reminiscenz), als aber auch eine möglichst niedrige Vergessensrate bedeuten. Am Ende soll die Beantwortung der Frage gelingen, ob Ausdauer-Nachbelastungen potentielle Effektivierungsstrategien motorischen Lernens darstellen.

### 3. Forschungsmethodik

Durch Randomisierung wurden in einem experimentellen Versuchsdesign zwei Untersuchungsgruppen gebildet (Kontrollgruppe:  $n = 8$  [4 ♂, 4 ♀]; Körperhöhe:  $173,88 \pm 6,27$  cm; Körpergewicht:  $72,63 \pm 10,14$  kg, Alter:  $23,88 \pm 2,03$  Jahre); Versuchsgruppe:  $n = 7$  [3 ♂, 4 ♀]; Körperhöhe:  $178,43 \pm 6,5$  cm; Körpergewicht:  $69,36 \pm 10,26$  kg, Alter:  $24,14 \pm 2,67$  Jahre), sodass die unabhängige Variable zweifach gestuft war (*Ausdauer-Nachbelastung* bzw. *Kontrollbedingung*). Die Stichprobe wurde aus der Population *Sportstudenten des Lehramts* des 4.-10. Fachsemesters rekrutiert. Zur Überprüfung der Hypothese wurde ein längsschnittliches Lernexperiment konzipiert, das zwei Lerntrainings mit jeweils zwei Retentionstests im Abstand von 24 h bzw. 7 d vorsah (Abb. 3; vgl. Roig et al., 2012).

Jeder Untersuchungstag begann mit einer standardisierten Erwärmung, die in einem achtminütigen Einfahren auf dem Fahrradergometer bei 75 W bestand. In den beiden Lerntrainings übten die Probanden eine komplexe Balancieraufgabe auf dem Stabilometer (*Lafayette Instruments Co., stability platform model 16030L*) in geblockter Übungsreihe (Abb. 3). Lernkriterium war die Zeit in der Mittelposition, die durch eine durch eine Schwankungsamplitude von  $3^\circ$  nach beiden Seiten festgelegt war. Die Zeit in Sekunden, die eine Versuchsperson während der Durchgangsdauer von 30 s innerhalb dieser Schwankungsamplitude verbrachte, wurde durch das Bedienelement des Messinstrumentes registriert. Die Retentionstests waren ihrem Ablauf nach für beide Untersuchungsgruppen identisch, sodass stets vier Versuche auf dem Stabilometer durchgeführt wurden.

Da in einem motorischen Lernprozess unüberschaubar viele Randbedingungen außerhalb der experimentellen Situation wirken (Wiemeyer, 2003), wurde durch Maßnahmen der Standardisierung eine möglichst hohe experimentelle Bedingungskonstanz angestrebt. Zur Vermeidung von peripheren oder zentralen Ermüdungserscheinungen betrug die Pause zwischen zwei Versuchen 90 s. Darüber hinaus wurde in Anlehnung an Taubert (2012) ein exploratives Lerndesign verwendet und kein *knowledge of performance* (KP) erteilt. Eine

Ergebnisrückmeldung (*knowledge of results* – KR) wurde den Probanden nach jeweils drei Versuchen gegeben. Auch die Ausgangsposition eines jeden Messdurchgangs war durch eine 26°-Auslenkung der Standplattform (nach links oder rechts) standardisiert, aus der sich die Probanden in die Mittelposition ‚herauswippen‘ mussten. Des Weiteren musste der Blick der Probanden über die gesamte Dauer eines Durchgangs auf eine Markierung gerichtet werden (externe Aufmerksamkeitsfokussierung).

