

Patrick Ragert

Neuroscience meets Sport: Neuronale Aspekte motorischer Kontrolle und Strategien zur Leistungssteigerung¹

1. Einleitung

Aus heutiger Sicht ist hinreichend bekannt, dass das Gehirn formbar und schnell adaptierend ist. Die Anpassungsfähigkeit des Gehirns auf funktioneller und struktureller Ebene wird allgemein als Neuroplastizität bezeichnet. Vor einigen Jahrzehnten ging man jedoch noch davon aus, dass die Neuroplastizität lediglich in der frühkindlichen Entwicklungsphase des Menschen beobachtet werden kann und mit zunehmendem Alter die Verarbeitungsprozesse im Gehirn fest *verdrahtet*, d. h. nicht mehr veränderbar sind (Abb. 1).

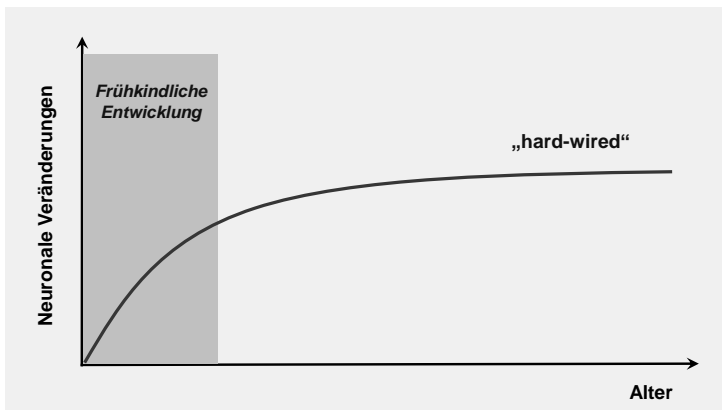


Abb. 1. Historische Sicht der Neuroplastizität über die Lebensspanne

¹ Antrittsvorlesung von Prof. PhD Patrick Ragert, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Abteilung Bewegung und Training; Sportwissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig

Daher war es nicht verwunderlich, dass es einige Jahrzehnte dauerte bis neuronale Anpassungsprozesse im Erwachsenenalter erstmals nachgewiesen werden konnten. Jenkins und Kollegen konnten in den 1990er Jahren am Affen zeigen, dass eine elektrische Reizung der Hand zu funktionellen Anpassungsprozessen im Bereich des somatosensorischen Kortex führt. Hier zeigte sich eine durch die Stimulation bedingte neuronale Umstrukturierung der korrespondierenden Zeigefingerrepräsentation im Gehirn, die aufgrund der veränderten Input-Statistik durch die elektrische Stimulation hervorgerufen wurde (Jenkins et al., 1990). Vergleichbare Befunde konnten wiederum einige Jahre später nach motorischem Lernen beobachtet werden. Tierexperimentelle Studien zeigten, dass das Erlernen einer spezifischen Greifbewegung zu Veränderungen der Handrepräsentation im Bereich des primären Motorkortex (M1) führte. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass diese lerninduzierten, bzw. gebrauchtsabhängigen funktionellen Veränderungen des Gehirns lokal spezifisch waren: Lediglich die an der Bewegung beteiligten Gliedmaßen zeigten funktionelle Anpassungsprozesse des Gehirns (Nudo et al., 1996).

