

Oliver Seidel

(Meinel-Preisträger, 1. Preisträger Referate Studierende)

Neuronale Plastizität im Kontext Sport: Die Rolle des Gehirns bei unterschiedlichen motorischen Leistungsvoraussetzungen¹

Summary

Numerous studies have shown that physical activity not only has a major impact on the cardiovascular system and on the active and passive musculo-skeletal system, but can also shape and modify the brain. Regular exercise therefore leads to functional and structural adaptations of the brain in response to external stimuli and demands. The growing influence of neuroscientific research approaches in sports science makes it possible to explore this form of neuroplasticity in a sports-related context. In the following it will be shown to what extent previous research results in this field can provide starting points for future studies.

Zusammenfassung

Zahlreiche Studien belegen, dass körperliche Aktivität nicht nur einen großen Einfluss auf das Herz-Kreislauf-System sowie auf den aktiven und passiven Bewegungsapparat hat, sondern auch das Gehirn in großem Maße formen und verändern kann. Eine regelmäßige sportliche Betätigung führt demzufolge zu funktionellen und strukturellen Anpassungen des Gehirns als Antwort auf äußere Reize und Anforderungen. Durch den wachsenden Einfluss neurowissenschaftlicher Forschungsansätze in den Sportwissenschaften ist es möglich, diese Form der Neuroplastizität in einem sportlichen Kontext zu untersuchen.

¹ Betreuer der Arbeit ist Prof. PhD Patrick Ragert, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft der Sportwissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig

Im Folgenden wird gezeigt, inwiefern durch bisherige Forschungsergebnisse in diesem Bereich Anknüpfungspunkte für zukünftige Studien geliefert werden.

Schlagnvorte: Neuroplastizität, sportliche Expertise, Hirnaktivität, Hirnstimulation, motorische Leistungsvoraussetzungen

1. Das Phänomen der Neuroplastizität durch körperliche Aktivität

Zahlreiche Studien belegen, dass körperliche Aktivität nicht nur einen großen Einfluss auf das Herz-Kreislauf-System sowie auf den aktiven und passiven Bewegungsapparat hat, sondern auch das Gehirn in großem Maße formen und verändern kann. So hat eine regelmäßige sportliche Betätigung nicht nur einen positiven Einfluss auf die Funktion des Gehirns. Auch die Gehirnstruktur verändert sich und passt sich den neuen Anforderungen und Gegebenheiten an. Studien konnten zeigen, dass derartige neuroplastische Anpassungsprozesse bereits nach nur einer Trainingseinheit zu beobachten sind. Es ist bisher jedoch nur unzureichend erforscht, welche Rolle das Gehirn im Hinblick auf die motorische Leistungsfähigkeit und deren Voraussetzungen spielt. Die Rolle des Gehirns im Sport lässt sich daher in vielerlei Hinsicht bisher nur erahnen.

1.1 Exemplarische Studie zur Nutzung neurowissenschaftlicher Ansätze in den Sportwissenschaften

In einer aktuellen Studie konnte durch eine nicht-invasive, optische Hirnaktivitätsmessung mittels funktioneller Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) gezeigt werden, dass ein komplexes Gleichgewichtstraining zu trainingsinduzierten neuroplastischen Anpassungsprozessen führt (Seidel, Carius, Kenville & Rager, 2017). Diese Anpassungen wurden in Form von Konzentrationsabnahmen an oxygeniertem (oxyHb) und deoxygeniertem Hämoglobin (deoxyHb) in motorisch relevanten Hirnregionen quantifiziert und sowohl bei Ausdauersportlern (EA, Experten in den Sportarten Lauf, Triathlon und Radsport) also auch bei Nicht-Sportlern (NA, Nicht-Experten) festgestellt. Darüber hinaus konnten auch differenzielle Effekte des Gleichgewichtstrainings diagnostiziert werden, da EA im Bereich des linkshemisphärischen primären Motorkortex (M1) eine stärkere Abnahme an deoxyHb im Vergleich zu NA aufwiesen. Aufgrund der Tatsache, dass EA auch bei der initialen Ausführung der Gleichgewichtsaufgabe eine geringere Konzentration an deoxyHb im Bereich des rechtshemisphärischen prämotorischen Kortex (PMC) und M1 offenbarten, unterstützen diese Ergebnisse die so genannte *neural efficiency hypothesis* von Dunst et al. (2014). Diese Hypothese geht davon aus, dass Experten – in diesem Fall Ausdauersportler – bei der Ausführung einer motorischen Aufgabe im Ver-

gleich zu Nicht-Experten über eine effizientere Nutzung neuronaler Ressourcen verfügen. Darüber hinaus konnte übergreifend über die Untersuchungsgruppen erstmals ein direkter Zusammenhang zwischen der gesteigerten Leistung auf Verhaltensebene und der kurzzeitigen funktionellen Neuroplastizität in Form einer Abnahme an oxyHb im Bereich des rechtshemisphärischen unteren Parietallappens (IPL) und M1 beschrieben werden. Weiter konnte gezeigt werden, dass das verwendete komplexe Gleichgewichtstraining neben einer Verbesserung des statischen Gleichgewichts ebenso eine Abnahme der Muskelaktivität im M. tibialis anterior (vorderer Schienbeinmuskel) induzieren konnte. Dieses Phänomen deutet auf eine effizientere und ökonomischere Bewegungsausführung hin. Durch den multimodalen Forschungsansatz der Studie konnten erstmals nicht nur trainingsinduzierte Anpassungen auf Verhaltensebene beobachtet werden, sondern zusätzlich auch auf kortikaler (fNIRS) und neuromuskulärer (mittels Elektromyografie, EMG) Ebene. Die Ergebnisse der Studie deuten demzufolge darauf hin, dass ein mehrjähriges Ausdauertraining die Mechanismen der Neuroplastizität in motorisch relevanten Hirnregionen unterstützen kann.

