

Nico Lehmann

(Preisträger des Dissertationspreises)¹

Modulierung zentralnervaler Korrelate des motorischen Lernens durch Ausdauerinterventionen: Aktueller Sachstand und Perspektiven

Summary

Mounting evidence indicates that aerobic exercise elicits beneficial effects on cardiovascular and musculoskeletal functions as well as on brain health and plasticity. The present review first summarizes what is known regarding the effects of aerobic exercise on motor skill acquisition and retention on the behavioral level. Second, this article examines the neurobiological correlates and mediators through which exercise affects motor learning. Implications of these findings for motor learning processes in applied settings and for future research in sport science are discussed.

Zusammenfassung

Zahlreiche Studien indizieren, dass Ausdauerbelastungen sowohl positive Effekte auf kardiovaskuläre und muskuloskeletale Funktionen als auch auf Hirngesundheit und -plastizität zeitigen. In der vorliegenden Übersicht wird das verfügbare Wissen bzgl. der Effekte von Ausdauerinterventionen auf motorische Lernprozesse zusammengefasst. Schwerpunkte bilden die Aufarbeitung von Verhaltensstudien sowie zugrundeliegender neurobiologischer Korrelate und Mediatoren. Mögliche Implikationen der Befunde für motorische Lernprozesse in der Sportpraxis und für die sportwissenschaftliche Forschung werden diskutiert

¹ Der Dissertationspreis wurde von der Kommission der Sportwissenschaftlichen Fakultät gemeinsam mit dem *Verein zur Förderung der Sportwissenschaft an der Universität Leipzig e. V.*, anlässlich 25 Jahre Sportwissenschaftliche Fakultät an der Universität Leipzig, ausgeschrieben. Vergeben wurde der Preis durch eine Jury der Sportwissenschaftlichen Fakultät.

Schlagworte: Motorisches Lernen, Neuromodulation, Ausdauer, Neuroplastizität

1. Einleitung

Die entscheidende biologische Grundlage des Bewegungslernens ist die Fähigkeit des Gehirns, sich äußeren Einflüssen anzupassen (*Neuroplastizität*). Zahlreiche Studien indizieren, dass *Ausdauerinterventionen* nicht nur einen geeigneten Stimulus zur Induktion von Neuroplastizität darstellen (Voss, Vivar, Kramer & van Praag, 2013), sondern auch die inhärente Kapazität des Gehirns zur erfahrungsbedingten Reorganisation, z. B. bei Lernprozessen, steigern können (Stillman, Cohen, Lehman & Erickson, 2016; Taubert, Villringer & Lehmann, 2015). Gemäß dieser Annahme führen Ausdauerinterventionen zu einem *allgemeinen positiven Transfereffekt* in Bezug auf motorische Lernprozesse (Kleim & Jones, 2008).

In einem Review unserer Arbeitsgruppe aus dem Jahr 2015 wurde zuletzt der Forschungsstand zu Ausdauerinterventionen und ihren Effekten auf motorische Lernprozesse aufgearbeitet (Taubert et al., 2015). Das Feld hat seither beträchtlich an Dynamik gewonnen. Neben zahlreichen Verhaltensstudien rückten in den letzten Jahren auch die zugrundeliegenden Mechanismen auf Ebene des zentralen Nervensystems (ZNS) in den Blickpunkt. Lagen hierzu damals nur vereinzelte Studien vor (Mang, Snow, Campbell, Ross & Boyd, 2014; Skriver et al., 2014), hat sich inzwischen sowohl die Anzahl der Arbeiten als auch das eingesetzte Methodenspektrum beträchtlich erweitert.

Im vorliegenden Beitrag wird eingangs der aktuelle Stand bzgl. verfügbarer Verhaltensstudien zusammengefasst. Danach werden jene Arbeiten betrachtet, in denen Zusammenhänge zwischen der ausdauerinduzierten Veränderung verschiedener Biomarker mit Indizes der motorischen Lernleistung untersucht wurden. In der abschließenden Diskussion werden Schlussfolgerungen für Sportpraxis und sportwissenschaftliche Forschung umrissen. Gegenstand dieses Überblicks sind ausschließlich experimentelle Studien am Menschen, in denen sowohl Interventions- (IG) als auch Kontrollgruppen (KG) eingeschlossen wurden. Außerdem fokussiert sich der Überblick auf Studien mit gesunden, jungen Erwachsenen, während Arbeiten mit Kindern und Jugendlichen, älteren Probandenkollektiven und aus dem Bereich der neurologischer Erkrankungen bzw. der Neurorehabilitation nur punktuell einfließen.

2. Verhaltensergebnisse

Für eine besser nachvollziehbare Strukturierung der Verhaltensergebnisse wird in Folge eine Kategorisierung nach Typ der Ausdauerintervention sowie nach Art der Fertigkeit vorgenommen. In Anlehnung an Roig, Nordbrandt, Ge-

ertsen und Nielsen (2013) verstehen wir unter *akuten Ausdauerinterventionen* jene Studien, in denen Ausdauerbelastungen innerhalb weniger Minuten vor oder nach einem motorischen Lerntraining platziert wurden. Untersuchungsdesigns, die den Effekt von mehrtägigen oder mehrwöchigen Ausdauerinterventionen auf nachfolgendes Lernen untersuchten, werden hingegen unter *längerfristigen Ausdauerintervention* rubriziert (Roig et al., 2013).

Zudem erscheint es angemessen, auf Ebene der eingesetzten motorischen Fertigkeiten in relativ *einfach* und relativ *komplex* zu differenzieren, auch wenn eine trennscharfe Abgrenzung schwierig ist (Wulf & Shea, 2002). Motorische Aufgaben werden als relativ simpel kategorisiert, wenn sie nur eines oder sehr wenige Gelenke des Bewegungsapparates involvieren (z. B. Aufgaben mit der Hand oder einzelnen Fingern). Entsprechende Aufgaben sind häufig als artifiziell zu charakterisieren (geringe ökologische Validität) und der Lernprozess vollzieht sich i. d. R. in einem sehr kurzen Zeitraum (Wulf & Shea, 2002). Demgegenüber bedürfen eher komplexe motorische Aufgaben der Koordination relativ vieler Freiheitsgrade (Teil- oder Ganzkörperbewegungen), ihr Aneignungsprozess vollzieht sich über mehrere Übungseinheiten und sie weisen eine relativ hohe ökologische Validität auf (Wulf & Shea, 2002).