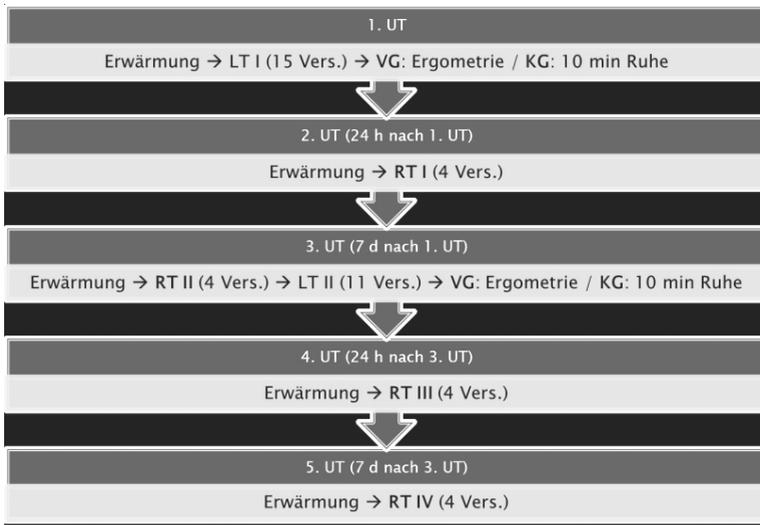


Abb. 3. Schematische Darstellung des Untersuchungsaufbaus. Abkürzungen: LT = Lerntraining, RT = Retentionstest, VG/KG = Versuchs-/Kontrollgruppe, Vers. = Übungsumfang auf dem Stabilometer in Versuchen

Die Versuchsgruppe führte jeweils unmittelbar nach den beiden Lerntrainings einen fahradergometrischen Stufentest bis zur Ausbelastung durch, während die Kontrollgruppe jeweils 10 min ruhte (Kontrollbedingung). Das Belastungsprotokoll des Stufentests wurde wie folgt gewählt: einem dreiminütigen Einfahren bei einem Tretwiderstand von 75 W folgten abermals 3 min bei 125 W. Es folgten Steigerungen des Bremswiderstandes um jeweils 50 W alle 30 s. Die Instruktion für die Probanden lautete, eine Tretfrequenz von  $80 \cdot \text{min}^{-1}$  nicht zu unterschreiten. Als definiertes Abbruchkriterium wurde die Unterschreitung der vorgegebenen Frequenz in einem Zeitraum von 5 s definiert. Während am Anfang des Stufentests in erster Linie die aerobe Energiebereitstellung beansprucht wird, nimmt die Anteiligkeit der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung und damit die Laktatbildung bei steigendem Bremswiderstand immer mehr zu (Röcker, Dickhuth, Nieß & Heitkamp, 1998). Bei der Auswahl der Nachbelastungstätigkeit wurde vorausgesetzt, dass das Radfahren einen so

hochautomatisierten Bewegungsablauf darstellen sollte, dass kein Interferenzeffekt zur vorher erlernten Fertigkeit entsteht.

Die Quantifizierung der Retentionsleistungen erfolgte über die einfache Differenzbildung zwischen Aneignungs- und Behaltensleistung (*difference scores*) (Schmidt & Lee, 2011; Pöhlmann, 2005). Dazu wurde das arithmetische Mittel der besten zwei Versuche eines Lerntrainings vom arithmetischen Mittel der besten zwei Versuche der dazu gehörigen Retentionstests subtrahiert (Tab. 1).

Tab. 1. Übersicht zur Berechnung der *difference scores* (Erläuterungen im Text)

Lernleistung ( <i>difference score</i> )	Berechnung
MZP 1	$\bar{x}_{\text{arithm RT I}} - \bar{x}_{\text{arithm LT I}}$
MZP 2	$\bar{x}_{\text{arithm RT II}} - \bar{x}_{\text{arithm LT I}}$
MZP 3	$\bar{x}_{\text{arithm RT III}} - \bar{x}_{\text{arithm LT II}}$
MZP 4	$\bar{x}_{\text{arithm RT IV}} - \bar{x}_{\text{arithm LT II}}$