Die Untersuchung der Neuroplastizität bei Menschen ist durch die methodische Weiterentwicklung nicht-invasiver, bildgebender Verfahren (fMRT, PET, NIRS, EEG, MEG) in den letzten Jahren stark voran geschritten. So ist es z. B. mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) möglich, dem Gehirn *beim Arbeiten* zuzusehen. Ein Vorteil dieser Methode ist die sehr gute räumliche Auflösung, die es ermöglicht, neuronale Netzwerke des gesamten Gehirns detailliert zu untersuchen. Mittels fMRT konnte z. B. gezeigt werden, dass motorisches Sequenzlernen über fünf Wochen zu einer Zunahme der Hirnaktivität im Bereich des M1 führt (Karni et al., 1995; Karni et al., 1998). Interessant hierbei war der Befund, dass diese lerninduzierten Veränderungen im Bereich des motorischen Systems zeitlich relativ persistent waren. Studien unserer Arbeitsgruppe wiesen vergleichbare Befunde bei dem Erlernen einer komplexen koordinativen Aufgabe innerhalb von M1 auf (McNamara et al., 2007). In dieser Studie konnten zudem zwar erstmals Unterschiede in der Ausprägung der funktionellen Neuroplastizität zwischen guten und schlechten Lernern im Bereich des motorischen Systems aufgezeigt werden. Einschränkungen in der Interpretation solcher Befunde ergeben sich jedoch durch die relativ schlechte zeitliche Auflösung der MRT-Methodik. Eine Möglichkeit zeitliche Aspekte der funktionellen Neuroplastizität näher zu untersuchen, bietet eine weitere neurowissenschaftliche Untersuchungsmethode, die sogenannte transkranielle Magnetstimulation (TMS) (Hallett, 2000).

Neuere Untersuchungen mittels MRT deuten darauf hin, dass motorisches Lernen nicht nur zu funktionellen, sondern auch zu strukturellen Anpassungsprozessen des Gehirns führt. So konnten Draganski und Mitarbeiter zeigen, dass das Erlernen einer 3-Ball-Kaskade zu einer Zunahme des Volumens der grauen Substanz in visuellen Hirnarealen führt (Draganski et al., 2004). Einige Jahre später konnten vergleichbare Befunde ebenfalls für die weiße Substanz, d. h. den Fasertrakten des Gehirns gefunden werden (Scholz et al., 2009).

Lange Zeit ungeklärt blieb jedoch die Frage, ob diese funktionellen und strukturellen Anpassungsprozesse des Gehirns überhaupt eine Verhaltensrelevanz im Lernprozess besitzen. Mit Hilfe von Korrelationen zwischen der lernbedingten Neuroplastizität und Verhaltensveränderungen konnte in einer Vielzahl von Studien unserer Arbeitsgruppe erstmals ein direkter linearer Zusammenhang hergestellt werden (Dinse et al., 2003; McNamara et al., 2007; Taubert et al., 2010; Taubert et al., 2011; Gryga et al., 2012; Sehm et al., 2014). Darüber hinaus konnte erstmals gezeigt werden, dass Variationen in der Hirnmorphologie vor dem motorischen Lernen den individuellen Lernerfolg vorhersagen können (Gryga et al., 2012).

Neben diesen wichtigen Befunden bezüglich lerninduzierter Neuroplastizität beim Menschen bleiben jedoch eine Reihe von Fragen nach den zugrunde liegenden Mechanismen sowie der zeitlichen und räumlichen Dynamik bislang ungeklärt. Ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen, sowie die Identifikation möglicher Einflussfaktoren der Neuroplastizität könnte dazu genutzt werden, die Bewegungskontrolle und das motorische Lernen über die Lebensspanne zu optimieren. Diese Aspekte sind Gegenstand meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft an der Sportwissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig (siehe Abb. 2).

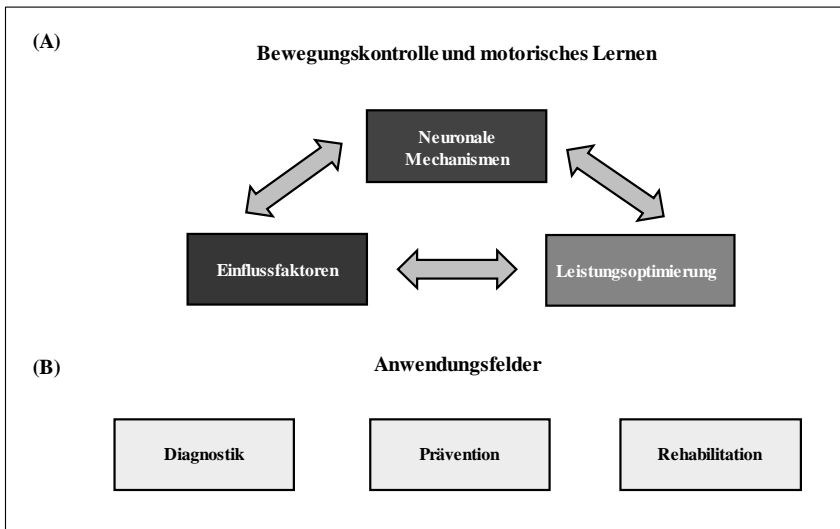


Abb. 2. (A) Forschungsschwerpunkte am Institut für ABTW (Abteilung für Bewegung und Training) und deren mögliche Anwendungsfelder (B)