2.1 Akute Ausdauerinterventionen

In der Literatur wird zwischen dem Effekt von akuten Ausdauerinterventionen auf das *online learning* und dem Effekt auf die *Konsolidierung* des Gelernten unterschieden (Taubert et al., 2015). Dabei bezeichnet online learning die Lernfortschritte, die sich während der Übungsphase vollziehen (Akquisition), wohingegen unter Konsolidierung gemeinhin Verhaltensveränderungen zwischen Übungseinheiten verstanden werden (Robertson, Pascual-Leone & Miall, 2004). Die Konsolidierung wird mit Retentionstests erfasst, die i. d. R. mehrere Stunden oder auch Tage nach der Akquisition durchgeführt werden. Hierbei ist es von Interesse, wie stabil das Gelernte behalten wird oder ob gar Leistungssteigerungen zwischen zwei Übungseinheiten zu verzeichnen sind. Diese Fragen sind von hoher praktischer Relevanz, da sich motorische Gedächtnisinhalte in einem Zeitfenster von mind. 4–6 h nach ihrer Enkodierung bzw. ihrem Wiederabruf in einem labilen, gegenüber Interferenzen anfälligen Zustand befinden (vgl. Trempe & Proteau, 2012). Ein Spezialparadigma stellen Studien dar, in denen nach der Akquisition einer Fertigkeit A, also in der Konsolidierungsphase, eine interferierende Fertigkeit B zu erlernen ist, um in Folge die Retention von Fertigkeit A zu erfassen (Robertson et al., 2004). Mit der Platzierung akuter Ausdauerinterventionen *vor* dem Üben wird daher eine Verbesserung der Aneignungsleistung und/oder der Konsolidierung des Gelernten angezielt, wohingegen bei der Durchführung einer Ausdauerbelastung *nach* dem Üben nur die Konsolidierungsphase beeinflusst werden kann.

Erste Studien zu den Effekten konditioneller *Vorbelastungen* auf die motorische (Lern-)Leistung bei relativ einfachen Aufgaben wurden bereits in den

1960er Jahren durchgeführt (Olivier, 1991), während inzwischen auch einige Arbeiten mit komplexen Fertigkeiten vorliegen (Augste, 2006; McMorris, Hale, Corbett, Robertson & Hodgson, 2015; Olivier & Dillinger, 1997). Da das Erkenntnisinteresse der eben genannten Studien auf der Frage lag, ob und in welchem Ausmaß konditionelle Vorbelastungen motorische Lernprozesse beeinträchtigen, werden sie erst in der Diskussion wieder aufgegriffen. Stattdessen werden hier nur jene Studien näher behandelt, die Ausdauerinterventionen bewusst mit dem Ziel einsetzten, das motorische Lernen zu steigern.

2.1.1 Akute Ausdauerinterventionen bei einfachen motorischen Fertigkeiten

Betrachtet man die Literatur zum Einfluss akuter Ausdauerinterventionen auf das motorische Lernen bei einfachen Fertigkeiten, so ist zunächst auffällig, dass sämtliche Studien motorische Aufgaben verwendeten, die im weiteren Sinne Anforderungen an die Auge-Hand-Koordination stellen (Tracking-Aufgaben, serielle Reaktionszeitaufgaben, sequenzielle Kraftdifferenzierungs-Aufgaben). Involviert ist dabei lediglich die obere Extremität (Hände/Finger), mit der z. B. ein Joystick, eine Maus oder ein Kraftaufnehmer zu manipulieren ist.

Bei den Studien, die *akute Ausdauer-Vorbelastungen* untersuchten, zeigt sich ein gemischtes Bild. In drei Studien konnte eine verbesserte Akquisition der Fertigkeit in Anschluss an eine akute Ausdauerbelastung festgestellt werden (Mang et al., 2014; Snow, Mang, Roig, McDonnell, Campbell & Boyd, 2016; Statton, Encarnacion, Celnik & Bastian, 2015), in fünf Studien wurde ein entsprechender Effekt nicht verzeichnet (Ferrer-Uris, Busquets, Lopez-Alonso, Fernandez-Del-Olmo & Angulo-Barroso, 2017; Mang, Snow, Wadden, Campbell & Boyd, 2016; Roig et al., 2012; Stavrinou & Coxon, 2017; Tomporowski & Pendleton, 2018). Auch bzgl. der Leistung in Retentionstests ist die Befundlage nicht konsistent: vier Studien zeigen positive Effekte (Mang et al., 2014; Mang et al., 2016; Roig et al., 2012; Stavrinou & Coxon, 2017), während andere keinen Vorteil der Ausdauerintervention zeigen konnten (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015; Tomporowski & Pendleton, 2018).

Im Bereich der *akuten Ausdauer-Nachbelastungen* wird in fünf Studien eine signifikant verbesserte Retention zugunsten der IG berichtet (Dal Maso, Desormeau, Boudrias & Roig, 2018; Roig, Skriver, Lundbye-Jensen, Kiens & Nielsen, 2012; Thomas, Beck et al., 2016; Thomas, Johnsen et al., 2016; Tomporowski & Pendleton, 2018). Eine weitere Studie weist tendenzielle Vorteile zugunsten der IG aus (Ostadan, Centeno, Daloz, Frenn, Lundbye-Jensen & Roig, 2016). Positive Effekte der Nachbelastung konnten auch bei Kindern (Lundbye-Jensen, Skriver, Nielsen & Roig, 2017) und Schlaganfall-Patienten (Nepveu et al., 2017) gezeigt werden. Spezielle Untersuchungen liegen außerdem zur Rolle der Belastungsintensität und zur zeitlichen Relation von Nachbelastung zu Lernphase vor. So wurde demonstriert, dass höhere Belastungsintensitäten zu besseren Retentionsleistungen führen als moderate

(Thomas, Johnsen et al., 2016) und dass der Effekt der Nachbelastung auf die Konsolidierung umso vorteilhafter ausfällt, je kürzer der zeitliche Abstand zwischen Lernphase und Belastung ist (Thomas, Beck et al., 2016).