Weitere Details sowie eine ausführliche Darstellung und Diskussion der Ergebnisse von Seidel et al. (2017) sind unter folgendem Link zu finden: <http://jn.physiology.org/content/118/3/1849.long>

1.2 Anknüpfungspunkte an bisherige Forschungsergebnisse

Die beschriebene Studie zeigt beispielhaft, inwiefern die Sportwissenschaften durch neurowissenschaftliche Forschungsansätze und –methoden bereichert werden können. Sie untersuchte erstmals das Phänomen der kurzzeitigen funktionellen Neuroplastizität bei (hoch-)trainierten Sportlern. Diese Form der Expertiseforschung in einem sportlichen Kontext wurde in vorherigen Studien bisher nur sehr selten durchgeführt, da die Aufmerksamkeit in der Vergangenheit vor allem Normalprobanden, Musikern oder älteren Menschen bzw. Patienten galt. Somit ergeben sich für zukünftige Studien viele offene Fragestellungen, die einerseits die Anpassung des Gehirns in Folge sportlicher Expertise (Vergleich Experten vs. Nicht-Experten) und andererseits sportartspezifische Effekte und Unterschiede im Hinblick auf neuroplastische Anpassungsprozesse in den Fokus des Interesses nehmen.

Durch den zunehmenden Einfluss der Neurowissenschaften in den Sportwissenschaften wächst gleichzeitig die Bedeutung neurowissenschaftlicher Untersuchungsmethoden in einem sportlichen Kontext. Auf der einen Seite bieten die Methoden der nicht-invasiven Bildgebung die Möglichkeit, die Aktivität des Gehirns während bzw. in Folge einer motorischen Aufgabe zu quantifizieren. Auf der anderen Seite lässt sich die Hirnaktivität mittels Stimulationsmethoden ebenso modulieren, was wiederum zu Effekten auf Verhaltensebene führen kann.

Um diese Methoden im Bereich der Grundlagenforschung zielführend anzuwenden, stellt sich das Modell der motorischen Leistungsvoraussetzungen (Hartmann, Minow & Senf, 2011) als ein geeigneter Forschungsgegenstand heraus. Die im Folgenden ausführlich beschriebenen exemplarischen Forschungsmöglichkeiten widmen sich mit der Ausdauer- und der Schnelligkeitsfähigkeit zwei motorischen Leistungsvoraussetzungen, die in einer Vielzahl an sportlichen Aktivitäten die Grundlage der sportlichen Leistung bilden. Diese konzeptionellen Forschungsvorhaben sollen dabei helfen, die Arbeitsweise des Gehirns im Hinblick auf diese beiden Fähigkeiten besser zu verstehen. Darüber hinaus sollen neuronale Korrelate sportlicher Expertise identifiziert und mittels Neurostimulation die motorische Leistungsfähigkeit moduliert werden.

Die Ausdauerfähigkeit, eine primär energetisch determinierte Leistungsvoraussetzung, steht dabei im Mittelpunkt der ersten Untersuchungsmöglichkeit. Ziel ist es, die Aktivität des Gehirns während einer standardisierten Ausdauerbelastung zu erfassen. Dies ermöglicht Einblicke in die Funktionsweise des Gehirns sowie die Anpassung an unterschiedliche Intensitäten. Neben dieser Form der Beobachtung des Gehirns bietet die Neurowissenschaft darüber hinaus die Möglichkeit der Beeinflussung der motorischen Leistungsfähigkeit. Mittels nicht-invasiver Hirnstimulation soll demzufolge in einem zweiten Forschungsvorhaben gezeigt werden, dass die Schnelligkeitsfähigkeit, eine primär informationell determinierte Leistungsvoraussetzung, gezielt von außen gesteigert werden kann. Da in beiden Fällen neben Nicht-Experten auch Experten in verschiedenen Sportarten untersucht werden, versprechen die Ergebnisse neuartige Erkenntnisse hinsichtlich neuroplastischen Anpassungsprozessen im Allgemeinen sowie sportartspezifischen Besonderheiten auf neuronaler Ebene im Speziellen.