2. Neuronale Mechanismen der Bewegungssteuerung und des motorischen Lernens

Aufbauend auf den oben genannten Studien soll am Institut für ABTW systematisch erforscht werden, wie sich das Gehirn bei hoch komplexen Bewegungsabläufen im sportlichen Kontext (technisch-akrobatische Sportarten, Leichtathletik etc.) verändert, eine Frage, die bislang unzureichend erforscht wurde. Dabei stehen Fragen der zeitlichen, räumlichen und mechanistischen Ausprägung der Neuroplastizität im Vordergrund und sollen mittels moderner neurowissenschaftlichen Untersuchungsmethoden (MRT, TMS, NIRS und EEG) systematisch untersucht werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Herangehensweise besteht darin, schon während der Bewegungsausführung wichtige Informationen über den Zeitverlauf von funktionellen Umstrukturierungen neuronaler Netzwerke zu erlangen. Die Untersuchungsmethoden sollen auch im Bereich der Leistungsdiagnostik etabliert werden. Ziel ist es (A) neuronale Marker für optimale Leistungsfähigkeit im Spitzensport zu identifizieren und (B) im Verlauf des Trainingsprozesses sowie im langfristigen Leistungsaufbau die funktionellen und strukturellen Veränderungen des Gehirns näher zu quantifizieren. Solche Untersuchungen können in naher Zukunft dazu genutzt werden, etablierte Trainingskonzepte zu optimieren.

3. Einflussfaktoren auf die motorische Kontrolle und das motorische Lernen

Neuroplastizität beim Menschen kann durch eine Vielzahl von intrinsischen und extrinsischen Faktoren beeinflusst werden. So konnte meine Arbeitsgruppe am Beispiel von professionellen Musikern zeigen, dass ein langjähriges Training von Bewegungsabläufen zu spezifischen Anpassungsprozessen auf funktioneller und struktureller Ebene in motorisch relevanten Hirnarealen führt (Vollmann et al., 2014). Interessanterweise gibt es vergleichbar wenige Studien zur Neuroplastizität im Bereich des Sports. Kürzlich konnte eine Studie, die am Institut für ABTW durchgeführt wurde, erstmals neuronale Korrelate von motorischer Schnelligkeit bei Leistungssportlern identifizieren (Wenzel et al., 2014). Dabei wiesen Schnellkraftathleten im Vergleich zu Ausdauerathleten deutlich mehr graue Substanz im Bereich des Kleinhirns auf. Unsere Ergebnisse verdeutlichen, dass abhängig von spezifischen Trainingsregimen, differenzielle neuroplastische Veränderungen des Gehirns beobachtet werden können. Andererseits haben Einschränkungen in der motorischen Kontrolle nach neurologischen Erkrankungen oder im Altersgang (Sehm et al., 2014) einen Einfluss auf zentralnervale Anpassungen im Rahmen von Lernprozessen.

Basierend auf diesen Befunden sollen am Institut für ABTW mögliche Einflussfaktoren der motorischen Kontrolle und des motorischen Lernens und dessen neuronale Korrelate im Kontext des Freizeit- und Leistungssports, dem Alters-

gang und bei neurologischen Erkrankungen näher charakterisiert werden. Eine bessere Charakterisierung möglicher Einflussfaktoren auf die Neuroplastizität kann auch dazu genutzt werden, bestehende Präventions- und Rehabilitationsmaßnahmen zu steuern und zu optimieren. Bislang weniger gut erforschte Faktoren (Geschlecht, Händigkeit, genetische Prädisposition, Aufmerksamkeit, Neurotransmitter, Schlaf etc.), welche die Bewegungskontrolle und das motorische Lernen potentiell beeinflussen können, sollen in diesem Kontext ebenfalls systematisch untersucht werden.

