

Das „bewegte“ Gehirn – Warum körperliche Bewegungen den Geist trainieren.

Vortragszusammenfassung zum Akademie-Forum Bildung „Bewegt leichter lernen – Ideen für Kita, Schule und Sportverein“ in der Akademie des Sports im Landessportbund Niedersachsen e.V., Hannover (2017).

© Prof. Dr. Kristian Folta-Schoofs, AG Neurodidaktik, Stiftung Universität Hildesheim

Nerven- und Gliazellen: Die Informationsverarbeitungseinheiten des Gehirns

Das Gehirn eines erwachsenen Menschen umfasst ein komplexes Informationsverarbeitungsnetzwerk aus etwa 100 Billionen Nervenzellen (s. g. Neurone; Pakkenberg & Gundersen, 1997; Azevedo et al., 2009), die als Grundbausteine des Nervensystems dafür verantwortlich zeichnen, den Organismus erfolgreich an seine Umwelt zu adaptieren. Dabei wird der größte Teil der Neurone bereits vor der Geburt ausgebildet. Neuere Forschungen zeigen, dass das Informationsverarbeitungsnetzwerk des zentralen Nervensystems neben Neuronen auch noch zwei Typen von Stützzellen (s. g. Gliazellen) enthält, nämlich Astrozyten und Oligodendrozyten.

Astrozyten. Astrozyten werden überwiegend nachgeburtlich und im Gehirn eines Menschen vorwiegend bis zu dessen 20. Lebensjahr neu gebildet. Sie finden sich in unmittelbarer Nähe zu den kleinsten Blutgefäßen, den Kapillaren, mit denen sie über ihre Endfüße einen direkten Kontakt herstellen. Sie sind als Teil der Blut-Hirn-Schranke in der Lage, den cerebralen Blutfluss zu regulieren und tragen im Gehirn aktiv zur Regulation des Elektrolyt- und Wasserhaushalts (und damit zur Regulation der Ionenverteilung im Extrazellulärraum) bei.

Astrozyten spielen zudem für die energetische Versorgung und den Metabolismus von Nervenzellen eine zentrale Rolle, indem sie mit Hilfe von Glukose-Transportermolekülen (GLUT) das Energiesubstrat Glukose aus den Kapillaren aufnehmen und über die zelleigene Glykolyse in Pyruvat und anschließend in Laktat umwandeln. Dieses Laktat stellen die Astrozyten benachbarten Nervenzellen, mit denen sie in Kontakt stehen, über gliale Monocarboxylattransporter (MCT) zur Verfügung. Neurone wandeln das bereitgestellte Laktat in Pyruvat um, das sie mithilfe von Sauerstoff effizient für die Herstellung von chemischer Energie in Form von Adenosintriphosphat (ATP) nutzen können.

Weiterhin sind Astrozyten in der Lage, modulierend (erregend oder hemmend) in die biochemischen Prozesse der Signalübertragung zwischen Nervenzellen einzugreifen.

Neuere Forschungen konnten zudem zeigen, dass Astrozyten neurotrophe bzw. neuroprotektive Substanzen (z. B. Brain Derived Neurotrophic Factor, BDNF) freisetzen, die Neurone vor schädigenden Prozessen und Substanzen (z. B. vor oxidativem Stress, der durch den Energieverbrauch aktiver Neurone entsteht) und vor kontrolliertem Zelltod (Apoptose) schützen (Krämer-Albers & Frühbeis, 2013).

Oligodendrozyten. Oligodendrozyten umwickeln mit ihren plattenförmigen fetthaltigen Ausläufern die Axone von benachbarten Neuronen – ein Prozess der Myelinisierung genannt wird. Diese axonale Ummantelung, die s. g. Myelinscheide, bewirkt innerhalb des Neurons eine sprunghafte (saltatorische) Weiterleitung von elektrischen Signalen entlang des Axons,

wodurch die Geschwindigkeit der Signalweiterleitung innerhalb eines Neurons gesteigert wird. Die Myelinisierung von Neuronen findet im Gehirn des Menschen weitestgehend nachgeburtlich und vorwiegend bis zu dessen 20. Lebensjahr statt, wobei sich die Axone von Neuronen des vorderen Großhirnbereichs, die für höhere kognitive und steuernde Funktionen (z. B. Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis und exekutive Kontrolle) verantwortlich zeichnen, zuletzt ummanteln.

Auch wenn die Myelinisierung bis zum jungen Erwachsenenalter als weitestgehend abgeschlossen gilt, werden Oligodendrozyten im Gehirn des Menschen noch bis zum 40. bis 50. Lebensjahr neu gebildet, da sie eine bedeutende Rolle für die Integrität der neuronalen Informationsverarbeitung spielen. Vergleichbar zu Astrozyten, produzieren nämlich auch Oligodendrozyten neurotrophe bzw. neuroprotektive Faktoren (z. B. BDNF), um die Funktionalität der axonalen Signalweiterleitung und das Überleben der zugehörigen Neurone durch eine Unterstützung des Stoffwechsels des Axons und seiner Axonkollaterale zu gewährleisten. Dabei stimulieren elektrisch aktive Neurone benachbarte Oligodendrozyten zur Abgabe von neuroprotektiven Faktoren, die wie „Care-Pakete“ dem oxidativen Stress aktiver Neurone entgegenwirken (Krämer-Albers & Frühbeis, 2013). Entfällt diese externe Versorgung mit schützenden Substanzen, so degenerieren die axonalen Verbindungen zwischen den Nervenzellen (Nave, 2010).