2. Forschungsmöglichkeit 1: Einfluss unterschiedlicher Belastungsintensitäten auf die zerebrale Oxygenierung während einer Fahrrad-Ergometrie: Ein Vergleich zwischen Experten und Nicht-Experten

2.1 Theoretischer Hintergrund und Zielstellung

Die Darstellung funktioneller Vorgänge im Gehirn rückt sowohl in den neuroals auch in den sportwissenschaftlichen Disziplinen immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses, da die Entwicklung und Vielfalt der Untersuchungstechniken in den letzten Jahren maßgeblich vorangeschritten ist. Zunächst war die Messung der Hirnaktivität hauptsächlich auf elektrophysiologische Methoden beschränkt. Im Laufe der Zeit entwickelten sich darüber hinaus magnetresonanztomographische, nuklearmedizinische sowie optische Ansätze und Verfahren zur funktionellen Bildgebung des Gehirns. Durch die Weiterentwicklung und Optimierung der funktionellen Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) ist es nun möglich, die arealspezifische Aktivität unter sport-spezifischen Bedingungen,

das heißt während komplexen Körperbewegungen, darzustellen. In diesem Punkt ist der klare Vorteil der fNIRS gegenüber weiteren bildgebenden Verfahren wie der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) oder der Elektroenzephalografie (EEG) zu sehen.

Die Anzahl an Studien, die sich mit dem Einsatz von fNIRS während sportlicher Bewegungen beschäftigen, steigt stetig. Bisherige Untersuchungen wurden beispielsweise in Sportarten bzw. Bewegungen wie Tischtennis (Balardin, Zimeo Morais, Furucho, Trambaiolli, Vanzella, Biazoli & Sato, 2017), Jonglage (Carius, Andrä, Clauß, Ragert, Bunk & Mehnert, 2016) oder Kraftsport (Kenville, Maudrich, Carius & Ragert, 2017) durchgeführt. Als eine weitere geeignete Bewegung stellte sich bereits in vorangegangenen fNIRS-Studien das Radfahren heraus (Lin, Chen & Lin, 2013; Lin, Lin & Chen, 2012; Piper, Krueger, Koch, Mehnert, Habermehl, Steinbrink, Obrig & Schmitz, 2014; Sukal-Moulton, Campos, Stanley & Damiano, 2014). Vor allem Piper et al. (2014) konnten durch einen Vergleich zwischen Radfahren unter Laborbedingungen (Ergometer) und im Feld zeigen, dass fNIRS äußerst zuverlässig bei einer solchen sport-spezifischen Bewegung angewendet werden kann.

Offen bleibt bislang jedoch die Frage, welchen Einfluss der Widerstand beim Radfahren auf einem Ergometer auf die kortikale Aktivierung hat und inwiefern es diesbezüglich Unterschiede zwischen Experten und Nicht-Experten gibt. Diese Ergebnisse könnten wichtige Erkenntnisse liefern, die Rolle des Gehirns während einer sportlichen Belastung besser zu verstehen und dadurch eine potentielle Methode der Diagnostik zu etablieren. Darüber hinaus können wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der effektiven Arbeit des Gehirns bei Experten gewonnen werden. Das Ziel dieses Forschungsansatzes ist es demzufolge, intensitätsabhängige kortikale Aktivierungen in einem motorisch relevanten Areal (primärer Motorkortex, M1) darzustellen. Dadurch soll ein Beitrag geleistet werden, die Verwendung von fNIRS im sportlichen Kontext weiter zu etablieren.

2.2 Untersuchungsmethoden

Zur nicht-invasiven Messung der Hirnaktivität wird mit der funktionellen Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) ein Messverfahren verwendet, welches ähnlich wie das fMRT auf den Grundsätzen der zerebralen Hämodynamik beruht (Boas, Dale & Franceschini, 2004; Buxton, Uludağ, Dubowitz & Liu, 2004; Obrig, Hirth, Junge-Hülsing, Döge, Wolf, Dirnagl & Villringer, 1996; Villringer & Chance, 1997). Dabei handelt es sich um ein optisches bildgebendes Verfahren im Bereich des kurzwelligen Infrarotlichts, mit dessen Hilfe die Aktivität des Gehirns indirekt über den Sauerstoffgehalt der Gewebe gemessen wird. Die Verwendung von nahinfrarotem Licht im Bereich von 700 bis 1000 Nanometern begründet sich dadurch, dass Licht in diesem Spektrum Gewebe besonders gut durchdringen kann (Pereira, Linden & Weinberg, 2007). Die dynamischen

Änderungen des Sauerstoffgehalts des Blutes werden daher durch die Schädeldecke hindurch gemessen. Hieraus können aufgrund des Prinzips der neurovaskulären Kopplung Rückschlüsse auf Aktivierungen in der Großhirnrinde abgeleitet werden. Die Messungen basieren darauf, dass der rote Blutfarbstoff Hämoglobin, welcher der Hauptsauerstofftransporteur im Körper ist, seine Farbe mit dem Sauerstoffgehalt ändert. In dem genannten Wellenbereich von 700 bis 1000 Nanometer wird das Licht hauptsächlich durch die beiden Farbräger oxygeniertes und deoxygeniertes Hämoglobin absorbiert, das heißt, je mehr Blut sich im Gewebe befindet, desto weniger Licht geht hindurch. Somit kann anhand der Lichtdurchlässigkeit des Gewebes die Hämoglobinkonzentration bestimmt werden und anhand der Farbe der Sauerstoffgehalt.