#### 4. Hauptergebnisse

Bevor die Unterschiede der Untersuchungsgruppen analysiert werden können, ist sicherzustellen, dass die unabhängige Variable den Vorgaben entsprechend ausgeprägt war. In den beiden fahrradergometrischen Stufentests wurde ein Medianwert auf der Borg-Skala von 18 registriert.<sup>4</sup> Gleichzeitig lagen die Herzfrequenzen zum Zeitpunkt des Belastungsabbruchs im Mittel bei  $176,5 \pm 6,8 \text{ * min}^{-1}$ . Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass die Fahrradergometrie in der Versuchsgruppe zur Ausbelastung führte.

Hinsichtlich der Retentionsleistungen zeigen die Ergebnisse der *deskriptiven Statistik*, dass die Versuchsgruppe zu allen vier Messzeitpunkten bessere Werte im Vergleich zur Kontrollgruppe aufwies (Tab. 2).

Im nächsten Schritt wurde basierend auf diesen Daten eine vergleichende Überprüfung der Retentionsleistungen der Untersuchungsgruppen mittels *inferentieller Statistik* vorgenommen (zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung).<sup>5</sup> Es konnte bei einer großen Effektstärke (partielles  $\eta^2 = .287$ , vgl. Co-

<sup>4</sup> RPE-Werte von  $\geq 15$  gelten als Indikator für eine erfolgte Ausbelastung (Schneider, Löllgen & Erdmann, 2010).

<sup>5</sup> Eine von acht Faktorstufen wies keine Normalverteilung (Kolmogorow-Smirnow-Test mit Lilliefors-Schranken) auf, allerdings gilt die ANOVA als robust dagegen (Völkle & Erdfelder, 2010). Bei der Prüfung auf Varianzhomogenität (Levene-Test) wurden keine Verletzungen der Anwendungsvoraussetzungen der ANOVA registriert.

hen, 1988) ein signifikanter Effekt der unabhängigen Variable nachgewiesen werden ( $F_{(1, 13)} = 5,22, p = .04$ ). Da weitere statistische Analysen keine Gruppenunterschiede hinsichtlich des Initialniveaus und der Aneignungsleistung der Fertigkeit ergaben,<sup>6</sup> sollten sich die Unterschiede in der Ausprägung der abhängigen Variablen (Retentionsleistung) auf den experimentellen Faktor zurückführen lassen. Die formulierte Arbeitshypothese wird damit bestätigt.

Tab. 2: *Arithmetische Mittel und Standardabweichungen der Retentionsleistungen der Untersuchungsgruppen (KG=Kontrollgruppe, VG=Versuchsgruppe). In der letzten Zeile sind die Differenzen in den arithmetischen Mitteln zwischen Versuchs- und Kontrollgruppe aufgeführt.*

	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4
<b>KG: <math>\bar{x}_{arithm} \pm \sigma</math> [s]</b>	-0,66 ± 2,04	2,2 ± 1,88	-1,41 ± 1,38	-1,32 ± 2,51
<b>VG: <math>\bar{x}_{arithm} \pm \sigma</math> [s]</b>	0,6 ± 2,14	2,46 ± 2,9	-0,24 ± 2,25	-0,15 ± 2,87
<b>VG - KG</b>	1,27	0,26	1,18	1,17

## 5. Diskussion und zukünftige Forschungsaufgaben

Die Ergebnisse der Arbeit bestätigen die aktuelle Forschungsmeinung, dass das prozedurale (motorische) Gedächtnis mit akuten Ausdauer-Interventionsstrategien ebenso förderlich beeinflussbar ist wie Aspekte des deklarativen Gedächtnisses (Roig et al., 2013; Chang, Labban & Etnier, 2012). Im Speziellen können die Resultate dieser Arbeit die Ergebnisse der Studie von Roig et al. (2012) stützen.