4. Strategien zur Optimierung von Bewegungsabläufen und zur Leistungssteigerung

Neuroplastizität als Grundlage adaptiven menschlichen Handelns ist essentiell für die Bewältigung hoch komplexer Aufgaben im Alltagsleben. Effektive Strategien zur Steigerung der Leistungsfähigkeit setzen ein gutes Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen der Neuroplastizität voraus. Grundlegende Kenntnisse über Maßnahmen zur Leistungssteigerung sind dabei nicht nur im Bereich des Leistungssports wichtig, um bestehende Trainingskonzepte zu optimieren. Aufgrund wissenschaftlicher Studien wissen wir, dass mit zunehmendem Alter Teilaspekte der kognitiven Leistungsfähigkeit und der motorischen Alltagskompetenz rückläufig sind. Daher kommt dem Verständnis der zugrunde liegenden neuronalen Mechanismen von Alterungsprozessen, insbesondere im Hinblick auf den demographischen Wandel, eine zunehmend große Bedeutung zu. Wir wissen heute, dass Alterungsprozesse auf neuronaler Ebene nicht irreversibel sind, sondern durch geeignete Interventionsstrategien verlangsamt bzw. abgeschwächt werden können. So konnte gezeigt werden, dass körperliche Aktivität und ein gesunder Lebensstil die altersbedingte Neuroplastizität modulieren kann (Erickson et al., 2011; Witte et al., 2014). Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass nicht-invasive Gehirnstimulationsverfahren (TMS, tDCS) über eine fokale Modulation der Hirnaktivität die Leistungsfähigkeit kurzfristig steigern können. So konnten wir mit Hilfe der transkraniellen Gleichstromstimulation (tDCS) zeigen, dass motorisches Sequenzlernen durch eine gezielte Stimulation bewegungsrelevanter Hirnareale deutlich gesteigert werden konnte (Vollmann et al., 2013). Aufgrund des nicht-invasiven Charakters ist die Nutzung der Gehirnstimulation auch ein interessanter Ansatzpunkt im Bereich der Rehabilitation von neurologischen Erkrankungen mit dem Ziel, motorische Defizite zu reduzieren und den Genesungsverlauf zu beschleunigen. Neben vielversprechenden Studien auf diesem Gebiet sind jedoch viele fundamentale Fragen bislang unverstanden. Aus diesen Gründen soll am Institut für ABTW systematisch untersucht werden, welche Hirnareale durch spezielle Interventionen moduliert werden und wie langanhaltend die induzierten Effekte auf neuronaler und Verhaltensebene sind. Hierbei besteht das Ziel darin, die Effektivität dieser Interventionen zu maximieren. Darüber hinaus ist geplant, die neuronalen Grundlagen neuartiger Interventionsstrategien (z. B.

Feedback, Belohnung, mentales Training, Action Observation, etc.) systematisch zu untersuchen und deren Effektivität im Kontext der Rehabilitation zu validieren.

Zusammenfassung

Zusammenfassend stehen gesellschaftlich bedeutende Themen wie die Erforschung von menschlichen Bewegungsabläufen über die Lebensspanne und deren trainings- bzw. lernbezogene Anpassungsfähigkeit im Zentrum meiner wissenschaftlichen Tätigkeit. Aus anwendungsorientierter Perspektive geht es darum, neuartige Interventionsstrategien zu entwickeln, die auf eine Verbesserung der Bewegungskoordination abzielen und den motorischen Lernprozess optimieren. Dazu müssen jedoch zunächst die zugrunde liegenden neuronalen Mechanismen ausreichend verstanden und Kenntnisse über deren systematische Veränderung gewonnen werden. Mittels neurowissenschaftlicher Untersuchungsmethoden ist es heutzutage möglich, tiefere Einblicke in die Arbeitsweise des Gehirns zu erhalten.