Bei einer fNIRS-Messung wird dem Probanden, ähnlich dem EEG, eine Haube auf den Kopf gesetzt, worauf definierte Kanäle, bestehend aus Lichtsendern und Lichtempfängern, angebracht sind. Mittels dieser Kanäle werden die Konzentrationsänderungen von oxygeniertem und deoxygeniertem Hämoglobin arealspezifisch bestimmt. Neuronale Aktivität lässt sich demzufolge durch einen Anstieg von oxygeniertem und einen simultanen Abfall von deoxygeniertem Hämoglobin definieren (Obrig et al., 1996). Für die Messungen des beschriebenen Forschungsansatzes wird eine Konfiguration verwendet, welche die Oxygenierung im bilateralen Beinareal des primären Motorkortex (M1 leg) erfassen soll.

Mit der Spirometrie soll ein leistungsdiagnostisches Verfahren zum Einsatz kommen, welches Auskunft über die Leistungsfähigkeit der Probanden gibt. Mit Hilfe einer Atemgasmaske können während einer Belastung (Spiroergometrie) verschiedene Parameter des Lungen- und Atemvolumens gemessen und aufgezeichnet werden. Dazu gehören unter anderem belastungsinduzierte Reaktionen von Herz, Kreislauf, Atmung und Stoffwechsel sowie die qualitative und quantitative Untersuchung der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit. Der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu, da sie neben der Leistungsfähigkeit auch Auskunft über die individuelle Ausbelastung einer Versuchsperson gibt. Das Tragen einer solchen Atemgasmaske, auch in Kombination mit einer fNIRS-Kappe, stellt keine Beeinträchtigungen für die Probanden dar und ist ein etabliertes Verfahren in spirometrischen Leistungsdiagnostiken.

Für die Bewegungsaufgabe wird ein elektrisches Fahrrad-Ergometer mit stufenlos einstellbarem Widerstand verwendet. Zur Bestimmung der individuellen maximalen Leistung wird vor der eigentlichen Untersuchung ein Rampentest durchgeführt, wie er bereits bei anderen Studien zum Einsatz kam (Chicharro, Pérez, Vaquero, Lucía & Legido, 1997). Nach einem 5-minütigen Warm-Up bei 50 Watt, wird der Widerstand in der Folge nach jeweils 30 Sekunden um 15 Watt erhöht. Der Test wird abgebrochen, wenn der Proband nicht mehr in der Lage ist, den Widerstand zu überwinden bzw. die vorgegebene Trittfrequenz einzuhalten. Mit der daraus gewonnen maximalen Leistung können an-

schließlich die individuellen relativen Leistungen berechnet werden, die für die nachfolgende Hauptuntersuchung verwendet werden. Für diese wird ein Blockdesign gewählt, bei dem die individuellen relativen Widerstände in einer bestimmten Anzahl absolviert werden müssen. Getrennt werden diese Aktivitätsphasen von aktiven Pausephasen, in denen der Proband ohne Widerstand weiter pedaliert.

Durch vorherige Studien ist bereits bekannt, dass derartige Belastungen nicht nur den zerebralen Blutfluss erhöhen, sondern auch Auswirkungen auf den Blutdruck sowie auf extrazerebrale Blutgefäße im Kopf (z. B. Skalp-Durchblutung) haben. Da die verwendete fNIRS-Methode durchaus sensibel auf derartige Einflüsse reagiert, wird versucht, diese in Anlehnung an Kenville et al. (2017) mit Hilfe eines Short-Distance-Kanals (SD-Kanal) zu kontrollieren und minimieren.

2.3 Hypothesen und Erwartungen

In Anlehnung an Auger et al. (2016) und Kenville et al. (2017) kann man bei diesem Forschungsansatz von einer intensitätsabhängigen Steigerung der zerebralen Oxygenierung im bilateralen Beinareal des primären Motorkortex ausgehen. Weiterhin lassen sich differentielle Unterschiede zwischen Experten und Nicht-Experten erwarten, die sich, in Anlehnung an die *neural efficiency hypothesis* von Dunst et al. (2014), durch jeweils geringere Oxygenierungsgrade bei Experten im Vergleich zu Nicht-Experten äußern.

3. Forschungsmöglichkeit 2: Effekte transkranieller Gleichstromstimulation des primären Motorkortex auf die Reaktionszeit und Tapping-Leistung: Ein Vergleich zwischen Sportlern und Nicht-Sportlern

3.1 Theoretischer Hintergrund und Zielstellung

Eine Vielzahl an Studien deutet darauf hin, dass körperliche Aktivität zu spezifischen Veränderungen auf funktioneller und struktureller Ebene der Hirnorganisation führt (Bullitt, Rahman, Smith, Kim, Zeng, Katz & Marks, 2009; Colcombe, Erickson, Scalf, Kim, Prakash, McAuley, Elavsky, Marquez, Hu & Kramer, 2006; Erickson, Weinstein, Sutton, Prakash, Voss, Chaddock, Szabo, Mailey, White, Wojcicki, McAuley & Kramer, 2012; Voss, Prakash, Erickson, Basak, Chaddock, Kim, Alves, Heo, Szabo, White, Wojcicki, Mailey, Gothe, Olson, McAuley & Kramer, 2010). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass diese Neuroplastizität spezifisch für das individuelle Trainingsverhalten bzw. für die jeweilige Sportart ist (Jancke, Koeneke, Hoppe, Rominger & Hanggi, 2009; Park, Lee, Han, Lee, Lee, Park & Im Rhyu, 2009; Schlaffke, Lissek,