Vergleichbar zu den Astrozyten, gewinnen auch Oligodendrozyten ihre Energie vorwiegend durch den Prozess der Glykolyse, die sie den Axonen des Neurons in Form von Laktat zur Verfügung stellen (Morrison et al., 2013). Durch den kontinuierlichen wechselseitigen Signalaustausch zwischen Neuronen, Astrozyten und Oligodendrozyten (Frühbeis et al., 2013; Lewis, 2013), die gemeinsam Informationsverarbeitungseinheiten bilden, kann über die Modulierung der Energieversorgung sowie eine Steigerung oder Hemmung der Myelinsynthese (Krämer-Albers & Frühbeis, 2013) auch der Durchmesser von Axonen und von den das Axon umgebenden Myelinscheiden beeinflusst werden (McTigue & Tripathi, 2008). Dabei geht ein größerer Axondurchmesser typischerweise mit einer dickeren axonalen Ummantelung und einer Beschleunigung der axonalen Signalweiterleitung einher (und umgekehrt führt eine Reduzierung des Durchmessers von Axon und Myelinscheide zu einer verminderten Weiterleitungsgeschwindigkeit neuronaler Signale). Auf diese Weise können Oligodendrozyten vermutlich ganz unmittelbar die Geschwindigkeit der neuronalen Signalweiterleitung im zentralen Nervensystem (d. h. Gehirn und Rückenmark) modulieren. Neuere Forschung konnte zudem aufzeigen, dass auch Oligodendrozyten in der Lage sind, modulierend in die biochemische Signalübertragung am synaptischen Endknöpfchen einer Nervenzelle einzugreifen (Lin & Bergles, 2004; Krämer-Albers & Frühbeis, 2013).

Auswirkungen von Bewegung und körperlicher Aktivität auf die physische und psychische Gesundheit und Leistungsfähigkeit

Seit den 1980er Jahren belegen wissenschaftliche Studien die positiven Auswirkungen von Bewegung und körperlicher Aktivität auf die physische und psychische Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Menschen (z. B. Hollmann & Strüder, 2004; Davis et al., 2007, 2011; Sumic et al., 2007; Erickson & Kramer, 2009; Hillman et al., 2009a,b; Pontifex et al., 2009; Stroth et al., 2009; Diamond & Lee, 2011; Erickson et al., 2011; Kamijo et al., 2011; Chang et

al., 2012, 2013; Chapman et al., 2013; Hötting & Röder, 2013; Verburch et al., 2013; Chen et al., 2014, 2016; Fernández-Mayoralas et al., 2015; Maher et al., 2015).

Schon vorgeburtlich stimuliert die körperliche Aktivität der Mutter Prozesse der embryonalen Neuro- und Synaptogenese (d. h. der vorgeburtlichen Neubildung von Nervenzellen und Nervenzellverknüpfungen) sowie die Neubildung von Gliazellen (s. g. Gliogenese) und Ausbildung von Neuron-Glia-Verbindungen im Gehirn des heranwachsenden Fötus und Embryos (Eliot, 2002). Mit der Geburt verfügt das Neugeborene bereits über ein Informationsverarbeitungsnetzwerk, das den Säugling während der ersten Lebensmonate zu grundlegenden sensomotorischen Verhaltensleistungen befähigt. So ist ein Neugeborenes bereits kurz nach der Geburt in der Lage, den Kopf in die Richtung einer interessanten Schallquelle zu drehen (Field et al., 1980; Clifton et al., 1981). Zudem verfügt es über eine rudimentäre Auge-Hand-Koordination (Hofsten, 1982) und kann die Mimik eines Gegenübers intuitiv imitieren (Meltzoff & Kuhl, 1994; Meltzoff & Moore, 1994). Es wird diskutiert, dass zumindest ein Teil der sensomotorischen Koordinationsleistungen des Neugeborenen subcortikal (d. h. ohne Beteiligung der Hirnrinde) vermittelt sein könnten und mit einer zunehmenden Strukturierung und Ausdifferenzierung der Großhirnrinde cortical überformt werden (Tees, 1994). Für eine solche Überformung spricht die Tatsache, dass ein Teil der anfänglich zu beobachtenden sensomotorischen Fähigkeiten des Säuglings nach den ersten Lebensmonaten wieder zu verschwinden scheint, um sich kurze Zeit später erneut im Verhalten des Kindes zu manifestieren (Field et al., 1980; Hofsten, 1984; Abravanel & Sigafos, 1984).

Der Prozess der corticalen Überformung ermöglicht dem Heranwachsenden eine zunehmend bewusste körperliche Empfindsamkeit, Ausdrucks- und Bewegungsfähigkeit (Fediuk, 2008) und steigert das Bedürfnis, die eigene Umwelt in tätiger Auseinandersetzung (durch Betasten und Manipulieren) zu „begreifen“. Die frühkindliche Exploration der eigenen Umwelt trainiert die für zielgerichtete Bewegungen erforderlichen sensorischen und motorischen Verhaltensprogramme, wodurch motorische Aktionen im weiteren Entwicklungsverlauf zunehmend differenzierter, kraftvoller und koordinierter ausgeführt werden können (Black et al., 1987; Greenough & Chang, 1988; Jones & Greenough, 1996; Markham & Greenough, 2004).