In zwei Studien wurden *Direktvergleiche* zwischen akuten Vor- und Nachbelastungen vorgenommen. Dabei fanden Roig et al. (2012) in der Langzeit-Retention (7 d) signifikante Vorteile der nachbelasteten im Vergleich zur vorbelasteten IG. Hingegen berichten Ferrer-Urris et al. (2017) bessere Retentionsleistungen beider IG (Vor- und Nachbelastung) verglichen mit einer KG 1 h nach Akquisition der Fertigkeit, wobei keine Unterschiede zwischen den IG festgestellt wurden.

Während in allen bisher genannten Studien die Konsolidierungsphase ungestört ablaufen konnte, nutzten andere Arbeiten das oben erwähnte *memory-stabilization-Paradigma* (Jo, Chen, Riechman, Roig & Wright, 2018; Lauber, Franke, Taube & Gollhofer, 2017; Rhee, Chen, Riechman, Handa, Bhatia & Wright, 2016). Rhee et al. (2016) und Lauber et al. (2017) zeigten, dass eine optimale Konsolidierung dann erfolgt, wenn die Ausdauerbelastung zwischen Kriteriums-aufgabe A und Interferenz-aufgabe B durchgeführt wird. Jo et al. (2018) waren insbesondere an der Frage interessiert, ob der protektive Effekt akuter Ausdauerbelastungen auf motorische Gedächtnisinhalte abhängig vom Nachtschlaf ist. Die Autoren nutzten daher nur ein 6-h-Retentionsintervall und fanden ebenfalls, dass die Durchführung der Ausdauerintervention zwischen Kriteriums- und Interferenz-aufgabe zu einer tendenziell besseren Gedächtniskonsolidierung führt. Sie diskutieren diese Ergebnisse dahingehend, dass die Interaktion zwischen Ausdauerbelastung und Nachtschlaf möglicherweise den positiven Effekt der Intervention verstärken könnte (Jo et al., 2018).

2.1.2 Akute Ausdauerinterventionen bei komplexen motorischen Fertigkeiten

Der Einfluss akuter Ausdauerinterventionen auf das Erlernen komplexer Fertigkeiten wurde ebenfalls mit akuten Vor- (Baird et al., 2018; Helm, Matt, Kirschner, Pohl, Kohl & Reisman, 2017; Taubert & Krug, 2015; Wanner, Müller, Pfeifer & Steib, 2018) und Nachbelastungen (Taubert & Krug, 2018) untersucht. Meist wurde dabei eine Ganzkörper-Balancieraufgabe (Stabilometer) als zu lernende Fertigkeit eingesetzt (Lehmann, 2013; Taubert & Krug, 2018; Wanner et al., 2018). Weiterhin genutzt wurden eine Adaption der seriellen Reaktionszeitaufgabe, bei der Ganzarmbewegungen im dreidimensionalen Raum durchgeführt werden mussten (Baird et al., 2018) sowie das Erlernen eines asynchronen Gangmusters auf einem Split-Belt-Laufband (Helm et al., 2017). Nicht zuletzt liegen auch erste Felduntersuchungen zum Techniktraining bei Saltodrehbewegungen vor (Taubert & Krug, 2015; 2018).

Im Bereich der *akuten Vorbelastungen* nutzten zwei Studien (Baird et al., 2018; Wanner et al., 2018) einen Drei-Gruppen-Untersuchungsplan (hochintensive Belastung, geringe/moderate Belastung, keine Intervention) und eine

Studie ein klassisches kontrolliertes Design (Helm et al., 2017). Baird et al. (2018) und Wanner et al. (2018) nutzten Fahrrad-, Helm et al. (2017) Handkurbelergometrie. Die Untersuchungsergebnisse zeigen übereinstimmend und unabhängig von der Intensität, dass die Vorbelastung zu keinen Vorteilen in der Akquisition führten (Baird et al., 2018; Helm et al., 2017; Wanner et al., 2018). Auch hinsichtlich der Retention werden keine signifikanten positiven Effekte berichtet (Baird et al., 2018; Helm et al., 2017), einzig Wanner et al. (2018) fanden einen tendenziellen Vorteil zugunsten der moderat vorbelasteten Gruppe. Interessanterweise ergab eine Studie an älteren Parkinson-Patienten, die ebenfalls die Stabilometer-Aufgabe lernten, eine signifikant verbesserte Konsolidierung nach moderat-intensiver Voraktivierung (Steib, Wanner, Adler, Winkler, Klucken & Pfeifer, 2018).

Einen Sonderfall stellen die Felduntersuchungen im Nachwuchsbereich (8–13 y) des Wasserspringens und Gerätturnens von Taubert und Krug (2015) dar, in denen der Effekt von submaximalen Vorbelastungen auf das Techniktraining von Saltodrehbewegungen untersucht wurde. Die Untersuchungen wurden über zwei Mesozyklen (MEZ) in einem Crossover-Design durchgeführt. Während des ersten MEZ wurde ein submaximales Belastungsprotokoll unmittelbar vor ausgewählten Trainingseinheiten angewendet, während im zweiten MEZ eine traditionelle Erwärmung erfolgte. Die Intervention zeigte im Wasserspringen keine Effekte, während im Gerätturnen eine signifikant verringerte Soll-Istwert-Differenz bzgl. des Hüftwinkels in der Position des Öffnens zugunsten der IG registriert wurde (Taubert & Krug, 2015).