Lenz, Brune, Juckel, Hinrichs, Platen, Tegenthoff & Schmidt-Wilcke, 2014). Auf funktioneller Ebene gelangten Lulic, El-Sayes, Fassett und Nelson (2017) mittels transkranieller Magnetstimulation (TMS) zu der Erkenntnis, dass sich körperlich sehr aktive Probanden von weniger aktiven hinsichtlich der Neigung zu trainingsinduzierter kurzfristiger Neuroplastizität unterscheiden. Bezüglich der Hirnstruktur konnte durch eine Studie von Meier, Topka und Hanggi (2016) gezeigt werden, dass Handballspieler ein erhöhtes Volumen an grauer Substanz (GM) im Handareal des primären Motorkortex (M1) aufweisen, während sich Ballett-Tänzerinnen durch mehr GM im Fußareal des M1 auszeichnen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die beobachteten strukturellen Anpassungsvorgänge sportartspezifisch sind und sich in jenen Hirnregionen äußern, die mit der neuronalen Verarbeitung von sportartspezifischen Fähigkeiten verbunden sind.

Das Ziel dieses Forschungsansatzes ist somit die sportartspezifische Untersuchung der Rolle von M1 bei der Ausführung einfacher motorischer Testaufgaben (einfache Reaktionszeit und Tapping-Frequenz). Hierzu wird die transkranielle Gleichstromstimulation (tDCS) verwendet, um gezielt die Hirnfunktion in M1 zu modulieren und dadurch eine mögliche Verhaltensveränderung zu induzieren.

tDCS ist eine nicht-invasive Methode zur Modulation der Erregbarkeit bestimmter Hirnareale durch Applikation eines schwachen Gleichstroms auf der Kopfhaut. Hierbei ist eine Steigerung (mittels anodaler tDCS) oder eine Verminderung (mittels kathodaler tDCS) der arealspezifischen Erregbarkeit möglich. Mehrere Studien konnten zeigen, dass anodale tDCS motorischer Hirnregionen zu positiven Effekten auf Verhaltenesebene führen kann. Hinsichtlich des anodalen tDCS-Effekts bei Reaktionszeit-Aufgaben ist die aktuelle Studienlage jedoch als inkonsistent zu bezeichnen. Positive Effekte konnten vor allem bei seriellen und Wahlreaktionsaufgaben nachgewiesen werden (Drummond, Hayduk-Costa, Leguerrier & Carlsen, 2017; Hupfeld, Ketcham & Schneider, 2017; Nitsche, Schauenburg, Lang, Liebetanz, Exner, Paulus & Tergau, 2003; Verissimo, Barradas, Santos, Miranda & Ferreira, 2016). Bei Studien mit simpleren Einfachreaktionen sind die Befunde eher widersprüchlich, da sowohl von verbesserten Reaktionszeiten (Carlsen, Eagles & MacKinnon, 2015) als auch von keinerlei Effekten (Horvath, Carter & Forte, 2016) berichtet wird. Der Einfluss von anodaler tDCS auf Tapping-Aufgaben wurde bisher nur durch wenige Studien untersucht. Das Hauptaugenmerk lag dabei vor allem auf (seriellen) Fingertapping-Aufgaben (Boehringer, Macher, Dukart, Villringer & Pleger, 2013; Lang, Siebner, Ward, Lee, Nitsche, Paulus, Rothwell, Lemon & Frackowiak, 2005; Saimpont, Mercier, Malouin, Guillot, Collet, Doyon & Jackson, 2016). Hinsichtlich frequenzorientierten Hand- bzw. Fußtapping-Aufgaben fehlen bis dato jegliche Erkenntnisse.

Das Ziel dieser Forschungsmöglichkeit besteht darin, die Effekte von anodaler tDCS auf die Ausführung einfacher motorischer Tests unter sportartspezifi-

schen Aspekten zu untersuchen. Dazu sollen die einfache Reaktionszeit auf visuelle Reize sowie die Tapping-Leistung der oberen und unteren Extremität sowohl während anodaler tDCS als auch während einer Scheinstimulation des bilateralen M1-Beinareals erfasst werden. Dabei wird der Frage nachgegangen, welche der Untersuchungsgruppen eine stärkere Leistungszunahme durch anodale tDCS aufweist und ob sportartspezifische Unterschiede zu erkennen sind. Da die Stimulation über dem M1-Beinareal erfolgt, dient die Messung der einfachen Reaktionszeit sowie der Tapping-Leistung der Hand als Kontrolle für die lokale Spezifität tDCS-induzierter Verhaltenseffekte. Zusätzlich soll mittels Magnetresonanztomographie (MRT) untersucht werden, inwiefern sich die Probandengruppen auf funktioneller und struktureller Ebene des Gehirns unterscheiden und ob individuelle Variationen der Hirnfunktion und Hirnstruktur die initialen und tDCS-induzierten Verhaltensleistungen in den oben genannten Testaufgaben vorhersagen können. Die gewonnenen Erkenntnisse können im Zuge der Grundlagenforschung dabei behilflich sein, sportartspezifische Effekte der Neuroplastizität besser zu verstehen. Darüber hinaus liefert diese Studie wichtige Erkenntnisse über die Effektivität der tDCS zur Modulation einfacher motorischer Aufgaben, die mit der unteren Extremität durchgeführt werden.