Mit der Feinabstimmung von sensomotorischen Fähigkeiten wächst das Bedürfnis des Kindes, die Grenzen der eigenen Leistungsfähigkeit auszutesten. Folglich sucht es auch riskante Situationen auf, die eine Herausforderung bzw. ein Wagnis darstellen und geeignet sind, die bisher erlernten Fähigkeiten auf die Probe zu stellen. Durch sensomotorische Grenzerfahrungen lernt das Kind, den eigenen Fähigkeiten zu vertrauen und physikalische Umwelteigenschaften (z. B. Höhen, Weiten, Geschwindigkeiten oder Gewichte) präzise einzuschätzen. Das anfängliche Scheitern an einer Aufgabe (z. B. die Erfahrung, die ersten Meter des Baumstammes nicht überwinden zu können) kann dazu motivieren, durch anhaltendes Üben die Grenzen der eigenen Verhaltensmöglichkeiten aufzubrechen und systematisch zu erweitern. Auf der anderen Seite dient das wiederholte Scheitern an einer Aufgabe dazu, sensomotorische Schwächen und Grenzen der eigenen Verhaltensmöglichkeiten anzuerkennen. Auf diese Weise kann das eigene Verhalten zukünftig so ausgerichtet werden, dass potenzielle Risiken für lebensbedrohliche Unfälle und gesundheitliche Risiken reduziert werden.

Wirksamkeit des Sportunterrichts

Trotz der nachgewiesenen positiven Auswirkungen von Bewegung und körperlicher Aktivität auf die physische und psychische Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Menschen, zeigt gegenwärtig nur noch etwa die Hälfte der Kinder in Europa eine kumulierte moderate Bewegungsdauer von mehr als einer Stunde pro Tag (Brettschneider & Naul, 2004). Der sich in solchen Zahlen offenbarende kindliche Bewegungsmangel steigert die Wahrscheinlichkeit für sensomotorische Leistungseinbußen (Dordel, 2000; Raczek, 2002; Rusch & Irrgang, 2002; Bös, 2003), die insbesondere die Beweglichkeit, Koordinationsfähigkeit und Körperbeherrschung, jedoch weniger die Kraftausdauer betreffen (Ahnert et al., 2008). Sportvereine sowie Institutionen der frühkindlichen und kindlichen Bildung, Erziehung und Sorge sind in besonderer Weise aufgefordert, geeignete Bewegungsangebote anzubieten, die Kinder in ihrer körperlichen und geistigen Entwicklung optimal unterstützen. Seit den 1950er Jahren werden potenzielle Auswirkungen des Schulsports auf die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit von Schülerinnen und Schülern wissenschaftlich untersucht. Beispielsweise wurde in französischen Schulen zu Studienzwecken der Sportunterricht auf acht Stunden pro Woche angehoben (und entsprechend der Anteil der „klassischen“ Unterrichtsfächer reduziert). Der Vergleich mit Schulen, die das klassische Curriculum beibehalten hatten, erbrachte, dass die Kinder in Schulen, die einen erhöhten Anteil an Sportunterricht aufwiesen, nicht nur körperlich gesünder waren, sondern auch die besseren Schulleistungen aufwiesen (Shephard, 1997). Auch eine australische Studie (Dwyer et al., 1983), die an Grundschulern durchgeführt wurde, beobachtete eine Verbesserung der physischen Gesundheit in Folge einer einstündigen körperlichen Betätigung pro Tag, jedoch konnten für körperlich aktive Schülerinnen und Schüler keine Notenverbesserungen im Vergleich zu einer Kontrollgruppe (ohne tägliches Training) bestätigt werden. Auch eine US-amerikanische Studie (Sallis et al., 1999) fand keine signifikanten Zusammenhänge zwischen der körperlichen Aktivität und den Schulnoten der untersuchten Schülerinnen und Schüler einer Grundschule. Hingegen konnten neuere Studien zeigen, dass sich durch eine dreißigminütige Schulsporteinheit oder eine zehnminütige bilateral koordinative Übung eine Verbesserung der Aufmerksamkeitsleistung erzielen ließ (Budde et al., 2008; Hillman et al., 2009a; Kubesch et al., 2009; Chen et al., 2014). Bei Zehnjährigen führte eine dreißigminütige Fahrrad-Ergometereinheit bei moderater Intensität (60 bis 69 % der maximalen Herzrate) zu signifikanten Verbesserungen in einer Arbeitsgedächtnisaufgabe (Chen et al., 2016).

Während die Mehrheit der bisher publizierten Studien positive Auswirkungen von Bewegung und körperlicher Aktivität auf die physische Gesundheit und das subjektive Wohlbefinden bestätigen konnten, werden die möglichen Effekte auf die kognitive Leistungsfähigkeit immer noch kontrovers diskutiert. Die inkonsistente Befundlage lässt vermuten, dass nicht alle für den Sportunterricht gewählten Bewegungsangebote und Belastungsstufen gleichermaßen geeignet sind, um die kognitive Leistungsfähigkeit von Schülerinnen und Schülern zu fördern. Tatsächlich berichten Studien, die mit erwachsenen Probanden durchgeführt wurden, dass sich insbesondere eine aerobe körperliche Aktivität (d. h. Aktivität bei niedriger bis mittlerer Belastungsintensität) und bilateral koordinierende Bewegungen positiv auf die kognitive Leistungsfähigkeit auswirken. Eine Metaanalyse von Colcombe und Kramer (2003) deutet zudem darauf hin, dass die kognitiven Effekte eines

sportlichen Trainings erst messbar werden, wenn mindestens 30 Minuten lang der Puls der Probanden aus dem Ruhebereich heraus erhöht wurde (siehe auch Wischenka et al., 2016).