Hinsichtlich *akuter Nachbelastungen* liegen nach unserer Kenntnis nur Studien der eigenen Arbeitsgruppe vor. In einem ersten Experiment untersuchten wir, wie sich eine akute Ausdauer-Nachbelastung auf dem Radergometer auf die Retention der Stabilometer-Aufgabe auswirkt (Lehmann, 2013; Resultate der Gesamtstichprobe bei Taubert & Krug, 2018). In Anlehnung an Roig et al. (2012) wurden einem ersten Lerntraining zwei Retentionstests nach 24 h und 7 d nachgeschaltet. Auf den zweiten Retentionstest folgte direkt eine weitere Übungseinheit, der sich wiederum Retentionstests im gleichen Zeitabstand anschlossen. Über alle Retentionstests betrachtet zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt zugunsten der IG, womit erstmals demonstriert werden konnte, dass sich akute Ausdauer-Nachbelastungen positiv auf die Konsolidierung und Rekonsolidierung komplexer Ganzkörperbewegungen auswirken können.

Ein möglicher Praxistransfer dieser Laborergebnisse wurde auch hier mit Feldstudien im Crossover-Design über zwei MEZ bei Nachwuchssportlern im Wasserspringen und Gerätturnen (9–11 Jahre) untersucht (Taubert & Krug, 2018). Während im ersten MEZ submaximale sportartspezifische Nachbelastungen zum Einsatz kamen, fand im zweiten MEZ keine Nachaktivierung statt. Verschiedene Körperposen bzw. -winkel bei Saltodrehbewegungen wurden als abhängige Variablen videometrisch analysiert. Während sich im Wassersprin-

gen keine signifikanten Resultate zeigten, wurden im Gerätturnen verbesserte Schulter-, Hüft- und Kniewinkelwerte zugunsten der IG registriert.

2.2 Längerfristige Ausdauerinterventionen

Im Vergleich Bereich längerfristiger Ausdauerinterventionen konnten nur zwei Studien aus der eigenen Arbeitsgruppe auffindig gemacht werden, die eine Stichprobe junger Erwachsener untersuchten (Lehmann, 2018; Taubert & Krug, 2015). Beide Studien nutzten dabei ein sequenzielles Transferdesign.

Bei Taubert und Krug (2015) wurden die Effekte einer zweiwöchigen hochintensiven vs. einer moderat-intensiven Voraktivierung auf dem Radergometer auf den nachfolgenden Lernprozess der Stabilometer-Aufgabe über sechs Wochen untersucht (Masterarbeit von Clauder, 2014). Die gewonnenen Daten wurden zusammen mit bestehenden Stabilometer-Datensätzen gleichaltriger Kontrollprobanden varianzanalytisch ausgewertet. Es wurde ein signifikanter Interaktionseffekt festgestellt, der von einer deutlich erhöhten Lernleistung der hochintensiv-vorbelasteten IG getrieben wurde, während die Lernleistung der submaximal voraktivierten Gruppe lediglich im Bereich der inaktiven KG lag. In diesem Sinne zeigte auch ein Direktvergleich der vorbelasteten Gruppen einen signifikanten Effekt zugunsten der hochintensiven Gruppe.

In der eigenen Dissertation (Lehmann, 2018) wurde der Versuchsaufbau von Taubert und Krug (2015) weitgehend übernommen. Die Stichprobe bestand aus wenig trainierten jungen Erwachsenen, die randomisiert auf IG und KG aufgeteilt wurden. Für die inferenzstatistische Auswertung wurde der Anstieg der Stabilometer-Lernkurven (korrigiert für die Initialleistung) herangezogen. Analog zu Taubert und Krug (2015) wies die IG eine signifikant bessere Lernleistung im Vergleich zur KG auf. Zu erwähnen ist, dass die mittleren Laktatwerte der IG während der zweiwöchigen Intervention deutlich oberhalb (ca. 44 %) der individuellen anaeroben Schwellen (IAS) der Probanden lagen.

Nur kursorisch erwähnt werden sollen drei weitere experimentelle Studien an Probandenkollektiven, die nicht im Fokus dieser Übersicht stehen. Bakken et al. (2001) fanden bei älteren Probanden (72–91 y) einen positiven Effekt einer 8-wöchigen ausdauerorientierten Intervention auf die Leistung einer Tracking-Aufgabe, die mit dem Zeigefinger durchgeführt werden musste. McGregor et al. (2017) testeten ebenfalls bei älteren Versuchspersonen (60–85 y) die Effekte einer 12-wöchigen Ausdauerintervention auf verschiedene Indizes der Handfunktion. Eine methodische Stärke dieser Arbeit ist die Einbeziehung einer aktiven KG, die ein Beweglichkeits- und Gleichgewichtstraining durchführte. Im Gruppenvergleich der Veränderungen in der Handfunktion zeigte sich ein signifikanter Effekt zugunsten der IG. Bei Quaney et al. (2009) wurden Schlaganfall-Patienten randomisiert auf eine Ausdauergruppe (IG) oder eine aktive KG (Stretching) zugeteilt (Interventionsdauer acht Wochen). Die IG zeigte nach der Intervention im Vergleich zur aktiven KG bessere Leistungen in ei-

ner Reihe von kognitiven und motorischen Tests, darunter das Erlernen einer seriellen Reaktionszeitaufgabe und einer Kraftdifferenzierungsaufgabe.

3. Zentralnervale Korrelate und Mediatoren

In wenigen der bislang aufgearbeiteten Studien wurden neben Verhaltensdaten des Lernens auch Indizes der Neuroplastizität erhoben. Gemäß den eingesetzten Forschungsmethoden werden diese Arbeiten nachfolgend in Studien mit humoralen Parametern, Studien mit transkranieller Magnetstimulation (TMS), Studien mit Elektroenzephalografie (EEG) und Studien mit Magnetresonanztomographie (MRT) untergliedert.

3.1 Studien mit humoralen Biomarkern

In insgesamt vier Studien, die allesamt akute Ausdauer-Vorbelastungen einsetzten, wurden ausdauerinduzierte Veränderungen in den Levels humoraler Biomarker mit motorischen Lernleistungen korreliert (Baird et al., 2018; Helm et al., 2017; Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014).