3.2 Untersuchungsmethoden

Bei allen Probanden wird vor Beginn der tDCS-Experimente eine MRT-Untersuchung (3T MRT) an einem separaten Tag durchgeführt, um neurostrukturelle und neurofunktionelle Korrelate sportlicher Expertise zu untersuchen. Hiermit wird vor allem darauf abgezielt, die initialen motorischen Leistungen und durch die tDCS-Stimulation induzierten Leistungsveränderungen zu erklären. Bei der MRT-Untersuchung werden Sequenzen verwendet, um sowohl die graue als auch die weiße Substanz des Gehirns zu charakterisieren.

Die Verhaltenstests zur Bestimmung von einfacher Reaktionszeit und Tapping-Leistung werden mit Hilfe von vier Kontaktplatten durchgeführt. Erfasst wird zum einen die Reaktionszeit vom Beginn des Stimulus bis zum Auslösen auf der Kontaktplatte. Während der Tapping-Aufgabe muss der Proband in einer definierten Zeit so viele Kontakte wie möglich auf der Platte auslösen. Bei diesem Test wird die durchschnittliche Tapping-Frequenz während der festgelegten Testdauer erfasst. Die beiden beschriebenen Verhaltenstests werden in einem Testblock mehrmals sowohl mit der rechten und linken Hand als auch mit dem rechten und linken Fuß durchgeführt.

Nach den initialen Tests beginnt die Stimulation mit einem transkraniellen Gleichstromstimulator. Den Probanden wird randomisiert entweder eine anodale oder eine Sham-(Schein-)Stimulation über dem bilateralen Beinareal des M1 appliziert. Es wird für insgesamt 20 Minuten mit einer Intensität von bis zu 2 mA stimuliert. Die tDCS-Elektroden werden für die Stimulation über dem bila-

teralen Beinareal des primären Motorkortex (M1) (Anode) sowie auf der medialen supraorbitalen Region (Kathode) angebracht und mittels elastischer Bänder fixiert. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit und Verringerung der Impedanz werden die tDCS-Elektroden in einer Elektrolytlösung (NaCl) getränkt. Nach der Hälfte der 20-minütigen Stimulationszeit sowie im Anschluss daran führen die Probanden erneut die Reaktionszeit- und Tapping-Tests durch. Der dritte Untersuchungstag läuft identisch ab wie Tag 2, mit dem Unterschied, dass die Probanden die jeweils andere Stimulationsart (anodale oder sham tDCS) erhalten.

3.3 Hypothesen und Erwartungen

Bei diesem Forschungsansatz wird erwartet, dass anodale tDCS-Stimulation über dem Beinareal des primären Motorkortex zu spezifischen Verhaltensänderungen in der Ausführung der einfachen Reaktionszeit- und Tappingsaufgaben mit dem Fuß (und nicht mit der Hand) im Vergleich zur Schein-Stimulation führt (Devanathan & Madhavan, 2016). Weiterhin wird erwartet, dass sich die initialen Leistungen sowie die tDCS-induzierten Verhaltensänderungen in den motorischen Aufgaben durch individuelle Unterschiede in Hirnstruktur und -funktion erklären lassen. Diese Korrelationen kann man vor allem in motorischen Arealen wie M1, premotorischer Kortex (PMC), Cerebellum oder sensorimotorisches Areal (SMA) erwarten (Hulsdunker, Struder & Mierau, 2016).

Zusätzlich wird auf einem exploratorischen Level erwartet, dass Sportler bessere initiale Leistungen sowie stärkere tDCS-induzierte Verhaltensänderungen im Vergleich zu Nicht-Sportlern zeigen (Banissy & Muggleton, 2013). Außerdem stellt sich die Frage, inwiefern es diesbezüglich differentielle Unterschiede zwischen verschiedenen Sportarten gibt.

4. Schlussfolgerungen

Die beschriebenen Forschungsansätze für zukünftige Studien im Rahmen der Grundlagenforschung verdeutlichen auf der einen Seite das große Potential von nicht-invasiven bildgebenden Verfahren im Bereich der Sportwissenschaften. Durch die voranschreitende Weiterentwicklung von portablen Systemen sind in Zukunft vermehrt kortikale Untersuchungen von komplexen sportlichen Bewegungen möglich. Auf der anderen Seite zeigen diese Beispiele, wie groß und vielfältig die Forschungslücke in diesem Themenfeld bisher ist und welche Möglichkeiten sich dadurch für zukünftige wissenschaftliche Fragestellungen ergeben. Vor allem im Hinblick auf das Zusammenspiel von sportlicher Expertise, Sportartspezifik und Neuroplastizität bieten sich unzählige Chancen und Anknüpfungspunkte.

Schlussendlich können die daraus gewonnenen zukünftigen Erkenntnisse die Sportwissenschaften in vielerlei Hinsicht bereichern. Die Verwendung der be-

schriebenen Verfahren und Methoden kann einerseits Prozesse der Bewegungskontrolle und -ökonomisierung sowie des motorischen Lernens unterstützen. Andererseits ist auch ein Einsatz im Bereich der Leistungs- und Talentdiagnostik durchaus möglich und denkbar. Somit ergibt sich ein bisher kaum genutztes Potential in vielen Teilbereichen des Sports, angefangen vom Breitensport, über den Leistungs- und Spitzensport, bis hin zu gesundheitsorientierten Angeboten des Präventions- und Rehabilitationsports.