Neurobiologische Effekte von Bewegung und körperlicher Aktivität

Herholz et al. (1987) beobachteten in einer Fahrradergometeruntersuchung, dass erwachsene männliche Probanden (22 bis 36 Jahre alt) schon bei einer geringen Belastungsstufe von 25 *Watt* (das entspricht einem langsamen Gehen) eine signifikante Steigerung ihrer Gehirndurchblutung von durchschnittlich 13.5 % (im Vergleich zum Ruheausgangswert) erreichen konnten. Eine Erhöhung der Belastungsintensität auf 100 *Watt* steigerte die Durchblutung des Gehirns bereits um durchschnittlich 24.7 % (Herholz et al., 1987). In einer weiteren Studie konnten Hollmann et al. (1994) aufzeigen, dass koordinative Fingerbewegungen, analog dem Klavierspielen, zu Durchblutungssteigerungen der Großhirnrinde in einer Größenordnung zwischen 20 bis 30 % führten (Hollmann et al., 1994). Weitere Studien fanden, dass eine erhöhte Gehirndurchblutung mit einer gesteigerten Produktion von neurotrophen Faktoren (z. B. NGF, IGF-1, FGF-2, BDNF) einhergeht, wobei gegenwärtig besonders BDNF im Fokus der Forschung steht, da sich diese Signalsubstanz insbesondere im frontalen Cortex, Hippocampus und Cerebellum nachweisen lässt (Hollmann & Strüder, 2004), in Hirnregionen, die für exekutive Funktionen sowie Aufmerksamkeits-, Lern- und Gedächtnisprozesse von besonderer Bedeutung sind. Beispielsweise ist BDNF in der Lage, die adulte Neurogenese (d. h. die nachgeburtliche Neubildung von Nervenzellen) zu stimulieren, Neurone und synaptische Verbindungen vor Apoptose zu schützen und modulierend auf die Prozesse der hippocampalen Synaptogenese (d. h. der lernabhängigen Neubildung von synaptischen Verbindungen zwischen Neuronen) einzuwirken (Meeusen & De Meirleir, 1995; Benraiss et al., 2001; Huang & Reichardt, 2001). An Ratten konnten bereits positive Zusammenhänge zwischen der körperlichen Aktivität der Tiere und dem Zuwachs an hirnersorgenden Kapillaren sowie der Anzahl neuer neuronaler Verbindungen bestätigt werden (Jensen, 1998). Eriksson et al. (1998) testeten erwachsene Menschen und fanden auch hier einen positiven Zusammenhang zwischen der körperlichen Aktivität und der Intensität adulter Neurogenese. Ameri (2001) berichtete, dass sich die Anzahl neugebildeter Nervenzellen im Gehirn des Menschen bereits durch ein Ausdauertraining verdoppeln ließ. Lange Jahre war nicht bekannt, ob die neugebildeten Nervenzellen auch tatsächlich funktionelle Bedeutung besitzen und in das bestehende zentralnervöse Informationsverarbeitungsnetzwerk integriert werden können. Dieser Nachweis wurde inzwischen für den Hippocampus erbracht (Walk, 2011).

Neben der Neubildung und dem Schutz von Nervenzellen und Nervenzellverbindungen konnten tierexperimentelle Studien zeigen, dass Bewegung und körperliche Aktivität eine Erhöhung der Konzentration von exzitatorisch (erregend) und inhibitorisch (hemmend) wirkenden Neurotransmittern (insbesondere von Dopamin, Noradrenalin und Serotonin) bewirken (Meeusen & De Meirleir, 1995). Auch EEG- bzw. ERP-Studien an Kindern und Erwachsenen bestätigen positive Zusammenhänge zwischen der kardiorespiratorischen Fitness und spezifischen Veränderungen der elektrischen Hirnaktivität, die aktivitätsabhängige Veränderungen von neuronalen Verarbeitungsprozessen nahelegen

(Hillman et al., 2005, 2009b; Pontifex et al., 2011). Kamijo et al. (2011) beobachteten vergleichbare Veränderungen nach einem 9-monatigen Fitness-Trainingsprogramm für Kinder zwischen 7 und 9 Jahren. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass sich die in tierexperimentellen Studien gewonnenen Ergebnisse zu bewegungs- und aktivitätsabhängigen Veränderungen der biochemischen Signalübertragung zwischen Neuronen auch auf den Menschen (und insbesondere auch auf Kinder) übertragen lassen. Diese Annahme wird auch durch Fahrradergometeruntersuchungen unterstützt. Beispielsweise beobachteten Strüder et al. (1997) unter moderater Ergometerbelastung einen Anstieg von freiem Tryptophan im Blut von erwachsenen Probanden. Freies Tryptophan kann die Blut-Hirn-Schranke passieren und im Gehirn zu Serotonin synthetisiert werden, das stimmungsaufhellende Wirkung besitzt (Hollmann & Strüder, 2004). Neben neurophysiologischen Veränderungen im serotonergen System konnten Fahrradergometerstudien auch eine bewegungsinduzierte Erhöhung der Konzentration von endogenen opioiden Peptiden (alltagssprachlich als „Glückshormone“ bezeichnet) nachweisen (Arentz et al., 1986), die zu euphorischer Stimmung und einer verminderten Schmerzwahrnehmung (Analgesie) beitragen. Der in Bewegungsstudien nachgewiesene Anstieg der cerebralen Serotoninkonzentration in Verbindung mit einem Anstieg der Konzentration von endogenen opioiden Peptiden steht in guter Übereinstimmung zu den beobachteten Auswirkungen von sportlicher Betätigung auf die Zufriedenheit und das emotionale Wohlbefinden von Menschen (Fernández-Mayoralas et al., 2015; Maher et al., 2015).