Skriver et al. (2014) nutzten die bei Roig et al. (2012) berichteten Verhaltensdaten der vorbelasteten IG sowie der KG und korrelierten sie mit den Levels diverser Biomarker, die unmittelbar nach der Ausdauerbelastung (IG) oder einer Ruhephase (KG) gemessen wurden. Zu den wichtigsten Ergebnissen zählt, dass Laktat ($r = .88$) und Norepinephrin ($r = .64$) hoch mit einer verbesserten Akquisition der Fertigkeit korrelierten. Darüber hinaus waren signifikante Assoziationen zwischen BDNF-Levels und der Retention nach 1 h ($r = -0.67$) bzw. nach 7 d ($r = -0.61$) zu verzeichnen. Beachtlich sind auch die Korrelationen zwischen hohen Laktatwerten und einer verbesserten Retention zu allen Messzeitpunkten (1 h: $r = -0.66$, 24 h: $r = -0.72$, 7 d: $r = -0.67$).

Die drei verbliebenen Studien analysierten ausschließlich BDNF. Im Gegensatz zu Skriver et al. (2014) berichten sowohl Mang et al. (2014) als auch Helm et al. (2017), trotz eines jeweils signifikanten Anstiegs in den Serum-BDNF-Levels der IG, keinerlei Zusammenhänge mit der motorischen Lernleistung. Unabhängig von der Belastungsintensität (niedrig vs. hochintensiv) fanden Baird et al. (2018) keinen Anstieg im Plasma-BDNF und entsprechend auch keine Zusammenhänge zwischen BDNF-Veränderung und Lernleistung.

3.2 Studien mit transkranieller Magnetstimulation (TMS)

Die TMS ist eine nicht-invasive Hirnstimulationstechnik, mit der durch Reizung des Motorkortex eine Muskelzuckung (motorisch-evoziertes Potenzial, MEP) ausgelöst werden kann. Mittels verschiedenster Protokolle können mit der TMS plastische Veränderungen induziert oder Rückschlüsse auf kortikospinale Erregbarkeit und intra- und interkortikale Hemmungs- und Bahnungsprozesse

gezogen werden. Momentan liegen drei Arbeiten zu akuten Ausdauerinterventionen (Vorbelastung: Mang et al., 2014; Stavinos & Coxon, 2017; Nachbelastung: Ostadan et al., 2016) und eine Arbeit mit einer längerfristigen Ausdauerintervention vor (McGregor et al., 2017).

Mang et al. (2014) erfassten in ihrer Studie neben BDNF auch ausdauerinduzierte Veränderungen in der sogenannten gepaarten assoziativen Stimulation (PAS), bei der die elektrische Reizung eines peripheren Nervs mit einem TMS-Einzelpuls über der entsprechenden Repräsentation im Gehirn gepaart wird. Je nach eingesetztem Protokoll erlaubt die PAS damit die Induktion von Langzeitpotenzierungs- (LTP) oder Langzeitdepressions- (LTD) ähnlicher Plastizität in vivo. Mang et al. (2014) setzten PAS über der Repräsentation des kurzen Daumenspreizers (*M. abductor pollicis brevis*) ein und fanden einen ausdauerinduzierten Anstieg der LTP-ähnlichen Plastizität der IG im Vergleich zur KG. Allerdings wurden keine Zusammenhänge zwischen der PAS-Veränderung und der motorischen Lernleistung registriert.

Stavinos und Coxon (2017) nutzten in ihrer Studie u. a. ein spezielles TMS-Doppelpulsprotokoll, bei dem ein erster unterschwelliger (konditionierender) und ein zweiter überschwelliger TMS-Puls im Abstand weniger Millisekunden über der Repräsentation des ersten Zwischenknochenmuskels der Hand (*M. interosseus dorsalis manus I*, FDI) appliziert wurde (*short-interval intracortical inhibition*, SICI). Dieses kurze Interstimulus-Intervall erlaubt es, eine intrakortikale Hemmung (ICI) zu induzieren, die sich in einer Reduzierung der MEP-Amplitude des zweiten Pulses äußert. Die Autoren fanden nach der Intervention eine Reduktion der ICI in der IG, jedoch nicht in der KG. Zudem gab es, unabhängig von Gruppe, einen signifikanten Zusammenhang dieser Disinhibition mit der Retentionsleistung ($r = .50$).

In der Studie von Ostadan et al. (2016) wurden ausdauerinduzierte Veränderungen in der kortikospinalen Erregbarkeit (MEP-Amplitude) mittels Einzelpuls-TMS über der Repräsentation des FDI erfasst. Wie bereits erwähnt (s. o.), unterschied sich die Retentionsleistung lediglich tendenziell zwischen IG und KG. Unabhängig von der Intervention gab es eine positive Korrelation zwischen dem Anstieg der kortikospinalen Erregbarkeit und besserer Retentionsleistung ($r_s = .46$). Diese Korrelation war noch stärker ausgeprägt, wenn in der Analyse ausschließlich die Daten der IG berücksichtigt wurden ($r_s = .63$).

Die Studie von McGregor et al. (2017) ist die bislang einzige, in der eine längerfristige Ausdauerintervention (12 Wochen) in Verbund mit Verhaltensdaten und TMS-Messungen untersucht wurde. Neben kortikalen Doppelpulsprotokollen (u. a. SICI) nutzten die Autoren mit der ipsilateralen Innervationsstille (iSP) auch ein Pulsprotokoll, mit dem die interkortikale Hemmung objektiviert werden kann. Die Autoren fanden, dass die IG im Vergleich zur KG eine signifikante Zunahme der iSP aufwies, was auf eine verbesserte funktionelle Konnektivität schließen lässt. Die Veränderungen der iSP-Dauer korrelierten signifikant mit der Veränderung in diversen Parametern der Handfunktion.