Literatur

- Auger, H., Bherer, L., Boucher, É., Hoge, R., Lesage, F. & Dehaes, M. (2016). Quantification of extra-cerebral and cerebral hemoglobin concentrations during physical exercise using time-domain near infrared spectroscopy. *Biomedical optics express*, 7 (10), 3826–3842. doi: 10.1364/BOE.7.003826.
- Balardin, J. B., Zimeo Morais, G. A., Furucho, R. A., Trambaiolli, L., Vanzella, P., Biazoli, C. et al. (2017). Imaging Brain Function with Functional Near-Infrared Spectroscopy in Unconstrained Environments. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 258. doi: 10.3389/fnhum.2017.00258.
- Banissy, M. J. & Muggleton, N. G. (2013). Transcranial direct current stimulation in sports training: potential approaches. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 129. doi: 10.3389/fnhum.2013.00129.
- Boas, D. A., Dale, A. M. & Franceschini, M. A. (2004). Diffuse optical imaging of brain activation: approaches to optimizing image sensitivity, resolution, and accuracy. *NeuroImage*, 23 Suppl 1, 275–288. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.07.011.
- Boehringer, A., Macher, K., Dukart, J., Villringer, A. & Pleger, B. (2013). Cerebellar transcranial direct current stimulation modulates verbal working memory. *Brain stimulation*, 6 (4), 649–653. doi: 10.1016/j.brs.2012.10.001.
- Bullitt, E., Rahman, F. N., Smith, J. K., Kim, E., Zeng, D., Katz, L. M. et al. (2009). The effect of exercise on the cerebral vasculature of healthy aged subjects as visualized by MR angiography. *AJNR. American journal of neuroradiology*, 30 (10), 1857–1863. doi: 10.3174/ajnr.A1695.
- Buxton, R. B., Uludağ, K., Dubowitz, D. J. & Liu, T. T. (2004). Modeling the hemodynamic response to brain activation. *NeuroImage*, 23 Suppl 1, 220–233. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.07.013.
- Carius, D., Andrä, C., Clauß, M., Ragert, P., Bunk, M. & Mehnert, J. (2016). Hemodynamic Response Alteration As a Function of Task Complexity and Expertise-An fNIRS Study in Jugglers. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 126. doi: 10.3389/fnhum.2016.00126.

- Carlsen, A. N., Eagles, J. S. & MacKinnon, C. D. (2015). Transcranial direct current stimulation over the supplementary motor area modulates the preparatory activation level in the human motor system. *Behavioural brain research*, 279, 68–75. doi: 10.1016/j.bbr.2014.11.009.
- Chicharro, J. L., Pérez, M., Vaquero, A. F., Lucía, A. & Legido, J. C. (1997). Lactic threshold vs ventilatory threshold during a ramp test on a cycle ergometer. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 37 (2), 117–121.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E. et al. (2006). Aerobic Exercise Training Increases Brain Volume in Aging Humans. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 61 (11), 1166–1170. doi: 10.1093/gerona/61.11.1166.
- Devanathan, D. & Madhavan, S. (2016). Effects of anodal tDCS of the lower limb M1 on ankle reaction time in young adults. *Experimental brain research*, 234 (2), 377–385. doi: 10.1007/s00221-015-4470-y.
- Drummond, N. M., Hayduk-Costa, G., Leguerrier, A. & Carlsen, A. N. (2017). Effector-independent reduction in choice reaction time following bi-hemispheric transcranial direct current stimulation over motor cortex. *PLoS one*, 12 (3), e0172714. doi: 10.1371/journal.pone.0172714.
- Dunst, B., Benedek, M., Jauk, E., Bergner, S., Koschutnig, K., Sommer, M. et al. (2014). Neural efficiency as a function of task demands. *Intelligence*, 42 (100), 22-30. doi: 10.1016/j.intell.2013.09.005.
- Erickson, K. I., Weinstein, A. M., Sutton, B. P., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L. et al. (2012). Beyond vascularization: aerobic fitness is associated with N-acetylaspartate and working memory. *Brain and behavior*, 2 (1), 32–41. doi: 10.1002/brb3.30.
- Hartmann, C., Minow, H.-J. & Senf, G. (2011). Sport verstehen - Sport erleben. Bewegungs- und trainingswissenschaftliche Grundlagen ; mit 52 Tabellen (2., überarb. Aufl.). Berlin: Lehmanns Media.
- Horvath, J. C., Carter, O. & Forte, J. D. (2016). No significant effect of transcranial direct current stimulation (tDCS) found on simple motor reaction time comparing 15 different stimulation protocols. *Neuropsychologia*, 91, 544–552. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.09.017.
- Hulsdunker, T., Struder, H. K. & Mierau, A. (2016). Neural Correlates of Expert Visuomotor Performance in Badminton Players. *Medicine and science in sports and exercise*, 48 (11), 2125-2134. doi: 10.1249/MSS.0000000000001010.
- Hupfeld, K. E., Ketcham, C. J. & Schneider, H. D. (2017). Transcranial direct current stimulation (tDCS) to the supplementary motor area (SMA) influences performance on motor tasks. *Experimental brain research*, 235 (3), 851–859. doi: 10.1007/s00221-016-4848-5.