Über den bisherigen Forschungsstand hinaus konnte demonstriert werden, dass sich eine akute intensive Ausdauer-Nachbelastung positiv auf die Konsolidierung einer komplexen Ganzkörperbewegung (*whole body movement*) auswirkt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass sich dieser Effekt nicht nur auf die Konsolidierung der Fertigkeit nach ihrer Erstakquisition zurückführen lässt. Vielmehr war die Tendenz zu beobachten, dass eine solche intensive Belastung auch die mit dem *Relearning* einer Fertigkeit verbundene Rekonsolidierung fördernd beeinflussen kann. Die neurobiologische Ursache dieser

---

<sup>6</sup> Um die Annahme eines homogenen Ausgangsniveaus beider Gruppen zu testen, wurden die Resultate ersten vier Versuche auf dem Stabilometer der Kontroll- und Versuchsgruppe mittels des U-Tests nach Mann-Whitney auf Unterschiede geprüft. Darüber hinaus sollte ausgeschlossen werden, dass die Gruppen eine unterschiedliche Lerngeschwindigkeit aufweisen. Hierfür wurden die absoluten Leistungen der Lerntrainings I (Versuche 5-15) und II (24-34) beider Untersuchungsgruppen mit einer zweifaktoriellen ANOVA inferenzstatistisch ausgewertet. Beide Analysen ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Befunde könnte in einer durch die Ausdauer-Nachbelastung evozierten Optimierung der synaptischen Konsolidierung liegen. Die im theoretischen Teil formulierten Mechanismen erfahren somit eine tendenzielle Bestätigung, wenngleich es zukünftige Aufgabe sein muss, diesen Verhaltensergebnissen mit den Methoden angrenzender Wissenschaftsdisziplinen (z. B. Neurowissenschaft oder Biochemie) weitere Evidenz zur Seite zu stellen und die Wirkmechanismen detailliert aufzuklären.

Eine weitere lohnenswerte Forschungsaufgabe ist es, jenes Belastungsgefüge zu finden, das optimale Effekte auf die Konsolidierung des motorischen Gedächtnisses verspricht. Analog zu Strüder (2012, S. 64) gehen wir davon aus, dass „sowohl bei akuten als auch bei chronischen Ausdauerbelastungen vermutlich eine optimale Belastungsintensität für die Bildung neurotropher Faktoren und die Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit“ existiert. Alle aktuellen Studien zu akuten Nachbelastungsstrategien weisen darauf hin, dass die Belastungsintensität sehr hoch sein sollte (Knaepen et al., 2010; Huang et al., 2013), was sich durch die vermutlich eminent wichtige Rolle von Laktat für den BDNF-Release erklären lässt (Rojas Vega et al., 2012; Schiffer et al., 2011). Vor allem eine Erhöhung der Belastungsdauer im Bereich hoher Belastungsintensitäten könnte sich diesbezüglich günstig erweisen.

Nicht zuletzt müssen die vorliegenden Ergebnisse mit größeren Stichproben und anderen Fertigkeiten reproduziert werden. So ist es bekannt, dass sich die Retentionscharakteristika von *continuous skills* (wie der Stabilometer-Aufgabe) und *discrete skills*, zu denen auch die aus der Sportmotorik bekannten azyklischen Bewegungen zählen, unterscheiden (Schmidt & Lee, 2011). Aus sportwissenschaftlicher Sicht wird es zudem von großem Interesse sein, das Paradigma auf das Erlernen von komplexen sportmotorischen Fertigkeiten zu übertragen. Bei positivem Resultat ist über eine Implementierung der Strategie in verschiedenen Anwendungskontexten (Leistungssport, Rehabilitationssport, Schulsport usw.) nachzudenken.

## Literatur

Bekinschtein, P., Cammarota, M. & Medina, J.H. (2014). BDNF and memory processing. *Neuropharmacology*, 76, pp. 677-683.