Bewegung und körperliche Aktivität im Alter

Die durch aerobe körperliche Aktivität verursachte Erhöhung der Gehirndurchblutung und eine damit einhergehende Steigerung der zerebralen Verfügbarkeit von BDNF, von Neurotransmittern und endogenen opioiden Peptiden verdeutlichen, dass durch Bewegung und körperliche Aktivität die neuronale Lernfähigkeit (Neurogenese und synaptische Plastizität) stimuliert, die allgemeine Zufriedenheit und das emotionale Wohlbefinden gesteigert sowie möglicherweise auch psychischen Störungen und neurodegenerativen Erkrankungen vorgebeugt bzw. entgegengewirkt werden kann. Geeignete Bewegungsmöglichkeiten sollten aus diesen Gründen selbstverständlicher Bestandteil jeder lern- und gesundheitsförderlichen Umgebung sein. Die positiven Effekte von Bewegung und körperlicher Aktivität sind zudem nicht auf das Kindes- und Jugendalter beschränkt. Auch ältere Menschen können durch körperliche Bewegung und eine Steigerung ihrer Gehirndurchblutung ihre Aufmerksamkeits-, Lern- und Gedächtnisleistung günstig beeinflussen (Erickson et al., 2011). Inzwischen existieren zahlreiche Studien, die einen Zusammenhang zwischen der körperlichen Aktivität von gesunden Seniorinnen und Senioren (älter als 60 Jahre) und deren kognitiver Leistungsfähigkeit bestätigen (z. B. Colcombe et al., 2006; Sumic et al., 2007; Rehfeld et al., 2014). Vor allem für exekutive Funktionen, die für die Steuerung zielgerichteter Handlungen verantwortlich zeichnen, konnten signifikante Verbesserungen durch körperliches aerobes Training berichtet werden (Kramer et al., 1999; Colcombe & Kramer, 2003; Colcombe et al., 2006; Deley et al., 2007; Kramer & Erickson, 2007; Sumic et al., 2007; Hillman et al., 2008; Voelcker-Rehage et al., 2010). Dabei lassen die bisherigen Studien erkennen, dass auch im Alter Bewegungsformen

der Vorzug gegeben werden sollte, welche die allgemeine aerobe dynamische Ausdauer (z. B. Walking, Nordic Walking und Fahrrad fahren) sowie die Koordination (z. B. Tanzen) fordern (Hollmann & Strüder, 2004; Kattenstroth et al., 2010; Se-Hong et al., 2011; Kimura & Hozumi, 2012; Rehfeld et al., 2014). Vor allem langfristig orientierte und anhaltende Bewegungsinterventionen scheinen geeignet, die kognitive Leistungsfähigkeit im Alter zu erhalten oder sogar zu steigern. Dies unterstreicht die Bedeutung einer frühzeitigen Hinführung zu einer aktiven und bewegten Freizeitgestaltung (Rehfeld et al., 2014).

Referenzen:

- Abravanel, E., Sigafos, A. D. (1984). Exploring the presence of imitation during early infancy. *Child Development*, 55 (2), 381-392.
- Ahnert, J., Schneider, W., Bös, K. (2008). Entwicklung motorischer Fähigkeiten vom Vorschul- bis ins frühe Erwachsenenalter. In W. Schneider (Hrsg.), *Entwicklung von der Kindheit bis zum Erwachsenenalter* (pp. 23-42). Weinheim, Basel: Beltz.
- Ameri, A. (2001). Neue Nervenzellen in alten Gehirnen. Eine mögliche Rolle bei Reparatur- und Lernprozessen. *Extracta Psychiatrica/Neurologica*, 1/2, 12-16.
- Arentz, T., De Meirleir, K., Hollmann, W. (1986). Die Rolle der endogenen opioiden Peptide während Fahrradergometerarbeit. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 37, 210-218.
- Azevedo, F. A. C., Carvalho, L. R. B., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E. L., Leite, R. E. P., Jacob Filho, W., Lent, R., Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, 513 (5), 532-541. doi: 10.1002/cne.21974
- Benraiss, A., Chmielnicki, E., Lerner, K., Roh, D., Goldman, S. A. (2001). Adenoviral brain-derived neurotrophic factor induces both neostriatal and olfactory neuronal recruitment from endogenous progenitor cells in the adult forebrain. *Journal of Neuroscience*, 21 (17), 6718-6731.
- Bös, K. (2003). Motorische Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen. In W. Schmidt, I. Hartmann-Tews, W. D. Brettschneider (Hrsg.), *Erster Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (pp. 85-108). Schorndorf: Hofmann.
- Black, J. E., Sirevaag, A. M., Greenough, W. T. (1987). Complex experience promotes capillary formation in young rat visual cortex. *Neuroscience Letters*, 83 (3), 351-355.
- Brettschneider, W.-D., Naul, R. (2004). *Study on young people's lifestyles and sedentariness and the role of sport in the context of education and as a means of restoring the balance – Final report*. Paderborn: Verfügbar unter: http://eose.org/wp-content/uploads/2014/03/Study-on-young-people-lifestyles_20041.pdf (Letzter Zugriff: 11. Mai 2017).
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Petrabyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience Letters*, 441, 219-223.
- Chang, Y. K., Labban, J. D., Gapin, J. I., Etnier, J. L. (2012). The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Research*, 1453, 87-101.
- Chang, Y. K., Tsai, Y. J., Chen, T. T., Hung, T. M. (2013). The impacts of coordinative exercise on executive function in kindergarten children: An ERP study. *Experimental Brain Research*, 225 (2), 187-196. doi: 10.1007/s00221-012-3360-9
- Chen, A. G., Yan, J., Yin, H. C., Pan, C. Y., Chang, Y. K. (2014). Effects of acute aerobic exercise on multiple aspects of executive function in preadolescent children. *Psychology of Sport and Exercise*, 15, 627-636. doi: 10.1016/j.psychsport.2014.06.004
- Chen, A-G., Zhu, L.-N., Yan, J., Yin, H.-C. (2016). Neural basis of working memory enhancement after acute aerobic exercise: fMRI study of preadolescent children. *Frontiers in Psychology*, 7, article 1804. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01804