Interessanterweise existieren bislang nur wenige Forschungsansätze in den Bewegungs- und Trainingswissenschaften, die sich neurowissenschaftliche Untersuchungsmethoden zu Nutze machen. Meine bisherige wissenschaftliche Tätigkeit nimmt daher eine Schnittstellenfunktion auf diesem Gebiet ein. Ziel ist es, neuartige Erkenntnisse zugrunde liegender neuronaler Mechanismen der motorischen Kontrolle und des Lernens zu gewinnen und daraus ableitend innovative Forschungsansätze mit starkem Anwendungsbezug im Bereich der Bewegungs- und Trainingswissenschaft zu entwickeln.

Literatur

Dinse, H.R., Ragert, P., Pleger, B., Schwenkreis, P., & Tegenthoff, M. (2003). Pharmacological modulation of perceptual learning and associated cortical reorganization. *Science* 301, 91–94.

Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature* 427, 311–312.

Erickson, K.I., Voss, M.W., Prakash, R.S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kim, J.S., Heo, S., Alves, H., White, S.M., Wojcicki, T.R., Mailey, E., Vieira, V.J., Martin, S.A., Pence, B.D., Woods, J.A., McAuley, E., & Kramer, A.F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 108, 3017–3022.

Gryga, M., Taubert, M., Dukart, J., Vollmann, H., Conde, V., Sehm, B., Villringer, A., & Ragert, P. (2012). Bidirectional gray matter changes after complex motor skill learning. *Front Syst Neurosci* 6, 37.

Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature* 406, 147–150.

Jenkins, W.M., Merzenich, M.M., Ochs, M.T., Allard, T., & Guic-Robles, E. (1990). Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation. *J Neurophysiol* 63, 82–104.

Karni, A., Meyer, G., Jezzard, P., Adams, M.M., Turner, R., & Ungerleider, L.G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature* 377, 155–158.

Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M.M., Turner, R., & Ungerleider, L.G. (1998). The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 95, 861–868.

Mcnamara, A., Tegenthoff, M., Dinse, H., Buchel, C., Binkofski, F., & Ragert, P. (2007). Increased functional connectivity is crucial for learning novel muscle synergies. *Neuroimage*.

Nudo, R.J., Milliken, G.W., Jenkins, W.M., & Merzenich, M.M. (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *J Neurosci* 16, 785–807.

Scholz, J., Klein, M.C., Behrens, T.E., & Johansen-Berg, H. (2009). Training induces changes in white-matter architecture. *Nat Neurosci*.

Sehm, B., Taubert, M., Conde, V., Weise, D., Classen, J., Dukart, J., Draganski, B., Villringer, A., & Ragert, P. (2014). Structural brain plasticity in Parkinson's disease induced by balance training. *Neurobiol Aging* 35, 232–239.

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

Taubert, M., Lohmann, G., Margulies, D.S., Villringer, A., & Ragert, P. (2011). Long-term effects of motor training on resting-state networks and underlying brain structure. *Neuroimage*.

Vollmann, H., Conde, V., Sewerin, S., Taubert, M., Sehm, B., Witte, O.W., Villringer, A., & Ragert, P. (2013). Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) over supplementary motor area (SMA) but not pre-SMA promotes short-term visuomotor learning. *Brain Stimul* 6, 101–107.

Vollmann, H., Ragert, P., Conde, V., Villringer, A., Classen, J., Witte, O.W., & Steele, C.J. (2014). Instrument specific use-dependent plasticity shapes the anatomical properties of the corpus callosum: a comparison between musicians and non-musicians. *Front Behav Neurosci* 8, 245.

Wenzel, U., Taubert, M., Ragert, P., Krug, J., & Villringer, A. (2014). Functional and structural correlates of motor speed in the cerebellar anterior lobe. *PLoS One* 9, e96871.

Witte, A.V., Kerti, L., Hermannstadter, H.M., Fiebach, J.B., Schreiber, S.J., Schuchardt, J.P., Hahn, A., & Floel, A. (2014). Long-chain omega-3 fatty acids improve brain function and structure in older adults. *Cereb Cortex* 24, 3059–3068.

Verfasser

Patrick Ragert, Prof. PhD, Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft, Abteilung Bewegung und Training; Sportwissenschaftliche Fakultät, Universität Leipzig