Bernstein, N.A. (1988). *Bewegungsphysiologie* (Sportmedizinische Schriftenreihe der DHfK und des FKS, 9) (2., durchges. und erw. Aufl.). Leipzig: J. A. Barth.

Brashers-Krug, T., Shadmehr, R. & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, 382 (6588), pp. 252-255.

Chang, Y., Labban, J., Gapin, J. & Etnier, J. (2012). The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Research*, 1453, pp. 87-101.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2<sup>nd</sup> Ed.). Hillsdale, NJ: L. Erlbaum.

Coco, M., Caggia, S., Musumeci, G., Perciavalle, V., Graziano, A.C., Pannuzo, G. & Cardile, V. (2013). Sodium L-lactate differently affects brain-derived neurotrophic factor, inducible nitric oxide synthase, and heat shock protein 70 kDa production in human astrocytes and SH-SY5Y cultures. *Journal of Neuroscience Research*, 91 (2), pp. 313-320.

Dalsgaard, M.K., Quistorff, B., Danielsen, E.R., Selmer, C., Vogelsang, T. & Secher, N.H. (2004). A reduced cerebral metabolic ratio in exercise reflects metabolism and not accumulation of lactate within the human brain. *The Journal of Physiology*, 554 (2), pp. 571-578.

Dayan, E. & Cohen, L.G. (2011). Neuroplasticity Subservicing Motor Skill Learning. *Neuron*, 72 (3), pp. 443-454.

Ferris, L.T., Williams, J.S. & Shen, C.-L. (2007). The Effect of Acute Exercise on Serum Brain-Derived Neurotrophic Factor Levels and Cognitive Function. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39 (4), pp. 728-734.

Gómez-Pinilla, F. & Feng, C. (2012). Molecular mechanisms for the ability of exercise supporting cognitive abilities and counteracting neurological disorders. In H. Boecker, C.H. Hillman, L. Scheef & H.K. Strüder (Eds.), *Functional Neuroimaging in Exercise and Sport Sciences* (pp. 25-43). New York: Springer.

Haas, C.T. & Schmidtbleicher, D. (2008). About effects of exercise and stochastic resonance on neuroplasticity and neuroprotection. In J. Gießing & M. Fröhlich (Eds.), *Current results of strength training research: a multi-perspective approach* (Current results of strength training research, 2, pp. 105-118). Göttingen: Cuvillier.

Hollmann, W. & Strüder, H.K. (2009). *Sportmedizin. Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin* (5., völlig neu bearb. u. erw. Aufl.). Stuttgart: Schattauer.

Hossner, E.-J. & Künzell, S. (2003). Motorisches Lernen. In H. Mechling & J. Munzert (Hrsg.), *Handbuch Bewegungswissenschaft – Bewegungslehre* (S. 131-153). Schorndorf: Hofmann.

Huang, T., Larsen, K.T., Ried-Larsen, M., Møller, N.C. & Andersen, L. (2013). The effects of physical activity and exercise on brain-derived neurotrophic factor in healthy humans: A review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* (in press).

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), pp. 219-231.

Knaepen, K., Goekint, M., Heyman, E.M. & Meeusen, R. (2010). Neuroplasticity – Exercise-Induced Response of Peripheral Brain-Derived Neurotrophic Factor. *Sports Medicine*, 40 (9), pp. 765-801.

Krakauer, J.W. & Shadmehr, R. (2006). Consolidation of motor memory. *Trends in Neurosciences*, 29 (1), pp. 58-64.

Krug, J., Hartmann, C. & Schnabel, G. (2002). Entwicklungsaspekte der Bewegungslehre/ Sportmotorik – Ansätze zur Weiterentwicklung des MEINELschen Fundaments der Wissenschaftsdisziplin. *Sportwissenschaft*, 32 (2), S. 131-146.

Mayford, M., Siegelbaum, S.A. & Kandel, E.R. (2012). Synapses and Memory Storage. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 4 (6), a005751.

McGaugh, J.L. (2000). Memory - a century of consolidation. *Science (New York, N.Y.)*, 287 (5451), pp. 248-251.

Meinel, K. (1960). *Bewegungslehre. Versuch einer Theorie der sportlichen Bewegung unter pädagogischem Aspekt*. Berlin: Volk und Wissen.

Muellbacher, W., Ziemann, U., Wissel, J., Dang, N., Kofler, M., Facchini, S., Boroojerdi, B., Poewe, W. & Hallett, M. (2002). Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature*, 415 (6872), pp. 640-644.

Müllbacher, W. (2011). Neuroplastizität. In J. Lehrner, G. Pusswald & E. Fertl (Hrsg.), *Klinische Neuropsychologie. Grundlagen - Diagnostik - Rehabilitation* (S. 611-625). Wien: Springer.

Müller, H. & Blischke, K. (2009). Motorisches Lernen. In B. Strauß & W. Schlicht (Hrsg.), *Grundlagen der Sportpsychologie* (Enzyklopädie der Psychologie Serie V, Bd. 1, S. 159-228). Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe.

Newington, J.T., Harris, R.A. & Cumming, R.C. (2013). Reevaluating Metabolism in Alzheimer's Disease from the Perspective of the Astrocyte-Neuron Lactate Shuttle Model. *Journal of Neurodegenerative Diseases*, 2013 (5), pp. 1-13.

Ogoh, S. & Ainslie, P.N. (2009). Regulatory Mechanisms of Cerebral Blood Flow During Exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 37 (3), pp. 123-129.

Pöhlmann, R. (2005). Lernen, motorisches Lernen, sensomotorisch-psychometrische Lern- und Lehrprozesse. In G. Kirchner & R. Pöhlmann (Hrsg.), *Lehrbuch der Sportmotorik. Psychomotorische Grundlagen und Anwendungen* (Psychomotorik in Forschung und Praxis, 37, S. 127-217). Kassel: Universität-Gesamthochschule.

Quistorff, B., Secher, N.H. & van Lieshout, J.J. (2008). Lactate fuels the human brain during exercise. *The FASEB Journal*, 22 (10), pp. 3443-3449.

- Robertson, E.M. (2012). New Insights in Human Memory Interference and Consolidation. *Current Biology*, 22 (2), R66.
- Robertson, E.M., Pascual-Leone, A. & Miall, R.C. (2004). Opinion: Current concepts in procedural consolidation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5 (7), pp. 576-582.
- Roig, M., Nordbrandt, S., Geertsen, S.S. & Nielsen, J.B. (2013). The effects of cardiovascular exercise on human memory: A review with meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37, pp. 1645-1666.
- Roig, M., Skriver, K., Lundbye-Jensen, J., Kiens, B., Nielsen, J.B. & Sinigaglia, C. (2012). A Single Bout of Exercise Improves Motor Memory. *PLoS ONE*, 7 (9), e44594.
- Rojas Vega, S., Hollmann, W. & Strüder, H.K. (2012). Humoral Factors in Humans Participating in Different Types of Exercise and Training. In H. Boecker, C.H. Hillman, L. Scheef & H.K. Strüder (Eds.), *Functional Neuroimaging in Exercise and Sport Sciences* (pp. 169-196). New York: Springer.
- Rojas Vega, S., Hollmann, W., Vera Wahrmann, B. & Strüder, H. (2012). pH Buffering Does not Influence BDNF Responses to Exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 33 (1), pp. 8-12.
- Rojas Vega, S., Strüder, H.K., Vera Wahrmann, B., Schmidt, A., Bloch, W. & Hollmann, W. (2006). Acute BDNF and cortisol response to low intensity exercise and following ramp incremental exercise to exhaustion in humans. *Brain Research*, 1121 (1), pp. 59–65.
- Röcker, K., Dickhuth, H.-H., Nies, A. & Heitkamp, H.C. (1998). Prinzipien aerober Leistungsdiagnostik. In D. Jeschke & R. Lorenz (Hrsg.), *Sportartspezifische Leistungsdiagnostik. Energetische Aspekte* (Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft, 1998,6, S. 27-36). Köln: Sport und Buch Strauß.
- Schiffer, T., Schulte, S., Sperlich, B., Achtzehn, S., Fricke, H. & Strüder, H.K. (2011). Lactate infusion at rest increases BDNF blood concentration in humans. *Neuroscience Letters*, 488 (3), pp. 234-237.
- Schmidt, R.A. & Lee, T.D. (2011). *Motor control and learning. A behavioral emphasis* (5<sup>th</sup> Ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R.A. & Wrisberg, C.A. (2008). *Motor learning and performance. A problem based learning approach* (4<sup>th</sup> Ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schnabel, G. (2011). Sportliche Leistung, Leistungsfähigkeit - Wesen und Struktur. In G. Schnabel, D. Harre & J. Krug (Hrsg.), *Trainingslehre - Trainingswissenschaft. Leistung, Training, Wettkampf* (2. Aufl., S. 34-56). Aachen: Meyer & Meyer.