- Chapman, S. B., Aslan, S., Spence, J. S., DeFina, L. F., Keebler, M. W., Didehbani, N., Lu, H. (2013). Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 75. doi: 10.3389/fnagi.2013.00075
- Clifton, R., Morrongiello, B., Kulig, J., Dowd, J. (1981). Newborns' orientation towards sound: Possible implications for cortical development. *Child Development*, 52, 833-838.
- Colcombe, S., Kramer, A. (2003). Fitness effects on cognitive function of older adults: A meta-analytic study. *Psychological Science*, 14 (2), 125-130.
- Colcombe, S., Erickson, K., Scalf, P., Kim, J., Prakash, R., McAuley, E., Elavsky, S., Marquez, D., Hu, L., Kramer, A. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *Journals of Gerontology, Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 61 (119), 1166-1170.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., Boyle, C. A., Waller, J. L., Miller, P. H., Naglieri, J. A., Gregoski, M. (2007). Effects of aerobic exercise on overweight children's cognitive functioning: A randomized controlled trial. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 78 (5), 510-519. doi: 10.1080/02701367.2007.10599450
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., Allison, J. D., Naglieri, J. A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: A randomized, controlled trial. *Health Psychology*, 30 (1), 91-98. doi: 10.1037/a0021766
- Deley, G., Kervio, G., Van Hoecke, J., Verges, B., Grassi, B., Casillas, J. (2007). Effects of a one-year exercise training program in adults over 70 years old: A study with a control group. *Aging Clinical and Experimental Research*, 19, 310-315. doi: 10.1007/BF03324707
- Diamond, A., Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old, *Science*, 333 (6045), 959-964. doi: 10.1126/science.1204529
- Dordel, S. (2000). Veränderte Lebensbedingungen = Reduzierte motorische Leistungsfähigkeit. *Gesundheitssport und Sporttherapie*, 16, 209-216.
- Dwyer, T., Coonan, W., Leitch, D., Hetzel, B., Baghurst, R. (1983). An investigation of the effects of daily physical activity on the health of primary school students in South Australia. *International Journal of Epidemiologist*, 12 (3), 308-313.
- Eliot, L. (2002). *Was geht da drinnen vor? Die Gehirnentwicklung in den ersten fünf Lebensjahren*. Berlin: Berlin-Verlag.
- Erickson, K. I., Kramer, A. F. (2009). Aerobic exercise effects on cognitive and neural plasticity in older adults. *British Journal of Sports Medicine*, 43 (1), 22-24. doi: 10.1136/bjism.2008.052498
- 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., Meiley, 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108 (7), 2017-3022.
- Eriksson, P. S., Perfilieva, E., Björk-Eriksson, T., Alborn, A. M., Nordborg, C., Peterson, D. A., Gage, F. H. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nature Medicine*, 4 (11), 1313-1317. doi: 10.1038/3305
- Fediuk, F. (2008). *Inklusion als bewegungspädagogische Aufgabe: Menschen mit und ohne Behinderungen gemeinsam im Sport*. Baltmannsweiler: Schneider.
- Fernández-Mayoralas, G., Rojo-Pérez, F., Martínez-Martín, P., Prieto-Flores, M.-E., Rodríguez-Blázquez, C., Martín-García, S., Rojo-Abuín, J.-M., Forjaz, M.-J. (2015). Active ageing and quality of life: Factors associated with participation in leisure activities among institutionalized older adults, with and without dementia. *Aging and Mental Health*, 19 (11), 1031-1041. doi: 10.1080/13607863.2014.996734
- Field, J., Muir, D., Pilon, R., Sinclair, M., Dodwell, P. (1980). Infants' orientation to lateral sounds from birth to three months. *Child Development*, 51, 295-298.
- Frühbeis, C., Fröhlich, D., Kuo W. P., Amphornrat, J., Thielemann, S., Saab, A. S., Kirchhoff, F., Möbius, W., Goebels, S., Nave, K.-A., Schneider, A., Simons, M.,

- Klugmann, M., Trotter, J., Krämer-Albers, E.-M. (2013). Neurotransmitter-triggered transfer of exosomes mediates oligodendrocyte-neuron communication. *PLoS Biology*, 11 (7): e1001604. doi: 10.1371/journal.pbio.1001604
- Greenough, W. T., Chang, F. F. (1988). Plasticity of synapse structure and pattern in the cerebral cortex. In A. Peters, E. G. Jones (Eds.), *Cerebral Cortex* (pp. 391-440). New York: Plenum.
- Herholz, K., Buskies, B., Rist, M., Pawlik, G., Hollmann, W., Heiss, W. K. (1987). Regional cerebral blood flow in man at rest and during exercise. *Journal of Neurology*, 234 (1), 9-13.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9 (1), 58-65. doi: 10.1038/nrn2298
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., Kramer, A. F. (2009a). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159, 1044-1054.
- Hillman, C. H. (2009b). Aerobic fitness and cognitive development: Event-related brain potential and task performance indices of executive control in preadolescent children. *Developmental Psychology*, 45 (1), 114-129. doi: 10.1037/a0014437
- Hötting, K., Röder, B. (2013). Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37, 2243-2257. doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.04.005
- Hofsten, C. von (1982). Eye-hand coordination in the newborn. *Developmental Psychology*, 18 (3), 450-461.
- Hofsten, C. von (1984). Developmental changes in the organization of prereaching movements. *Developmental Psychology*, 20, 378-388.
- Hollmann, W., Strüder, H. (2004). Gehirngesundheit, -leistungsfähigkeit und körperliche Aktivität. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 54 (9), 265-266.
- Hollmann, W., Fischer, H. G., DeMeirleir, K., Herzog, H., Herholz, K., Feinendegen, L. E. (1994). The brain – regional cerebral blood flow, metabolism and psyche during ergometer exercise. In C. Bouchard, R. J. Shephard, T. Stephens (Eds.), *Physical activity, fitness, and health: International proceedings and consensus statement*. Champaign, Ill: Human Kinetics.
- Huang, E. J., Reichardt, L. F. (2001). Neurotrophins: Roles in neuronal development and function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 677-736. doi: 10.1146/annurev.neuro.24.1.677
- Jensen, E. (1998). *Teaching with the brain in mind*. Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development.
- Jones, T. A., Greenough, W. T. (1996). Ultrastructural evidence for increased contact between astrocytes and synapses in rats reared in a complex environment. *Neurobiology of Learning and Memory*, 65 (1), 48-56. doi: 10.1006/nlme.1996.0005
- Kamijo, K., Pontifex, M. B., O'Leary, K. C., Scudder, M. R., Wu, C.-T., Castelli, D. M., Hillman, C. H. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*, 14 (5), 1046-1058. doi: 10.1111/j.1467-7687.2011.01054.x
- Kattenstroth, J. C., Kolankowska, I., Kalisch, T., Dinse, H. R. (2010). Superior sensory, motor, and cognitive performance in elderly individuals with multiyear dancing activities. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 1-9. doi: 10.3389/fnagi.2010.00031
- Kimura, K., Hozumi, N. (2012). Investigating the acute effect of an aerobic dance exercise program on neurocognitive function in the elderly. *Psychology of Sport and Exercise*, 13, 623-629. doi: 10.1016/j.psychsport.2012.04.001
- Krämer-Albers, E.-M., Frühbeis, C. (2013). Lieferung auf Abruf. Exosomen als „Care“-Pakete von Gliazellen für gestresste Neurone. *Neuroforum*, 4/13, 146-152.
- Kramer, A. F., Erickson, K. I. (2007). Capitalizing on cortical plasticity: Influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in Cognitive Sciences*, 11 (8), 342-358. doi: 10.1016/j.tics.2007.06.009

- Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banisch, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R. (1999). Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature*, 400, 418-419. doi: 10.1038/22682
- Kubesch, S., Walk, L., Spitzer, M., Kammer, T., Lainburg, A., Heim, R., Hille, K. (2009). A 30-minute physical education program improves students' executive attention. *Mind, Brain, and Education*, 3, 235-242. doi: 10.1111/j.1751-228X.2009.01076.x
- Lewis, S. (2013). Glia: Transporting cargo from A to B. *Nature Reviews Neuroscience*, 14 (9), 589.
- Lin, S. C., Bergles, D. E. (2004). Synaptic signaling between GABAergic interneurons and oligodendrocyte precursor cells in the hippocampus. *Nature Neuroscience*, 7 (1), 24-32. doi: 10.1038/nn1162
- Maher, C., Ferguson, M., Vandelandotte, C., Plotnikoff, R., De Bourdeaudhuij, I., Thomas, S., Nelson-Field, K., Olds, T. (2015). A web-based, social networking physical activity intervention for insufficiently active adults delivered via facebook app: Randomized controlled trial. *Journal of Medical Internet Research*, 17 (7): e174. doi: 10.2196/jmir.4086
- Markham, J. A., Greenough, W. T. (2004). Experience-driven brain plasticity: Beyond the synapse. *Neuron Glia Biology*, 1 (4), 351-363. doi: 10.1017/s1740925x05000219
- McTigue, D. M., Tripathi, R. B. (2008). The life, death, and replacement of oligodendrocytes in the adult CNS. *Journal of Neurochemistry*, 107 (1), 1-19. doi: 10.1111/j.1471-4159.2008.05570.x
- Meeusen, R., De Meirleir, K. (1995). Exercise and brain neurotransmission. *Sports Medicine*, 20 (3), 160-188.
- Meltzoff, A. N., Kuhl, P. K. (1994). Faces and speech: Intermodal processing of biologically-relevant signals in infants and adults. In D. J. Lewkowicz, R. Lickliter (Eds.), *The Development of Intersensory Perception: Comparative Perspectives* (pp. 335-369). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Meltzoff, A. N., Moore, M. K. (1994). Imitation, memory, and the representation of persons. *Infant Behavior and Development*, 17, 83-99. doi: 10.1016/0163-6383(94)90024-8
- Morrison, B. M., Lee, Y., Rothstein, J. D. (2013). Oligodendroglia: Metabolic supporters of axons. *Trends in Cell Biology*, 23 (12), 644-651. doi: 10.1016/j.tcb.2013.07.007
- Nave, K. A. (2010). Myelination and support of axonal integrity by glia. *Nature*, 468 (7321), 244-252. doi: 10.1038/nature09614
- Pakkenberg, B., Gundersen, H. J. (1997). Neocortical neuron number in humans: Effect of sex and age. *Journal of Comparative Neurology*, 384 (2), 312-320.
- Pontifex, M. B., Hillman, C. H., Fernhall, B., Thompson, K. M., Valentini, T. A. (2009). The effect of acute aerobic and resistance exercise on working memory. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41 (4), 927-934. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181907d69
- Pontifex, M. B., Raine, L. B., Johnson, C. R., Chaddock, L., Voss, M. W., Cohen, N. J., Kramer, A. F., Hillman, C. H. (2011). Cardiorespiratory fitness and the flexible modulation of cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23 (6), 1332-1345. doi: 10.1162/jocn.2010.21528
- Raczek, J. (2002). Entwicklungsveränderungen der motorischen Leistungsfähigkeit der Schuljugend in drei Jahrzehnten (1965-1995). *Sportwissenschaft*, 32 (2), 2010-2016.
- Rehfeld, K., Hökelmann, A., Lehmann, W., Blaser, P. (2014). Auswirkungen einer Tanz- und Kraft-Ausdauer-Intervention auf kognitive Fähigkeiten älterer Menschen. *Zeitschrift für Neuropsychologie*, 25 (2), 99-108. doi: 10.1007/s12662-016-0411-6
- Rusch, H., Irrgang, W. (2002). Aufschwung oder Abschwung? Verändert sich die körperliche Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen oder nicht? *Haltung und Bewegung*, 22 (2), 5-10.
- Sallis, J. F., McKenzie, T. L., Kolody, B., Lewis, M., Marshall, S., Rosengard, P. (1999). Effects of health-related physical education on academic achievement: Project SPARK. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70 (2), 127-134. doi: 10.1080/02701367.1999.10608030

- Se-Hong, K., Minjeong, K., Yu-Bae, A., Hyun-Kook, L., Sung-Goo, K., Jung-Hyoun, C. (2011). Effects of dance exercise on cognitive function in elderly patients with metabolic syndrome: A pilot study. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10 (4), 671-678.
- Shephard, R. J. (1997). Curricular physical activity and academic performance. *Pediatric Exercise Science*, 9, 113-126.
- Stroth, S., Kubesch, S., Dieterle, K., Ruchow, M., Heim, R., Kiefer, M. (2009). Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain Research*, 1269, 114-124. doi: 10.1016/j.brainres.2009.02.073
- Strüder, H. K., Hollmann, W., Platen, P., Wöstmann, R., Ferrauti, A., Weber, K. (1997). Effect of exercise intensity on free tryptophan to branched-chain amino acids ratio and plasma prolactin during endurance exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 22 (3), 280-291.
- Sumic, A., Michael, Y., Carlson, N., Howieson, D., Kaye, J. (2007). Physical activity and the risk of dementia in oldest old. *Journal of Aging and Health*, 19 (2), 242-259. doi: 10.1177/0898264307299299
- Tees, R. C. (1994). Early stimulation history, the cortex, and intersensory functioning in infrahumans: Space and time. In D. J. Lewkowicz, R. Lickliter (Eds.), *The development of intersensory perception: Comparative perspectives* (pp. 107-131). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Verburgh, L., Königs, M., Scherder, E. J., Oosterlaan, J. (2013). Physical exercise and executive functions in preadolescent children, adolescents and young adults: A meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 48 (12), 973-979.
- Voelcker-Rehage, C., Godde, B., Staudinger, U. (2010). Physical and motor fitness are both related to cognition in old age. *European Journal of Neuroscience*, 31 (1), 167-176. doi: 10.1111/j.1460-9568.2009.07014.x
- Walk, L. (2011). Bewegung formt das Gehirn. *DIE Zeitschrift für Erwachsenenbildung*, 2011/1, 27-29.
- Wischenka, D. M., Marquez, C., Felsted, K. F. (2016). Benefits of physical activity on cognitive functioning in older adults. In B. Resnick (Ed.), *Annual Review of Gerontology and Geriatrics*, 36: *Optimizing Physical Activity and Function Across All Settings*. New York: Springer.