Jancke, L., Koeneke, S., Hoppe, A., Rominger, C. & Hanggi, J. (2009). The architecture of the golfer's brain. *PloS one*, 4 (3), e4785. doi: 10.1371/journal.pone.0004785.

Kenville, R., Maudrich, T., Carius, D. & Ragert, P. (2017). Hemodynamic Response Alterations in Sensorimotor Areas as a Function of Barbell Load Levels during Squatting: An fNIRS Study. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 241. doi: 10.3389/fnhum.2017.00241.

Lang, N., Siebner, H. R., Ward, N. S., Lee, L., Nitsche, M. A., Paulus, W. et al. (2005). How does transcranial DC stimulation of the primary motor cortex alter regional neuronal activity in the human brain? *The European journal of neuroscience*, 22 (2), 495–504. doi: 10.1111/j.1460-9568.2005.04233.x.

Lin, P.-Y., Chen, J.-J. J. & Lin, S.-I. (2013). The cortical control of cycling exercise in stroke patients: an fNIRS study. *Human brain mapping*, 34 (10), 2381–2390. doi: 10.1002/hbm.22072.

Lin, P.-Y., Lin, S.-I. & Chen, J.-J. J. (2012). Functional near infrared spectroscopy study of age-related difference in cortical activation patterns during cycling with speed feedback. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 20 (1), 78–84. doi: 10.1109/TNSRE.2011.2170181.

Lulic, T., El-Sayes, J., Fassett, H. J. & Nelson, A. J. (2017). Physical activity levels determine exercise-induced changes in brain excitability. *PloS one*, 12 (3), e0173672. doi: 10.1371/journal.pone.0173672.

Meier, J., Topka, M. S. & Hanggi, J. (2016). Differences in Cortical Representation and Structural Connectivity of Hands and Feet between Professional Handball Players and Ballet Dancers. *Neural plasticity*, 2016, 6817397. doi: 10.1155/2016/6817397.

Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W. et al. (2003). Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human. *Journal of cognitive neuroscience*, 15 (4), 619–626. doi: 10.1162/089892903321662994.

Obrig, H., Hirth, C., Junge-Hülsing, J. G., Döge, C., Wolf, T., Dirnagl, U. et al. (1996). Cerebral oxygenation changes in response to motor stimulation. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81 (3), 1174–1183.

Park, I. S., Lee, K. J., Han, J. W., Lee, N. J., Lee, W. T., Park, K. A. et al. (2009). Experience-dependent plasticity of cerebellar vermis in basketball players. *Cerebellum (London, England)*, 8 (3), 334–339. doi: 10.1007/s12311-009-0100-1.

Pereira, V. J., Linden, K. G. & Weinberg, H. S. (2007). Evaluation of UV irradiation for photolytic and oxidative degradation of pharmaceutical compounds

in water. *Water research*, 41 (19), 4413-4423. doi: 10.1016/j.watres.2007.05.056.

Piper, S. K., Krueger, A., Koch, S. P., Mehnert, J., Habermehl, C., Steinbrink, J. et al. (2014). A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects. *NeuroImage*, 85 Pt 1, 64–71. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.06.062.

Saimpont, A., Mercier, C., Malouin, F., Guillot, A., Collet, C., Doyon, J. et al. (2016). Anodal transcranial direct current stimulation enhances the effects of motor imagery training in a finger tapping task. *The European journal of neuroscience*, 43 (1), 113–119. doi: 10.1111/ejn.13122.

Schlaffke, L., Lissek, S., Lenz, M., Brune, M., Juckel, G., Hinrichs, T. et al. (2014). Sports and brain morphology - a voxel-based morphometry study with endurance athletes and martial artists. *Neuroscience*, 259, 35–42. doi: 10.1016/j.neuroscience.2013.11.046.

Seidel, O., Carius, D., Kenville, R. & Ragert, P. (2017). Motor learning in a complex balance task and associated neuroplasticity. A comparison between endurance athletes and nonathletes. *Journal of neurophysiology*, 118 (3), 1849–1860. doi: 10.1152/jn.00419.2017.

Sukal-Moulton, T., Campos, A. C. de, Stanley, C. J. & Damiano, D. L. (2014). Functional near infrared spectroscopy of the sensory and motor brain regions with simultaneous kinematic and EMG monitoring during motor tasks. *Journal of visualized experiments : JoVE* (94). doi: 10.3791/52391.

Verissimo, I. S., Barradas, I. M., Santos, T. T., Miranda, P. C. & Ferreira, H. A. (2016). Effects of prefrontal anodal transcranial direct current stimulation on working-memory and reaction time. *Conference proceedings: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2016*, 1790–1793. doi: 10.1109/EMBC.2016.7591065.

Villringer, A. & Chance, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in neurosciences*, 20 (10), 435–442.

Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S. et al. (2010). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in aging neuroscience*, 2. doi: 10.3389/fnagi.2010.00032.

Verfasser

Seidel, Oliver, M.Sc. Sportwissenschaft, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Sportwissenschaftliche Fakultät Leipzig & Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften Leipzig, Abteilung Neurologie