3.3 Studien mit Elektroenzephalografie (EEG)

Mit der EEG wird die elektrische Aktivität des Gehirns als Funktionsäußerung kortikaler und subkortikaler Hirnstrukturen aufgezeichnet. Hier konnte lediglich eine Studie ausfindig gemacht werden. Dal Maso et al. (2018) überprüften, ob die Durchführung einer akuten Ausdauer-Nachbelastung zu einer Effektivierung des motorischen Lernens führt und ob Korrelationen zwischen Lernleistung und EEG-Parametern bestehen. Die Autoren analysierten einerseits die ereigniskorrelierte Desynchronisation (ERD) als Indikator der Aktiviertheit des Gehirns und andererseits die funktionelle Konnektivität (FC), also die Korreliertheit der bioelektrischen Signalzeitverläufe der einzelnen Elektroden. Die EEG-Ergebnisse zeigten eine signifikant stärkere Reduzierung der Beta-Band-ERD der IG im Vergleich zur KG, die von den Autoren als Effizienzsteigerung der Gedächtniskonsolidierung interpretiert wird. Zudem zeigte die IG einen Anstieg der FC insbesondere in sensomotorischen Arealen. Korrelative Analysen zwischen den EEG-Daten und der Retention ergaben kein konsistentes Bild für die FC, jedoch wurde in der IG ein signifikanter Zusammenhang zwischen der 24-h-Retention und ausdauerinduzierten Veränderungen der ERD in präfrontalen und sensomotorischen Elektroden festgestellt. Die Zusammenhänge lagen zwischen $r_T = .45$ und $r_T = .61$.

3.4 Studien mit Magnetresonanztomographie (MRT)

Trotz des Umstandes, dass bereits mehrere Studien begünstigende Effekte längerfristiger Ausdauerinterventionen auf die funktionelle und strukturelle Plastizität des Gehirns berichten (van der Stouwe, van Busschbach, Vries, Cahn, Aleman & Pijnenborg, 2018), wurde die Verhaltensrelevanz solcher Veränderungen bislang kaum untersucht (vgl. Taubert et al., 2015; Stillman et al., 2016). Eine Vorannahme der bereits geschilderten eigenen Dissertation (Lehmann, 2018) war, dass ausdauerinduzierte und lerninduzierte Plastizität miteinander interagieren und damit die Basis einer verbesserten Lernfähigkeit bilden. In der Tat zeigte sich, dass sich die Zwischengruppendifferenzen zwischen IG und KG bzgl. der Stabilometer-Lernrate (s. o.) statistisch durch ausdauerinduzierte Veränderungen der Hirnstruktur, insbesondere in der frontotemporalen weißen Substanz, erklären lassen (signifikanter Mediationseffekt). Dies suggeriert, dass die Intervention über die Beeinflussung des Informationstransfers im Gehirn die zukünftige motorische Lernleistung beeinflusste.

4. Diskussion und Ausblick

Während sich die bisherige Forschung zur Beeinflussung des motorischen Lernprozesses hauptsächlich in der optimalen Gestaltung des Übungsprozesses erschöpfte (vgl. Magill, 2011; Schnabel, Krug & Panzer, 2007), werden aktuell verstärkt Interventionsstrategien untersucht, mit denen die Mechanismen

des Lernens im ZNS direkt moduliert werden können. Beispielhaft sind die Methoden der nichtinvasiven Hirnstimulation zu nennen, die jedoch oft kleine und variable Effektstärken in Bezug auf spätere Lernerfolge aufweisen (Lopez-Alonso et al., 2018) und auch ethisch nicht unumstritten sind (Ragert, 2016). In diesem Überblick wurden die neuromodulatorischen Potenzen von Ausdauerinterventionen und ihr Transfer auf motorische Lernprozesse beleuchtet.

Die vorliegende Evidenz aus den Verhaltensstudien macht deutlich, dass die zeitliche Platzierung *akuter Ausdauerinterventionen* im Verhältnis zur Akquisition der Fertigkeit von hoher Bedeutung ist (Thomas, Beck et al., 2016). Die Befundlage zum positiven Effekt akuter *Nachbelastungen* auf motorisches Lernen ist relativ homogen, was gleichermaßen für einfache Laborparadigmen wie komplexe Aufgaben gilt. Diesem Effekt könnte eine höhere Resistenz motorischer Gedächtnisspuren gegenüber Interferenzen zugrunde liegen (Rhee et al., 2016; Lauber et al., 2017; Jo et al., 2018). Diese Forschungsergebnisse verdeutlichen das Potenzial der Nachaktivierung für diverse Anwendungsfelder des Sports, darunter Leistungssport (Taubert & Krug, 2018) oder Neurorehabilitation (Nepveu et al., 2017).

Hingegen ist die Befundlage zu akuten *Vorbelastungen* als gemischt zu betrachten. Insbesondere deutet die Evidenz bei komplexen Fertigkeiten darauf hin, dass hohe Intensitäten aus sportpraktischer Sicht nicht empfehlenswert sind - es sei denn, die Ausbildung der Ermüdungsresistenz ist explizites Trainingsziel. Dabei scheint es unerheblich, ob die konditionell vorbelasteten Effektoren gleichzeitig auch in die Lernaufgabe involviert sind oder nicht (vgl. Helm et al., 2017). Gleichwohl ist festzuhalten, dass niedrig- bis moderat-intensive Vorbelastungen komplexe motorische Leistungen und Lernprozesse nicht negativ beeinflussen. So zeigt eine Metaanalyse mit 28 Studien eine positive aggregierte Effektstärke ($g = 0.15$) für moderate Ausdauer-, Kraft- oder Gleichgewichts-Belastungen, jedoch eine deutlich negative Effektstärke ($g = -0.86$) für intensivere Vorbelastungen (McMorris et al., 2015).

Vorliegende Befunde auf Ebene zugrundeliegender *Mechanismen* legen nahe, dass die positiven Effekte der Nachaktivierung mit einer gesteigerten kortikalen Erregbarkeit (Ostadan et al., 2016) bzw. einer ökonomischeren Arbeitsweise des Gehirns korrelieren (Dal Maso et al., 2018). Akute Voraktivierungen standen hingegen mit einer reduzierten kortikalen Inhibition (Stavrinou & Coxon, 2017) und einer gesteigerten LTP-ähnlichen Plastizität in Verbindung (Mang et al., 2014). Besonders der Umstand, dass akute Vorbelastungen zu theoretisch positiven Effekten auf die Neuroplastizität (vgl. auch Singh & Staines, 2015), aber nicht konsistent zu besseren Lernergebnissen führen, verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer Forschung. Bekannt ist, dass längere Ausdauerbelastungen im Bereich der Dauerleistungsgrenze zu einer verstärkten intrakortikalen Hemmung führen (Sidhu, Lauber, Cresswell & Carroll, 2013), die sich nachteilig auf Plastizität und Lernen auswirken könnten. Andere Studien zeigen, dass die Effektivität akuter Ausdauerbelastungen vom

initialen Fitnesslevel (Lulic, El-Sayes, Fassett & Nelson, 2017) als auch von Erbanlagen (DRD2-Genotyp) abhängig ist (Mang et al., 2017).