Schnabel, G., Krug, J. & Panzer, S. (2007). Motorisches Lernen. In K. Meinel & G. Schnabel (Hrsg.), *Bewegungslehre - Sportmotorik. Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt* (S. 144-210). Aachen u. a.: Meyer & Meyer.

Schneider, C.A., Löllgen, H. & Erdmann, E. (2010). Begutachtung und Ergometrie. In H. Löllgen, E. Erdmann & A. Gitt (Hrsg.), *Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis* (S. 383-389). Berlin: Springer.

Strüder, H.K. (2012). Braintraining: Fiktion und Fakten zur Neurogenese. In E. Engelmeyer, J. Mester & P. Sperlich (Hrsg.), *Individualisierung im Leistungssport, Grundlagen, Diagnostik und Training* (Sport ist Spitze, 26, S. 61–69). Aachen: Meyer & Meyer.

Taube, W. & Gollhofer, A. (2012). Postural control and balance training. In A. Gollhofer, W. Taube & J.B. Nielsen (Eds.), *Routledge handbook of motor control and motor learning* (pp. 252–280). New York: Routledge.

Taubert, M. (2012). *Plastizität im sensomotorischen System. Lerninduzierte Veränderungen in der Struktur und Funktion des menschlichen Gehirns* (MPI series in human cognitive and brain sciences, 136). Leipzig: Max Planck Institut for Human Cognitive and Brain Sciences.

Trempe, M. & Proteau, L. (2012). Motor skill consolidation. In N.J. Hodges & A.M. Williams (Eds.), *Skill acquisition in sport. Research theory and practice* (2<sup>nd</sup> Ed., pp. 192-210). London: Routledge.

Vickers, J.N. (1994). Psychological research in sport pedagogy: Exploring the reversal effect. *Sport Science Review*, 3 (1), pp. 28-40.

Völkle, M.C. & Erdfelder, E. (2010). Varianz- und Kovarianzanalyse. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (S. 455-493). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Weineck, J. (2010). *Sportbiologie* (10. überarb. und erw. Aufl.). Balingen: Spitta.

Wiemeyer, J. (2003). Motorisches Lernen – Lehrmethoden und Übungsgestaltung. In H. Mechling & J. Munzert (Hrsg.), *Handbuch Bewegungswissenschaft – Bewegungslehre* (Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport, 141, S. 405-427). Schorndorf: Hofmann.

Woo, N.H. & Lu, B. (2009). BDNF in synaptic plasticity and memory. In L.R. Squire (Ed.), *Encyclopedia of neuroscience, Vol. 2* (pp. 135-143). Oxford: Academic Press.

## **Verfasser**

**Lehmann, Nico**, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Universität Leipzig