Entgegen unserer Vorannahmen (Voss et al., 2013; Taubert et al., 2015) zeigt vorliegende Übersicht auch, dass ausdauerinduzierte BDNF-Veränderungen nicht konsistent mit besseren Lernleistungen korrelieren. Hier sind einerseits methodische Probleme der BDNF-Messung zu diskutieren (Pareja-Galeano et al., 2015), andererseits ist die Bedeutung peripher gemessener BDNF-Konzentrationen für Prozesse im menschlichen ZNS noch aufzuklären.

Trotz positiver Effekte *längerfristiger Ausdauerinterventionen* auf nachfolgende motorische Lernprozesse, die sich bei unterschiedlichsten Probandenkollektiven übereinstimmend zeigen (Bakken et al., 2001; Quaney et al., 2009; Taubert & Krug, 2015; McGregor et al., 2017; Lehmann, 2018), ist dieses Feld bislang am wenigsten beforscht. Die Ergebnisse von McGregor et al. (2017) verdeutlichen, dass ein möglicher *Mechanismus* hinter diesen Befunden in einer veränderten interhemisphärischen Kommunikation zu suchen sein könnte. Andernorts konnte gezeigt werden, dass strukturelle Veränderungen des Gehirns, insbesondere der weißen Substanz, eine hohe Varianzaufklärung bzgl. der Gruppenunterschiede in den motorischen Lernleistungen voraktiverter und ruhender Untersuchungsgruppen liefert (Lehmann, 2018).

Aus den Resultaten dieses Überblicks ergeben sich Anknüpfungspunkte für die grundlagen- und anwendungsorientierte sportwissenschaftliche Forschung. Da im Bereich akuter Nachaktivierungen sowie längerfristiger Voraktivierungen positive Effekte auf das motorische Lernen gefunden wurden, ist es lohnenswert, in systematischer Weise die Effektivität verschiedener Belastungsgefüge bei unterschiedlichen Zielgruppen zu untersuchen. Der aktuelle Forschungsstand indiziert, dass der neuromodulatorische Effekt akuter Nachbelastungen sowie längerfristiger Ausdauerinterventionen maßgeblich von der Belastungsintensität bestimmt wird. Neurobiologisch könnte dies dadurch zu erklären sein, dass nur bei intensiven Ausdauerbelastungen das im Skelettmuskel anfallende Laktat vermehrt im Gehirn aufgenommen wird, um dort begünstigend auf diverse neuroplastische Prozesse zu wirken (für eine weiterführende Diskussion s. Gundersen, Storm-Mathisen & Bergersen, 2015; Taubert et al., 2015; Lehmann, 2018). Ist diese Annahme über den Wirkmechanismus zutreffend, so sollte die Mindest-Belastungsintensität im Bereich der *lactate threshold* liegen, da es erst hier zu einer vermehrten Laktataufnahme in das Gehirn kommt (Ide, Schmalbruch, Quistorff, Horn & Secher, 2000).

Des Weiteren ist ggw. ein Mangel an Untersuchungen in ökologisch-validen Settings zu konstatieren. Auffällig ist zudem, dass die vorliegenden Studien nur selten mehrgelenkige Kriteriumsaufgaben einsetzen, die komplexe Anforderungen an die motorische Kontrolle stellen. Der Umstand, dass sich in der Motorikforschung Befunde bei einfachen Aufgaben häufig nicht auf komplexe Fertigkeiten übertragen lassen (Wulf & Shea, 2002), verdeutlicht den For-

schungsbedarf. Gänzlich unbekannt ist zudem, ob der Effekt von Ausdauerinterventionen abhängig vom initialen Fertigkeitensniveau bzw. der Lernphase ist. Speziell für die Forschung im Leistungssport wäre es interessant, ob die Effizienz von Technikblöcken (Neumaier, 1997) durch die Vorschaltung einer mehr-tägigen Ausdauerintervention gesteigert werden kann.

Vielversprechend ist nicht zuletzt die weitere Untersuchung neurobiologischer Wirkmechanismen von Ausdauerinterventionen. Dies könnte einerseits durch die vermehrte Einbeziehung von Mediatoranalysen als statistische Prüfverfahren erfolgen (Stillman et al., 2016). Zur Aufklärung kausaler Mechanismen könnte der Ansatz der virtuellen Läsionen aus der Neurowissenschaft nutzbringend eingesetzt werden. Eine bessere Kenntnis der Mechanismen könnte es perspektivisch erlauben, die Effekte von Ausdauerinterventionen auch jenen Menschen zugänglich zu machen, die aufgrund von Krankheit, Verletzung oder Alter nicht (mehr) in der Lage sind, sich sportlich zu betätigen.

Literatur²

Baird, J. F., Gaughan, M. E., Saffer, H. M., Sarzynski, M. A., Herter, T. M., Fritz, S. L. et al. (2018). The effect of energy-matched exercise intensity on brain-derived neurotrophic factor and motor learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 156, 33–44.

Dal Maso, F., Desormeau, B., Boudrias, M.-H. & Roig, M. (2018). Acute cardiovascular exercise promotes functional changes in cortico-motor networks during the early stages of motor memory consolidation. *NeuroImage*, 174, 380–392.

Ferrer-Uris, B., Busquets, A., Lopez-Alonso, V., Fernandez-Del-Olmo, M. & Angulo-Barroso, R. (2017). Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through acute exercise. *PLoS ONE*, 12 (4), e0175296.

Helm, E. E., Matt, K. S., Kirschner, K. F., Pohlig, R. T., Kohl, D. & Reisman, D. S. (2017). The influence of high intensity exercise and the Val66Met polymorphism on circulating BDNF and locomotor learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 144, 77–85.

Jo, J. S., Chen, J., Riechman, S., Roig, M. & Wright, D. L. (2018). The protective effects of acute cardiovascular exercise on the interference of procedural memory. *Psychological Research* (i. Dr.).

Lauber, B., Franke, S., Taube, W. & Gollhofer, A. (2017). The effects of a single bout of exercise on motor memory interference in the trained and untrained hemisphere. *Neuroscience*, 347, 57–64.

²Die angegebene Literatur stellt nur eine Auswahl der im Beitrag aufgeführten Literatur dar. Die vollständige Liste ist beim Verfasser erhältlich.

- Lehmann, N. (2018). *Hirnstrukturelle Korrelate der Steigerung motorischer Lernprozesse durch eine neuromodulatorische Voraktivierung. Quer- und Längsschnittstudie*. Dissertation, Universität Leipzig.
- Mang, C. S., Snow, N. J., Campbell, K. L., Ross, C. J. D. & Boyd, L. A. (2014). A single bout of high-intensity aerobic exercise facilitates response to paired associative stimulation and promotes sequence-specific implicit motor learning. *Journal of Applied Physiology*, *117*, 1325–1336.
- Mang, C. S., Snow, N. J., Wadden, K. P., Campbell, K. L. & Boyd, L. A. (2016). High-Intensity Aerobic Exercise Enhances Motor Memory Retrieval. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *48*, 2477–2486.
- McGregor, K. M., Crosson, B., Mammino, K., Omar, J., García, P. S. & Nocera, J. R. (2017). Influences of 12-Week Physical Activity Interventions on TMS Measures of Cortical Network Inhibition and Upper Extremity Motor Performance in Older Adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 422.
- Ostadan, F., Centeno, C., Dalozze, J.-F., Frenn, M., Lundbye-Jensen, J. & Roig, M. (2016). Changes in corticospinal excitability during consolidation predict acute exercise-induced off-line gains in procedural memory. *Neurobiology of Learning and Memory*, *136*, 196–203.
- Quaney, B. M., Boyd, L. A., McDowd, J. M., Zahner, L. H., He, J., Mayo, M. S. et al. (2009). Aerobic exercise improves cognition and motor function post-stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, *23*, 879–885.
- Rhee, J., Chen, J., Riechman, S. M., Handa, A., Bhatia, S. & Wright, D. L. (2016). An acute bout of aerobic exercise can protect immediate offline motor sequence gains. *Psychological Research*, *80*, 518–531.
- Roig, M., Skriver, K., Lundbye-Jensen, J., Kiens, B. & Nielsen, J. B. (2012). A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS ONE*, *7* (9), e44594.
- Skriver, K., Roig, M., Lundbye-Jensen, J., Pingel, J., Helge, J. W., Kiens, B. et al. (2014). Acute exercise improves motor memory. Exploring potential biomarkers. *Neurobiology of Learning and Memory*, *116*, 46–58.
- Snow, N. J., Mang, C. S., Roig, M., McDonnell, M. N., Campbell, K. L. & Boyd, L. A. (2016). The Effect of an Acute Bout of Moderate-Intensity Aerobic Exercise on Motor Learning of a Continuous Tracking Task. *PLoS ONE*, *11* (2), e0150039.
- Statton, M. A., Encarnacion, M., Celnik, P. & Bastian, A. J. (2015). A Single Bout of Moderate Aerobic Exercise Improves Motor Skill Acquisition. *PLoS ONE*, *10* (10), e0141393.
- Stavrinou, E. L. & Coxon, J. P. (2017). High-intensity Interval Exercise Promotes Motor Cortex Disinhibition and Early Motor Skill Consolidation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *29*, 593–604.

Taubert, M. & Krug, J. (2015). Intensivierung motorischer Lernprozesse in den technisch-akrobatischen Sportarten durch neuromodulatorische Voraktivierungen. Labor- und Feldstudie. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2013/14* (S. 87–94). Köln: Sportverlag Strauß.

Taubert, M. & Krug, J. (2018). Steigerung des motorischen Lernens in den technisch-akrobatischen Sportarten durch Optimierung der Konsolidierungsphase. Eine Labor- und Feldstudie. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2016/17* (S. 93–100). Köln: Sportverlag Strauß.

Taubert, M., Villringer, A. & Lehmann, N. (2015). Endurance Exercise as an "Endogenous" Neuro-enhancement Strategy to Facilitate Motor Learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 692.

Thomas, R., Beck, M. M., Lind, R. R., Korsgaard Johnsen, L., Geertsen, S. S., Christiansen, L. et al. (2016). Acute Exercise and Motor Memory Consolidation. The Role of Exercise Timing. *Neural Plasticity*, 2016, 6205452.

Thomas, R., Johnsen, L. K., Geertsen, S. S., Christiansen, L., Ritz, C., Roig, M. et al. (2016). Acute Exercise and Motor Memory Consolidation. The Role of Exercise Intensity. *PLoS ONE*, 11 (7), e0159589.

Tompsonski, P. D. & Pendleton, D. M. (2018). Effects of the Timing of Acute Exercise and Movement Complexity on Young Adults' Psychomotor Learning. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 40, 240–248.

Wanner, P., Müller, T., Pfeifer, K. & Steib, S. (2018). Effects Of A Single Bout Of Aerobic Exercise On Motor Skill Acquisition And Consolidation. A Comparison Of Different Exercise Intensities. In M. H. Murphy, C. Boreham, G. de Vito & E. Tsolakidis (Eds.), *Book of Abstracts of the 23rd Annual Congress of the European College of Sport Science – 4th - 7th July 2018, Dublin – Ireland* (p. 364). Cologne: European College of Sport Science.

Verfasser

Lehmann, Nico, Dr. phil., Lehrstuhl für Trainingswissenschaft (Schwerpunkt Kognition und Bewegung), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg