

Kubesch (Hrsg.)
Exekutive Funktionen und Selbstregulation

Verlag Hans Huber
Programmbereich Psychologie

Der Sport macht's!

Effekte körperlicher Aktivität auf exekutive Funktionen, Selbstregulation, Lernleistung und sozial-emotionale Lernprozesse

Sabine Kubesch

Was hat Bewegung mit Lernen zu tun? Kann über eine gesteigerte körperliche Leistungsfähigkeit die Intelligenz gefördert und die Aufmerksamkeit besser gesteuert werden? Warum arbeitet nicht nur das Sportlerherz, sondern auch das Gehirn eines Sportlers effizienter? Über welche neurobiologischen Prozesse lösen Ausdauerbelastungen eine verbesserte Stimmung aus? Stimmt es, dass soziale Ausgrenzung im Sport einen im Gehirn nachweisbaren Schmerz verursacht? Wie wirkt der Sportunterricht über das Gehirn auf das Sozialverhalten der Schülerinnen und Schüler ein? Weshalb sind Sportler häufig weniger ängstlich und aggressiv, und warum bleiben sie auch länger geistig fit? Antworten auf diese und weitere Fragen liefert eine noch junge Disziplin der Gehirnforschung: die Bewegungs-Neurowissenschaft (Hollmann et al., 2005)¹⁰.

Mit den gesundheitlichen Wirkungen von Sport und Bewegung auf körperliche Prozesse verbindet man häufig zunächst die potenzielle Reduzierung eines zu hohen Körpergewichts. Bekannt ist auch die vorbeugende und therapeutische Wirkung von sportlichen Aktivitäten. Das gilt vor allem für Rückenbeschwerden, Gelenkverschleiß, Stoffwechselkrankheiten und chronische Herzinsuffizienz. Zum Allgemeinwissen zählt auch, dass körperliche Aktivität lebensverlängernd wirkt und das Risiko reduziert, von Krankheiten mit den höchsten Mortalitätsraten, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, zerebrovaskulären Erkrankungen und Darmkrebs, betroffen zu werden (Lee et al., 1997; OECD Health Data, 2013). Hier gilt es in der Kindheit anzusetzen, denn sie ist eine entscheidende Lebensphase, in der man das Gesundheitsverhalten nachhaltig formen kann (OECD, 2011).

Diesen wichtigen und positiven Zusammenhängen zwischen Sport, Bewegung und körperlicher Gesundheit steht jedoch eine sehr hohe Zahl an übergewichtigen Menschen gegenüber. Davon sind in Deutschland laut Statistischem Bundesamt (2010) etwa jedes siebte Kind und jeder zweite Erwachsene betroffen. Dabei profitiert nicht nur der Körper von Sport und Bewegung. Körperliche Aktivität trägt auch maßgeb-

¹⁰ Dieser Beitrag ist eine aktualisierte und überarbeitete Fassung von Kubesch, 2012.

lich zur geistigen Gesundheit und zur kognitiven Leistungsfähigkeit bei (zur Übersicht siehe Ratey/Hagerman, 2013).

Welchen Einfluss Sport und Bewegung auf Gehirnprozesse ausüben, wird erst seit wenigen Jahren erforscht. Das Wissen um die Möglichkeit, durch muskuläre Beanspruchung auf das Gehirn einzuwirken, ist also noch sehr jung. So wurde in der medizinischen Ausbildung bis etwa Mitte der 1980er-Jahre vermittelt, dass über körperliche Aktivität nicht einmal die Gehirndurchblutung verändert werden könne (Hollmann/Strüder, 2001). Inzwischen weiß man nicht nur, dass selbst durch einfache Formen muskulärer Beanspruchung (wie spazieren gehen) die regionale Gehirndurchblutung erhöht wird, sondern man kann auch belegen, dass durch Bewegungsformen unterschiedlicher Art, Dauer und Intensität zahlreiche Anpassungen auf zellulärer, molekularer und neurochemischer Ebene verursacht werden, die emotionale, soziale und kognitive Prozesse beeinflussen. Dabei machen Sport und Bewegung auch vor den exekutiven Funktionen nicht Halt, die in hohem Maße mit der schulischen Lernleistung korrelieren (Kubesch, 2013).

Die Zusammenhänge zwischen körperlicher Aktivität und Gehirnprozessen, die im Folgenden beschrieben werden, belegen, dass Sport und Bewegung für verschiedene Bereiche unseres geistigen Lebens von hoher Bedeutung sind, und dass wir zeitlebens über muskuläre Beanspruchung die Lernleistung des Gehirns steigern sowie auf das Sozialverhalten und die psychische Gesundheit Einfluss nehmen können. Aus all diesen wissenschaftlichen Erkenntnissen geht eine Forderung deutlich hervor, die Forderung nach mehr Sportunterricht an den Schulen. Der Sportunterricht sollte zudem, insbesondere im Ganztagsangebot von Schulen, durch ein größeres Angebot an außerunterrichtlichem Sport eine Erweiterung finden. Kooperationsprojekte zwischen Schulen und Sportvereinen bieten sich hierfür in idealer Weise an.

Neuroplastizität

Körperliche Aktivität fördert Gehirnprozesse, indem sie auf die Struktur und Funktionsweise des Gehirns einwirkt. Bereits im Fetalstadium wird durch die Bewegungen des Kindes und der Mutter die Bildung, Entwicklung und Vernetzung von Nervenzellen angeregt. Die Anzahl der Nervenzellen und die gezielten Verbindungen, die sie mit anderen Neuronen eingehen, ermöglichen eine große Bandbreite von Verhaltensreaktionen und fördern die Entwicklung der Intelligenz. Bewegung zählt deshalb zu den wichtigsten Stimulationen des fetalen Gehirns (Eliot, 2002).

Bei 4- bis 6-jährigen Kindern zeigte sich, dass Kinder mit höherer motorischer Leistungsfähigkeit in den Bereichen Kraft, Schnelligkeit, Beweglichkeit und Koordination auch bessere kognitive Grundfunktionen aufweisen als körperlich weniger leistungsstarke Kinder (Voelcker-Rehage, 2005). Während der Kindheit erfolgt die Bildung und Vernetzung von Nervenzellen besonders schnell. Um synaptische Ver-

bindungen herzustellen bzw. aufrechtzuerhalten, sollten Heranwachsenden täglich Beanspruchungen von ca. 60 Prozent der individuellen körperlichen Höchstleistung ermöglicht werden (Hollmann, 2000). Das bedeutet, dass Kinder und Jugendliche täglich mindestens einmal «ins Schwitzen kommen» müssen. Die Bewegungs- und Sportangebote in Kindergärten und Schulen sind deshalb von so hoher Bedeutung, weil in einer wichtigen Entwicklungsphase des Gehirns auf die Struktur, Funktion und Vernetzung von Nervenzellen eingewirkt und dadurch das emotionale und soziale Verhalten sowie die kognitive und schulische Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen positiv beeinflusst werden kann.

Die Anpassungsvorgänge im Zentralnervensystem, die durch die Lebenserfahrungen bestimmt werden, wodurch alle Gehirne einzigartig sind, bezeichnet man als Neuroplastizität (Spitzer, 2002). Das Gehirn besitzt die bemerkenswerte Fähigkeit, sich beständig den Erfordernissen seines Gebrauchs anzupassen. Dieser Vorgang ist nicht auf eine bestimmte Lebensphase beschränkt, sondern läuft während des gesamten Lebens eines Organismus ab, zunächst sehr schnell, später langsamer (Spitzer, 1996). Die aktivitätsabhängige Neuroplastizität bildet auch die Grundlage dafür, dass körperliche Aktivität über den gesamten Lebensverlauf auf Neuroanatomie und chemische Prozesse im Gehirn einwirken kann. Wenn man sich bewegt, steigt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit einer kognitiven Reaktion. Das Gehirn eines körperlich aktiven Menschen stellt sich auf diesen Zusammenhang ein, indem es ein erhöhtes Potenzial für strukturelle Plastizität und Anpassungsfähigkeit zur Verfügung stellt (Kempermann, 2012).

Hippokampale Neurogenese und Wachstumsfaktoren

Eine unerwartete und zugleich bedeutende Form von Neuroplastizität wurde 1998 (Eriksson et al., 1998) entdeckt: die Neubildung von Nervenzellen (Neurogenese) im Hippokampus erwachsener Menschen. Diese Hirnstruktur ist notwendig für deklarative (verbalisiertes Wissen über Fakten und Ereignisse), episodische (Erinnerungen an persönlich erfahrene Erlebnisse) und räumliche Lern- und Gedächtnisprozesse (Buchner/Brandt, 2002; McEwen, 1999). Zu diesem Zeitpunkt war allerdings noch nicht eindeutig geklärt, ob diese Erkenntnisse nicht nur von struktureller, sondern auch von funktioneller Bedeutung sind. Dabei ging es in erster Linie um die Frage nach der Integration neuer Nervenzellen in bereits bestehende Neuronenverbände und darum, ob durch die hippokampale Neurogenese Lernprozesse entscheidend verbessert werden können (Unger/Spitzer, 2000). Im Jahr 2000 wurde schließlich der Nachweis erbracht, dass die neugebildeten Neuronen tatsächlich mit den bestehenden neuronalen Netzwerken synaptisch verschaltet werden. Auf diese Weise spielen sie eine bedeutende Rolle beim Wiedererwerben von Fähigkeiten, die durch Neuronenuntergang verloren gingen (Spitzer, 2002; Scharff et al., 2000). Im darauf folgenden

Jahr hat sich gezeigt, dass die nachwachsenden Neuronen im Hippokampus für Lernprozesse wichtig sind und schnelleres Lernen ermöglichen als ältere Nervenzellen (Spitzer, 2002). In Bezug auf räumliche Gedächtnisprozesse werden die neu gebildeten Neuronen bevorzugt beim Lernen und Erinnern von neuen Gedächtnisinhalten aktiviert (Kee et al., 2007).

Diese Erkenntnisse sind faszinierend, ging man doch bis in die 1990er-Jahre noch davon aus, dass ein Nachwachsen von Nervenzellen im erwachsenen Gehirn nicht möglich sei. Dass zudem noch eine Hirnstruktur davon betroffen ist, der eine zentrale Rolle bei Lern- und Gedächtnisprozessen zukommt, ließ die Fachwelt erstaunen. Die Neubildung von Nervenzellen im Hippokampus wird durch körperliche Aktivität entscheidend angeregt, wodurch dem Sport ein über viele Jahre unbekannter, bedeutender Stellenwert im Hinblick auf die Förderung kognitiver Funktionen zukommt (Kubesch, 2013). Körperliche Aktivität, vor allem in Form von Ausdauerbelastungen, fördert das Neuronenwachstum im Hippokampus, indem sich neurale Stammzellen zu neuronalen Vorläuferzellen weiterentwickeln, an ihren Zielort wandern und dort zu funktionsfähigen Neuronen werden. Die Anzahl der neugebildeten Nervenzellen lässt sich dabei durch körperliches Training verdoppeln (Ameri, 2001).

Sowohl tägliches Ausdauertraining als auch ein Training, das nur jeden zweiten Tag erfolgt, bewirken einen Anstieg des neuronalen Wachstumsfaktors BDNF (Brain Derived Neurotrophic Factor), der die synaptische Plastizität sowie das Wachstum und Überleben von Nervenzellen erhöht. Mit zunehmender Laufdauer steigt die BDNF-Konzentration dabei progressiv an. Selbst nach einem drei Monate andauernden täglichen Training ist noch ein Anstieg festzustellen, und noch einige Tage nach Belastungsende kann eine Erhöhung des BDNF-Proteins nachgewiesen werden. Ein weiterer Test zeigt die Langzeitwirkung des Ausdauertrainings. Zwei Wochen nach dem dreimonatigen Training wurde in einer sehr kurzen zweiten Trainingseinheit ein BDNF-Anstieg auf einem Niveau nachgewiesen, das üblicherweise ein mehrwöchiges Training erfordern würde. Daraus wird abgeleitet, dass ein molekulares Gedächtnis für die BDNF-Beeinflussung durch körperliche Belastung existiert (Berchtold et al., 2005). Das molekulare Gedächtnis führt möglicherweise dazu, dass ein durch längeres Training erreichtes BDNF-Niveau zu einem späteren Zeitpunkt über eine kürzere Phase an Ausdauertraining schnell wieder erreicht werden kann.

Erfolgreiches Vokabellernen wird ebenfalls mit einem BDNF-Anstieg, angeregt durch körperliche Aktivität, in Verbindung gebracht. Neurologen des Universitätsklinikums Münster konnten nachweisen, dass das Vokabellernen nach einer kurzen, intensiven anaeroben Belastung (zwei Sprints à drei Minuten mit steigender Geschwindigkeit bei über 10 mmol/l Laktat) 20 Prozent schneller erfolgt als nach einer längeren, wenig intensiven aeroben Belastung (40 Minuten bei 2 mmol/l Laktat) und ebenfalls schneller als nach einer Ruhebedingung (15 Minuten). Die intensive körperliche Belastung ging mit einer erhöhten BDNF-Konzentration im Blut einher. Während der

kurzzeitige Lernerfolg dem BDNF-Anstieg zugeschrieben wurde, wurde die verbesserte mittlere Behaltensleistung (von einer Woche) nach dem Sprint mit einer erhöhten peripheren (im Blut gemessenen) Dopaminkonzentration in Verbindung gebracht. Die verbesserte langfristige Behaltensleistung (bis zu acht Wochen) korrelierte dagegen mit einer erhöhten AdrenalinKonzentration im Blut (Winter et al., 2007).

Unabhängig von einem BDNF-Anstieg konnte im Tierexperiment gezeigt werden, dass die Kombination aus körperlicher Aktivität (Ausdauerbelastung) und kognitiver Aufgabe die Arbeitsgedächtnisleistung verbessert. Dieser Effekt wurde weder durch eine reine Ausdauerbelastung, die nur in dieser Form einen signifikanten BDNF-Anstieg bei den Tieren bewirkte, noch durch die kognitive Aufgabe allein erzielt (Langdon/Corbett, 2011). Dass das Arbeitsgedächtnis stärker von einem kombiniert körperlich-kognitiven Training als von einem rein kognitiven Training profitiert, wurde inzwischen bei Menschen nachgewiesen (Theill et al., 2013). Damit sind wir bei den exekutiven Funktionen und deren Beeinflussung durch körperliche Aktivität angelangt.

Körperliche Aktivität und exekutive Funktionen

Man unterscheidet bei den Effekten von körperlicher Aktivität auf exekutive Funktionen zwischen akuten Trainingseffekten, die sich während der körperlichen Belastung oder unmittelbar danach einstellen, und Effekten, die durch ein regelmäßiges Training über mehrere Wochen oder Monate und eine gesteigerte körperliche Fitness erzielt werden. Durch körperliche Aktivität und Fitness geförderte exekutive Funktionen zeigen sich unter anderem im Zusammenhang mit der Aufmerksamkeitssteuerung (Flanker Test; Hillman et al., 2009; Voss et al., 2011; Chaddock et al., 2012a), der Inhibition (Stroop Test; Buck et al., 2008) und der Arbeitsgedächtnisleistung (N-Back Aufgabe; Kamjio et al., 2011); (zur Übersicht siehe Chaddock-Heyman et al., 2013).

Effekte eines mehrmonatigen Trainings auf exekutive Funktionen

Durch die Entwicklung der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), mit der Gehirnaktivitäten bei der Bearbeitung von kognitiven Aufgaben dargestellt werden können, wurden die wichtigsten Fortschritte in der Gehirnforschung erzielt (Spitzer, 2002). Bislang gibt es nur sehr wenige fMRT-Studien, mit denen mögliche Effekte von körperlicher Aktivität und körperlicher Fitness auf kognitive Funktionen und Gehirnstrukturen von Heranwachsenden untersucht wurden. Im Rahmen einer solchen Studie nahmen 8- bis 9-jährige Kinder über einen Zeitraum von neun Monaten fünfmal wöchentlich an einem etwa 70-minütigen Sportprogramm teil, das nachmittags, zwei Stunden nach Unterrichtsende, durchgeführt wurde. Das Programm FITKIDS besteht aus motorischen Aufgaben und Kräftigungsübungen und zielt ohne

Wettkampfcharakter in spielerischer Form insbesondere auf eine Steigerung der aeroben Leistungsfähigkeit ab (Chaddock-Heyman et al., 2013).

Bei den sportlich aktiven Kindern (Interventionsgruppe) kam es im Anschluss an das neunmonatige Sportprogramm im Vergleich zu den Kindern aus der Wartekontrollgruppe in der inkongruenten Testbedingung einer Flanker-Aufgabe¹¹ zu einem Rückgang der neuronalen Aktivität im rechten vorderen (anterioren) präfrontalen Kortex. Inkongruente Flanker-Aufgaben erfordern eine hohe kognitive Kontrolle, insbesondere eine gute Aufmerksamkeitssteuerung, und dabei die Fähigkeit, Störreize effektiv ausblenden zu können. Diese Fähigkeit steht in einem engen Zusammenhang mit der schulischen Lernleistung (Lan, 2009).

Die Gehirnaktivierung der Kinder aus der Interventionsgruppe glich sich dabei der Aktivierung junger Erwachsener an. Die Leistungsfähigkeit bzw. die Gehirnfunktionen und die Gehirnaktivität von jungen Erwachsenen gelten als Model für ein optimal ausgereiftes und funktionierendes Gehirn. Bei der Kontrollgruppe war dagegen keine Veränderung der neuronalen Aktivität im anterioren präfrontalen Kortex nachzuweisen. In der neutralen Testbedingung der Flanker-Aufgabe, in der keine höheren Anforderung an die kognitive Kontrolle gestellt wird, unterschied sich die Gehirnaktivität der Erwachsenen nicht von der der Kinder – weder aus der Interventions- noch aus der Kontrollgruppe (Chaddock-Heyman et al., 2013).

Die Auswertung der Verhaltensdaten, d. h. der Reaktionszeiten und die Fehleranalyse, ergab, dass sich die Leistungsfähigkeit der Interventionsgruppe in der inkongruenten Testbedingung von Messzeitpunkt 1 (vor dem 9-monatigen Sportprogramm) nach Messzeitpunkt 2 (nach dem 9-monatigen Sportprogramm) verbesserte. Dabei machten die Kinder zum 2. Messzeitpunkt nur noch vergleichbar viele Fehler wie junge Erwachsene. Die Kinder aus der Kontrollgruppe zeigten keine Verbesserung in der Aufmerksamkeitssteuerung (Chaddock-Heyman et al., 2013).

Diese Daten sprechen für neuroplastische Adaptionen des rechten anterioren präfrontalen Kortex bei Kindern, angeregt durch ein mehrmonatiges körperliches Training mit einer Bewegungszeit von etwa einer Stunde. Der anteriore präfrontale Kortex unterstützt die Fähigkeit, aufgabenrelevante Informationen über die Zeit

11 Bei der Flanker-Aufgabe sind die Kinder gefordert, ihre Aufmerksamkeit auf das mittlere von fünf Symbolen zu lenken. Das mittlere Symbol stellt den Zielstimulus dar, der umgeben wird von Flankier-Reizen, die ausgebildet werden sollen. Zeigt der mittlere Pfeil, der Zielstimulus, nach links, müssen die Kinder mit dem linken Zeigefinger einen Tastendruck ausführen, zeigt der mittlere Pfeil nach rechts, entsprechend mit dem rechten Zeigefinger. Man unterscheidet dabei zwischen neutralen (--<--, -->--) und kongruenten (<<<<<, >>>>>) Testdurchgängen, die eine geringere kognitive Kontrolle erfordern, und inkongruenten (<<><<, >><>>) Testbedingungen, die höhere Anforderungen an die Aufmerksamkeitssteuerung stellen.

aufrechtzuerhalten. Bei Kindern scheint sich durch ein körperliches Training die Gehirnaktivität dahingehend anzupassen, dass sich ihre kognitiven Kontrollstrategien denen von jungen Erwachsenen angleichen: von einer schnellen, reaktiven Kontrolle hin zu einer flexibleren, anhaltend zielorientierten Kontrolle (Chaddock-Heyman et al., 2013). Dabei scheinen sich bei 8- bis 9-jährigen Kindern verstärkt höhere Belastungsintensitäten bei 55 bis 80 Prozent der maximalen Herzfrequenz im Vergleich zu mittleren Belastungsintensitäten positiv auf die exekutiven Funktionen auszuwirken (Castelli et al., 2011).

Fitnesseffekte

Fitnesseffekte wurden in einer weiteren fMRT-Studie bei 9- bis 10-jährigen Kindern untersucht. Man wollte prüfen, ob körperlich fittere Kinder im Vergleich zu weniger körperlich leistungsstarken Kindern Unterschiede in der Gehirnaktivierung bei der Bearbeitung einer Flanker-Aufgabe zeigen. Dabei waren Unterschiede zum einen zwischen den Testbedingungen (kongruent bzw. neutral vs. inkongruent) und zum anderen hinsichtlich der Testdurchgänge (frühe vs. späte Testdurchgänge) (Chaddock et al., 2012a) messbar. Unabhängig von der körperlichen Leistungsfähigkeit zeigten die Kinder in der kongruenten Testbedingung (z. B. <<<<<<) im präfrontalen (Stirnlappen) und im parietalen (Scheitellappen) Kortex eine größere Aktivierung zu Beginn der neuropsychologischen Testung. Dies reflektiert eine höhere Inanspruchnahme neuronaler Ressourcen zur Aufgabenbewältigung bei einer noch nicht vertrauten Aufgabe. Entsprechend nahm die Aktivierung in diesen Gehirnbereichen im Laufe der weiteren Testdurchgänge ab, während die Fehlerquote im Verlauf der Testung in beiden Gruppen zunahm (Chaddock et al., 2012a). Die Fehlerzunahme führen die Wissenschaftler auf eine zunehmende Ermüdung der Kinder in der einfachen Testbedingung zurück (Beck/Kubesch, 2013).

In den inkongruenten Testdurchgängen (z. B. >>>>>) zeigten die fitteren Kinder bei gleichbleibender Fehlerquote in der ersten Testhälfte im präfrontalen und parietalen Kortex zunächst eine größere Aktivierung. Diese Aktivierung nahm im Laufe der Testung ab. Die weniger fitten Kinder zeigten im Verlauf der neuropsychologischen Testung dagegen eine Zunahme an Fehlern bei gleichbleibender Gehirnaktivität (Chaddock et al., 2012a). Die Abnahme der Gehirnaktivierung bei gleichbleibender Fehlerquote in der schwierigeren Testbedingung kann als eine höhere neuronale Anpassungsfähigkeit der körperlich leistungsfähigeren Kinder interpretiert werden (Chaddock et al., 2012a).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass körperlich fittere und weniger fitte Kinder bei Aufgaben mit geringeren kognitiven Ansprüchen ähnliche Aktivitätsmuster im Gehirn zeigen. Bei kognitiv anspruchsvolleren Aufgaben gelingt es dagegen den körperlich fitteren Kindern besser, die Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten und die dafür notwendigen neuronalen Anpassungen vorzunehmen. Die Auswirkungen der

Fitness auf kognitive Funktionen sind keine kurzfristigen Effekte. Sie wirken langfristig. Die aerobe Leistungsfähigkeit von Kindern erlaubt Aussagen über deren kognitive Leistungsfähigkeit im Folgejahr (Chaddock et al., 2012b).

Der starke Einfluss von akuter körperlicher Belastung und der körperlichen Fitness auf exekutive Funktionen bei Kindern und Jugendlichen zeigt sich auch in Studien mit dem Elektroenzephalogramm (EEG)¹² bzw. bei Analysen ereigniskorrelierter Potentiale (EKP). EEG- und EKP-Forschungen ermöglichen einen tieferen Einblick in das Verständnis kognitiver Prozesse. Der Vorteil einer EEG-Messung mit EKP gegenüber der Verhaltensmessung ist die präzisere Aufzeichnung der Vorgänge, die diesen Auswirkungen zugrunde liegen. Der zeitliche Verlauf der kognitiven Prozesse wird dabei im Bereich von Millisekunden aufgelöst. EKP geben somit sehr genaue Informationen darüber, wie das Gehirn einer Person während einer gegebenen Aufgabe arbeitet. So können sie Auswirkungen der allgemeinen Fitness sowie einer akuten Belastung auf die Bearbeitung von kognitiven Aufgaben aufzeigen, auch wenn Verhaltensmessungen keine Effekte ergeben.

Die Auswertung ereigniskorrelierter Potentiale bei der Durchführung eines GoNo-go-Flanker-Paradigmas (zur Messung von Inhibition und Aufmerksamkeitssteuerung) ergab bei körperlich leistungsstärkeren Jugendlichen im Alter zwischen 13 und 14 Jahren im Vergleich zu weniger körperlich fitten Jugendlichen zum einen eine signifikant größere CNV¹³-Amplitude, was für erhöhte vorbereitende Aufmerksamkeitsprozesse spricht. Zum anderen zeigen die leistungsstärkeren Schüler im Vergleich zu den weniger körperlich leistungsstarken Schülern eine reduzierte N2-Amplitude (Stroth et al., 2009). Die N2¹⁴ stellt die EKP-Komponente dar, die mit der Antwortüberwachung und der Inhibition von Reaktionen assoziiert wird. Anhand der N2-Kurve lässt sich folglich die exekutive Kontrolle bzw. die Inhibition von Antworttendenzen messen. Diese Studienergebnisse deuten darauf hin, dass die körperliche Fitness die Leistung des exekutiven Systems verbessert, indem die geistige Anstrengung bei Prozessen der Handlungsüberwachung reduziert wird. Eine reduzierte N2-Amplitude von körperlich leistungsstärkeren Schülern spiegelt damit eine effizientere kognitive Kontrolle wider. Daraus lässt sich folgern, dass die Gehirne von körperlich leistungsfähigeren Jugendlichen effizienter arbeiten als die von Jugendlichen mit geringerer Fitness. Körperlich fitte Jugendliche zeigen bessere Leistungen in Flanker-Aufgaben als weniger fitte. Von einer akuten Belastung scheinen die weniger fitten Jugendlichen jedoch stärker zu profitieren als die körperlich leistungsstärkeren Jugendlichen (Hogan et al., 2013). Körperliche Fitness wirkt dabei nicht nur positiv

12 Mit dem EEG wird die elektrische Aktivität des Gehirns gemessen, vergleichbar dem EKG, das die elektrische Aktivität des Herzens aufzeichnet.

13 CNV: «contingent negative variation».

14 Die N2 bzw. N200 erreicht ihren (im negativen [N] Bereich gelegenen) Höhepunkt zwischen 150 und 300 Millisekunden nach Präsentation eines Stimulus.

auf die der Lernleistung zugrunde liegenden exekutiven Funktionen von Kindern ein, sondern sie korreliert ebenfalls mit einem besseren Abschneiden in Lernleistungstests (Castelli et al., 2007; Chomitz et al., 2009).

Der Zusammenhang zwischen einer gesteigerten kognitiven Leistungsfähigkeit und Fitnesseffekten geht auch aus einer Langzeitstudie hervor, die alle zwischen 1950 und 1976 geborenen schwedischen wehrpflichtigen Männer erfasst. In dieser Studie wurde nachgewiesen, dass eine Zunahme an kardiovaskulärer Leistungsfähigkeit im Alter zwischen 15 und 18 Jahren die kognitive Leistungsfähigkeit im Alter von 18 Jahren voraussagt. Die Zunahme der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit steht dabei in einem positiven Zusammenhang mit der Intelligenz. Die körperliche Leistungsfähigkeit mit 18 Jahren wiederum sagte die Leistungsfähigkeit in Studium und Beruf sowie den sozioökonomischen Status im weiteren Lebensverlauf voraus (Aberg et al., 2009).

Akute Belastungseffekte

Akute Belastungseffekte auf exekutive Funktionen konnten u. a. bei jungen Erwachsenen nach einer 20-minütigen Yoga-Einheit (Gothe et al., 2013; siehe auch Diamond/Lee in diesem Band) sowie bei jugendlichen Schülern nach einer 10-minütigen koordinativen Übung (Budde et al., 2008) und nach einem 30-minütigen koordinativ- und ausdauerorientierten Sportunterricht nachgewiesen werden (Kubesch et al., 2009). Im Vergleich zu einer Ruhebedingung konnten diese Schüler nach dem Sportunterricht Störreize besser ausblenden. Dieser Effekt zeigte sich nicht nach einer 5-minütigen Bewegungspause im Klassenzimmer. In einer weiteren Studie an Schulkindern wurde nachgewiesen, dass sich nach einer 20-minütigen mittleren Ausdauerbelastung (Walking) nicht nur die Fähigkeit verbessert, Störreize auszublenden, sondern auch das Abschneiden in Schulleistungstests (Hillman et al., 2009). Diese Daten werden durch eine Metaanalyse gestützt, die belegt, dass sich die kognitive Leistungsfähigkeit von Schulkindern während und unmittelbar nach einer akuten Belastung verbessert. Verbesserungen sind auch noch nach einer Verzögerung von bis zu 20 Minuten nach der körperlichen Beanspruchung nachweisbar (Chang et al., 2012).

Aufgrund von Studienergebnissen, die eine Kausalität zwischen körperlicher Fitness bzw. körperlicher Belastung und verbesserten exekutiven Funktionen sowie Lernleistungen belegen, sollte dem Sportunterricht und dem außerunterrichtlichen Sportangebot an Schulen ein weitaus größerer Stellenwert zukommen. Will man die akuten positiven Effekte auf die Aufmerksamkeitsleistung von Schülern im Anschluss an eine körperliche Belastung nutzen, sollten der Sportunterricht und darüber hinausgehende Sportangebote nicht in den Randstunden stattfinden, sondern möglichst täglich vor anderen wichtigen Fächern sowie vor Hausaufgaben- und weiteren Lernzeiten platziert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass exekutive Funktionen von Kindern und Jugendlichen sowohl von einer akuten körperlichen Belastung als auch von neurophysiologischen Adaptionen, angeregt durch ein längerfristiges körperliches Training, profitieren. Wie bereits beschrieben, zeichnet sich zudem ab, dass eine Kombination aus körperlichem und kognitivem Training für die Förderung exekutiver Funktionen im Besonderen geeignet ist (Langdon/Corbett, 2011; Theill et al., 2013).

Ein solches Training finden wir insbesondere in Mannschaftssportarten wie Handball, Fußball und Basketball. In diesen und weiteren großen und kleinen Sportspielen müssen die Spieler oftmals in Bruchteilen von Sekunden und unter Druck die richtigen Entscheidungen treffen, flexibel sein im Denken und im Handeln, Impulse kontrollieren, die Aufmerksamkeit ganz auf die motorische Aufgabe richten, ohne sich ablenken zu lassen. Emotionen müssen gesteuert und negative Gefühle und Gedanken, die dem Erfolg entgegenstehen, ausgeblendet werden (vgl. Emrich in diesem Band). Die Spieler müssen sich Spielabläufe und das Spielverhalten des Gegners einprägen und sie in der jeweiligen Spielsituation im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten, um die richtige Aktion schnellstmöglich einleiten zu können. Je besser das Arbeitsgedächtnis der Spieler, desto besser ist ihr taktisches Entscheidungsverhalten (Furley/Memmert, 2012).

Bei Baseballspielern konnte mit Hilfe einer GoNogo-Aufgabe nachgewiesen werden, dass sich die inhibitorische Verhaltenskontrolle und damit die Entscheidungsfindung sportartspezifisch fördern lässt (Kida et al., 2005). Im Fußball zeigte sich, dass männliche und weibliche Angreifer, Mittelfeld- und Abwehrspieler aus dem Profi- (1. Liga) und höchsten Amateurbereich (3. Liga) im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung über bessere exekutive Funktionen verfügen. Im Vergleich der Fußballspieler schnitten die Spieler und Spielerinnen der 1. Liga besser ab als die der 3. Liga. Gleichzeitig lässt sich der Torerfolg aus den exekutiven Funktionen ableiten. Spieler mit trainierteren exekutiven Funktionen sind zwei Jahre später in der Torvorbereitung und im Torabschluss besser als Spieler mit schlechter ausgebildeten exekutiven Funktionen (Vestberg et al., 2012).

Die erfolgreichsten 11- bis 17-jährigen (im Durchschnitt 14 Jahre) Fußballspieler einer Mannschaft, die auf höchstem Niveau durchschnittlich 7,6 Stunden pro Woche trainieren, weisen im Vergleich zu den besten Freizeitspielern mit 2,9 Stunden Training höhere Selbstregulationswerte in den Bereichen Reflexion (z. B. «Ich versuche, über meine Stärken und Schwächen nachzudenken.») und Anstrengung («Ich versuche, bei jeder Aufgabe mein Bestes zu geben.») auf (Toering et al., 2009). Exekutive Funktionen und die Fähigkeit zur Selbstregulation bilden eine wichtige Grundlage für Erfolge im Mannschaftssport, die auch im Schulsport trainiert und für die allgemeine Förderung kognitiver und sozial-emotionaler Entwicklungsprozesse genutzt werden können.

Durch mehr Sport mit weniger Stress und Angst besser lernen

Während körperliche Aktivität und die dadurch bedingte Steigerung neurotropher Wachstumsfaktoren die hippokampale Neurogenese stimulieren, kann wiederholter Stress schädigend auf die Hippokampusformation einwirken (McEwen, 1999). So wurde die verstärkte Neubildung von Nervenzellen nur bei freiwilliger und nicht bei erzwungener körperlicher Belastung nachgewiesen (Ameri, 2001). Zwar scheint Stress nicht das Überleben der neu gebildeten Neuronen direkt zu beeinflussen, er führt jedoch zu einem Rückgang der Neurogenese (Ameri, 2001) und darüber hinaus zu einem allgemeinen (interindividuell unterschiedlichen) reversiblen, aber auch irreversiblen Verlust von hippokampalen Neuronen (McEwen, 1999). Stresshormone bewirken zum einen, dass weniger Glukose in das Gehirn aufgenommen werden kann, wodurch sich das Energieangebot verringert. Zum anderen erhöhen sie die Toxizität des Neurotransmitters Glutamat. Beide Faktoren führen zu Schäden am Hippokampus und dadurch zu einer Leistungsminderung hippokampaler Funktionen. In weiterer Folge kann chronischer Stress zum Zelluntergang im Hippokampus beitragen und sich damit ungünstig auf das Lernen und Behalten auswirken (Spitzer, 2002).

Es konnte nachgewiesen werden, dass Spitzensportler auf psychischen Stress signifikant ruhiger, weniger ängstlich und in einer besseren Stimmung reagieren als untrainierte Menschen (Rimmele et al., 2007). Tierexperimentelle neurobiologische Studien zeigen ebenfalls, dass körperliche Aktivität einen Schutz vor den negativen Folgen von Stress darstellen kann. Umgekehrt stellt die erzwungene Bewegungslosigkeit einen besonders hohen Stressfaktor dar. Eine zweistündige Immobilisierung führt bei Tieren zu einem Anstieg des Stresshormons Corticosteron (entspricht beim Menschen dem Stresshormon Kortisol) im Hippokampus, der auch noch eine Stunde nach Beendigung der Ruhigstellung andauert. Bewegungslosigkeit bzw. mangelnde Bewegungsmöglichkeiten bedeuten also Stress für den Organismus. Der durch diesen Stress ausgelöste Rückgang des neurotrophen Wachstumsfaktors BDNF im Hippokampus ist noch zehn Stunden später nachweisbar. Eine Ausdauerbelastung bewirkt dagegen bei zuvor durch Ruhigstellung gestressten, aber auch bei nicht gestressten Tieren eine Steigerung sowohl der Corticosteron- als auch der BDNF-Konzentration (Adlard/Cotman, 2004). Der durch Stress bedingte Corticosteronanstieg und der Corticosteronanstieg, der durch muskuläre Beanspruchung in Form von Ausdauerbelastungen verursacht wird, haben also entgegengesetzte Folgen in Bezug auf den Wachstumsfaktor BDNF. Muskuläre Beanspruchung kann auf diese Weise dem negativen Effekt von Stress entgegenwirken.

Die stressfreie körperliche Aktivität ist gleichzeitig die Voraussetzung dafür, dass muskuläre Beanspruchung positiv auf den Hippokampus einwirken kann. Dies hat Konsequenzen für den Schulsport. Eine Voraussetzung dafür, dass durch den Sportunterricht die Neubildung von Nervenzellen angeregt werden kann, ist, dass die

Schülerinnen und Schüler gerne am Sportunterricht teilnehmen. Von den Schülern der 4., 7. und 9. Klasse freuen sich zwei Drittel auf jede Sportunterrichtseinheit. Etwa 15 Prozent dieser Altersgruppen würden ihn dagegen abwählen. Mit zunehmendem Alter geht der Spaß am Sportunterricht deutlich zurück (Brettschneider et al., 2005), obwohl der Sport bei Jugendlichen aller sozialen Schichten die am häufigsten betriebene und subjektiv wichtigste Freizeitaktivität darstellt (Brettschneider, 2003). Das Sportangebot der Schulen sollte sich aus diesem Grund stärker an den Wünschen der Schülerinnen und Schüler orientieren und vor allem Erfolgserlebnisse vermitteln.

Obwohl mit ansteigendem Alter der Spaß am Sportunterricht abnimmt, fühlen sich die Schülerinnen und Schüler der genannten Klassenstufen im Sportunterricht deutlich wohler als in der Schule insgesamt. Während drei Viertel dieser Gruppe gerne am Sportunterricht teilnehmen, gehen nur 50 Prozent gerne in die Schule. Das Wohlbefinden der Schülerinnen und Schüler im Sportunterricht ist also höher als das allgemeine Wohlbefinden in der Schule (Brettschneider et al., 2005). Gleichzeitig führt ein größeres Angebot an Sportunterricht bzw. Schulsport zu einer Verbesserung des Sozialverhaltens.

Von 1993 bis 1997 wurde in einem Modellversuch an einer Grundschule die tägliche Sportstunde in den Klassen eins bis vier eingeführt. Dabei hatte man mit Zustimmung der Eltern zugunsten des erweiterten Sportunterrichts die Stundenzahl anderer Fächer gekürzt. Dies betraf unter anderem den Deutschunterricht. Nach Ablauf der vier Schuljahre schnitten die Schülerinnen und Schüler dieser Schule im Vergleich zu einer Kontrollschule in den Bereichen motorische Leistungsfähigkeit, Arbeits- und Sozialverhalten besser ab. So war in den Unterrichtspausen aggressives Verhalten um die Hälfte seltener als in der Kontrollschule, und insgesamt war weniger starkes aggressives Verhalten zu beobachten. Überdies kam es zu keinem Leistungsabfall in den gekürzten Fächern (Bös/Obst, 2000). Das belegen inzwischen auch internationale Studien. Ein Ausbau des Sport- und Bewegungsangebots an Schulen in Form von mehr Sportunterricht, bewegtem Unterricht, Bewegungspausen im Klassenzimmer und bewegten Pausen im Schulhof, der es Kindern im Schultag wiederholt ermöglicht, körperlich aktiv zu sein, trägt zu einer Verbesserung oder zumindest zu keiner Verschlechterung der Lernleistung bei und hat zudem positive Effekte auf die Konzentrationsleistung und das Sozialverhalten der Schülerinnen und Schüler (zur Übersicht siehe Chaddock et al., 2011; Spitzer/Hollmann, 2013).

Wie wichtig positive Emotionen beim Lernen sind, zeigt sich in bildgebenden Studien. Zwar trägt auch Angst dazu bei, dass wir unangenehme Erlebnisse sehr schnell lernen. Aber Angst verhindert gleichzeitig das, was beim Lernen erreicht werden soll: die Verknüpfung des neu zu Lernenden mit bereits bekannten Inhalten und die Anwendung des Gelernten auf andere Situationen und Beispiele. Aus diesem Grund fällt es Menschen mit Prüfungsangst schwer, einfache, aber Kreativität erfordernde Lösungen zu finden (Spitzer, 2002). Es wurde nachgewiesen, dass der emotionale Kontext,

in dem die Einspeicherung von neutralen Wörtern geschieht, einen modulierenden Einfluss auf die spätere Erinnerungsleistung hat (Erk et al., 2003). Wörter werden dann am besten erinnert, wenn sie in einem positiven emotionalen Kontext gelernt werden. Dabei kann die Aktivierung unterschiedlicher Hirnregionen ein späteres Erinnern vorhersagen, je nachdem, in welchem emotionalen Kontext Wörter eingespeichert werden. Während das erfolgreiche Einspeichern von Wörtern in einem positiven emotionalen Kontext eine Aktivität im Bereich des Hippokampus und Parahippokampus zeigte, fand sich eine Aktivierung der Amygdala während des erfolgreichen Einspeicherns in einem negativen emotionalen Kontext. Die Amygdala ist es, die es uns ermöglicht, angsterzeugende Erlebnisse schnell zu lernen, um sie zu einem späteren Zeitpunkt zu vermeiden. Erfolgreiches Einspeichern in einem neutralen Kontext aktiviert dagegen den frontalen Kortex. Diese Ergebnisse machen deutlich, wie eng Emotion und Kognition (Gefühl und Denken) miteinander verbunden sind. Auf den Punkt gebracht, sagen sie aus, dass Lernen bei guter Laune am besten funktioniert (Spitzer, 2002).

Überträgt man dieses Wissen auf die Schule, indem man den emotionalen Kontext beim Wörterlernen mit dem Klassenklima gleichsetzt, das im Wesentlichen von der Unterrichtsführung des Lehrers und einer positiven Lehrer-Schüler-Beziehung bestimmt wird (vgl. Emrich in diesem Band), so gilt Folgendes: Soll erfolgreich gelernt werden, indem der Hippokampus beim Lernen zum Zug kommt, muss eine positive Grundstimmung beim Lernen erzeugt werden, was beispielsweise durch ein gezieltes Lob vom Lehrer erfolgen kann. Was für das Lernen von Wörtern gilt, gilt im Übrigen auch für die sportliche Leistungsfähigkeit und damit auch für den Sportunterricht. Eine Untersuchung von 92 Hauptschülerinnen und Hauptschülern aus 9 Klassen des 5. und 6. Schuljahres hatte ergeben, dass vor allem sehr ängstliche Schülerinnen und Schüler ihre sportliche Leistungsfähigkeit nicht nur durch Training, sondern allein durch wenige gezielte, ermutigende Äußerungen der Sportlehrerin/des Sportlehrers deutlich steigern konnten. Dies betraf die Leichtathletikleistung beim Schlagballwurf, beim Weitsprung und am stärksten beim 50-Meter-Lauf (Tausch et al., 1976). Lob kann also «Beine machen»! Dieses Ergebnis zeigt, wie stark die Lernleistung der Schülerinnen und Schüler von der Person der Lehrerin bzw. des Lehrers abhängt. Das gilt für die sportliche Leistungsfähigkeit ebenso wie für die Lernleistung in anderen Unterrichtsfächern (vgl. Hattie, 2009).

Der Einfluss von körperlicher Aktivität ist auf affektiver Ebene abhängig von der Dosis der Belastung. In einer EEG-Studie wurden 20 Versuchspersonen einer 30-minütigen Fahrradergometer-Belastung bei 55 bzw. 70 Prozent der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max) sowie einer Ruhebedingung unterzogen (Petruzello/Tate, 1997). Vor der Belastung und zu mehreren Messzeitpunkten nach der Ausdauerbelastung wurden die Stimmung und die Zustandsangst gemessen und mit den Ergebnissen der EEG-Ableitung in Beziehung gesetzt. Während Ruhe und Ausdauerbelastung

bei 55 Prozent VO₂max keine affektiven Veränderungen bewirkten, sagte eine größere linksfrontale Gehirnaktivierung vor der Belastungsbedingung bei 70 Prozent eine gesteigerte Stimmung und verringerte Zustandsangst voraus. Sieben Probandinnen und Probanden, die nach der Ausdauerbelastung eine starke relative linksfrontale Aktivierung im EEG aufwiesen, berichteten nach der Ausdauerbelastung damit übereinstimmend von einem Rückgang der Angst. Dagegen führte die Ergometerbelastung bei sieben Probandinnen und Probanden mit anschließender starker relativer rechtsseitiger frontaler Aktivierung zu einem Anstieg der Angst. Diese Untersuchungsergebnisse deuten zum einen darauf hin, dass die affektive Reaktion nach Ausdauerbelastungen von der Ruheaktivität frontaler Gehirnregionen beeinflusst wird; zum anderen zeigt diese EEG-Studie, dass affektive Veränderungen durch körperliche Aktivität dosisabhängig sind. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Wirkung von Ausdauerbelastungen hinsichtlich des Wohlbefindens individuell unterschiedlich ausfällt. In Bezug auf die Belastungsintensität haben Ausdauerbelastungen von 70 Prozent der individuellen Leistungsfähigkeit eine höhere Wirkung als mittlere Belastungsintensitäten.

Serotonin. Sich laufend wohlfühlen

Sportliche Aktivität bewirkt einen Anstieg des Botenstoffs Serotonin im Gehirn. Der Neurotransmitter Serotonin beeinflusst auf struktureller Ebene die Bildung neuronaler Netzwerke in seinen weitreichenden Zielgebieten. Obwohl prozentual gesehen dem zentralen serotonergen System des menschlichen Gehirns nur eine geringe Rolle zukommt (über 90 Prozent des im Körper befindlichen Serotonins sind im Magen-Darm-Trakt, weitere fast 10 Prozent sind in den Thrombozyten nachweisbar; auf das Gehirn entfällt lediglich etwa 1 Prozent des im gesamten Körper befindlichen Serotonins; Hüther/Rüther, 2000), ist die funktionsgebende Relevanz des serotonergen Systems nicht zu unterschätzen. Man geht davon aus, dass es im Zentralnervensystem kaum eine Nervenzelle gibt, die nicht in ihrer Funktion durch Serotonin beeinflusst wird (Hüther/Rüther, 2000). Der Neurotransmitter Serotonin beeinflusst praktisch alle zentralnervös gesteuerten Funktionen und ist so beteiligt an der Regulation von Stimmung, Appetit, Schlaf, Schmerzverarbeitung, neuroendokrinen Funktionen, Angst, Gedächtnis, Aggression, Stressverarbeitung, motorischer Aktivität und der zirkadianen Rhythmik (Hüther/Rüther, 2000). Serotonin ist deshalb bei den unterschiedlichsten psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen, wie Parkinson, Chorea Huntington, Restless-legs- und Gilles-de-la-Tourette-Syndrom, bei Multipler Sklerose, Migräne, Depressionen, Zwangs-, Angst- und Persönlichkeitsstörungen, Schizophrenien, Suchterkrankungen, bei Schlaf- und Essstörungen, Demenz und beim kindlichen hyperkinetischen Syndrom, von Bedeutung (Hüther/Rüther, 2000). Kann das Serotoninsystem aufgrund genetischer oder nachteiliger

frühkindlicher Entwicklungsbedingungen nicht optimal ausreifen, besteht, so vermutet man, schon früh die Prädisposition für impulsives, antisoziales, aggressives und/oder melancholisches Verhalten, woraus in der weiteren Folge neurologisch-psychiatrische Erkrankungen entstehen können (Hüther/Rüther, 2000).

Ausgangsstoff für die Serotoninbiosynthese ist die Aminosäure Tryptophan (Hüther/Rüther, 2000). Bei Ausdauerbelastungen geht das an das Plasmaeiweiß gebundene Tryptophan (TRP) durch den Anstieg freier Fettsäuren in eine freie Form (f-TRP) über und kann damit die Blut-Hirn-Schranke passieren (Chaouloff, 1997). Die Transportrate an diesem Übergang hängt von der relativen Größe der peripheren Plasmaspiegel ab. Da die verzweigt-kettigen Aminosäuren, die mit der gesteigerten Konzentration an freiem Tryptophan um den Eintritt in das Gehirn konkurrieren, verstärkt von der Muskulatur aufgenommen werden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das f-TRP an der Blut-Hirn-Schranke einen Transporter besetzen und auf diese Weise in das Gehirn gelangen kann. Aus Tryptophan wird schließlich Serotonin synthetisiert (Hüther/Rüther, 2000).

Sportliche Belastungen können über die Steigerung der Serotoninbiosynthese eine Zunahme der zentralen serotonergen Aktivität bewirken. Die nachgewiesene stimmungssteigernde und angstlösende Wirkung des Sports sowie die Verbesserung geistiger Funktionen, wie der exekutiven Funktionen (Kubesch et al., 2003), nach körperlicher Belastung werden unter anderem auf Mechanismen zurückge-

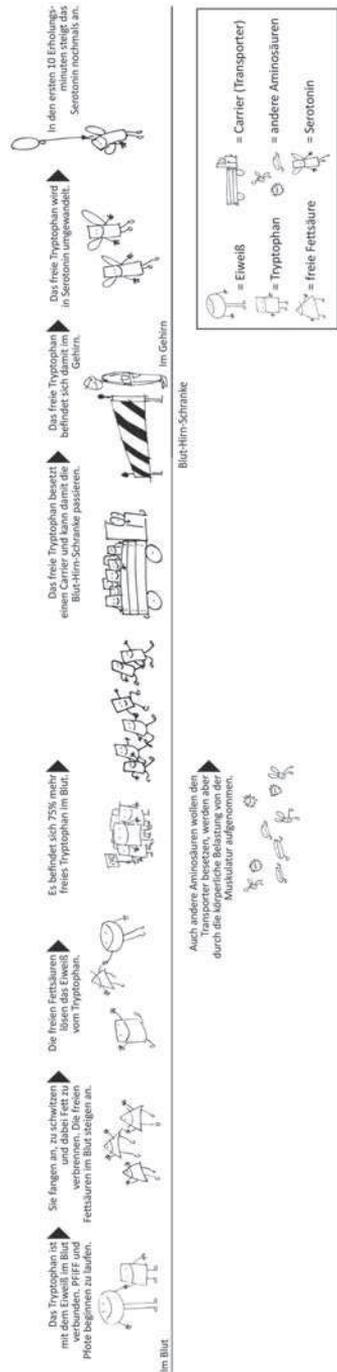


Abbildung 1: Serotoninbiosynthese, modifiziert nach Kubesch, 2013

führt, die letztlich dazu führen, vermehrt Serotonin bereitzustellen. An gesunden Probandinnen und Probanden wurde nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Serotinkonzentration durch die Verabreichung eines serotoninsteigernden Antidepressivums über einen Zeitraum von ein bis vier Wochen zu positiven Effekten hinsichtlich Persönlichkeit und Verhalten (wie Reizbarkeit, beleidigendes Verhalten, negativer Affekt und Zugehörigkeitsgefühl; Knutson et al., 2002) führt. Regelmäßiges sportliches Training lässt folglich positive Effekte (u. a. auf die Selbstregulationsfähigkeit) bei Menschen sowohl mit als auch ohne psychopathologische Beeinträchtigungen erwarten.

Soziales Lernen und soziale Integration durch den Sport

Während das Abspeichern von Fakten und Ereignissen durch den Hippokampus erfolgt, findet soziales Lernen weitgehend im Stirnhirn statt, das erst mit ca. 20 bis 25 Jahren vollständig entwickelt ist und allgemeine Regeln lernt (Spitzer, 2002). Für das Lernen von allgemeinen Regeln gilt Folgendes: Die Regeln, die wir in einem bestimmten Kontext lernen, können wir auf andere Kontexte übertragen. Von sozialen Kompetenzen und Werten, die über den Sport vermittelt und erlebt werden, wie Teamfähigkeit, Leistungsbereitschaft und Disziplin, können wir folglich in anderen Bereichen profitieren.

Wenn Schüler Sport machen, lernen sie Selbstwirksamkeit, d. h., sie lernen: «Ich kann es.», und sie lernen: «Wenn ich mir Mühe gebe, werde ich besser.» Wenn man trainiert, lernt man, und allmählich beherrscht man einen Bewegungsablauf, den man vorher noch nicht konnte, und das macht unmittelbar Freude und bedeutet Erfolg. Auf diese Weise lernen Schülerinnen und Schüler, dass Lernen Freude macht und zum Erfolg führen kann. Und wenn sie zudem in einem Wettkampf bestehen oder wenn sie an einer Aufführung teilnehmen, dann lernen sie, dass sie in der Lage sind, eigene Ängste zu überwinden. Somit lernen sie auf eine allgemeine Art wichtige Kompetenzen. Das Gehirn ist nicht dazu geeignet, Einzelheiten zu lernen. Im Gehirn speichert man allgemeines Wissen über die Welt. Einzelne Fakten sind vergleichsweise unwichtig (Spitzer, 2002). Wichtig ist das, was man an Fertigkeiten, Fähigkeiten, Einstellungen und Haltungen lernt. Und dies gilt es in der Schule zu lernen, weil man diese Kompetenzen im Leben ständig benötigt. Über den Sport ist es möglich, die Leistungsbereitschaft von Kindern und Jugendlichen sowie die adäquate Ausformung sozialer Umgangsregeln und damit die Selbstregulation zu fördern, die auch in anderen Lebensbereichen wichtig sind (vgl. Emrich in diesem Band). Gerade der Sport in der Gemeinschaft, in der soziale Interaktion stattfindet, ist deshalb ein idealer Ort, an dem Kinder und Jugendliche «für das Leben lernen». Auch auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollte dem Sportunterricht an Schulen eine größere Bedeutung zugesprochen werden.

Bereits eine frühe motorische Stimulation von Kleinkindern führt später, im Alter von vier bis sechs Jahren, zu einer höheren sozialen Kontaktbereitschaft und Selbstständigkeit. Kinder mit geringeren motorischen Fähigkeiten weisen dagegen geringere Kontaktbereitschaft sowie einen niedrigeren Beliebtheitsgrad auf als motorisch geschickte Kinder (Heim/Stucke, 2003). Vor allem übergewichtige Kinder sind sozialen Stigmatisierungen und damit dem Risiko einer ungünstigen psychosozialen Entwicklung ausgesetzt (Sygusch et al., 2003). Soziale Ausgrenzung erfahren auch Kinder und Jugendliche aus bildungsfernen Schichten oder Kinder mit Migrationshintergrund in besonderem Maße. Diese gesellschaftlichen Gruppen weisen in Sportvereinen eine erheblich niedrigere Mitglieder-Quote auf als deutsche Kinder (Schmidt, 2003). Vergleicht man den erteilten Sportunterricht in den verschiedenen Schulformen, sind Kinder aus bildungsfernen Schichten aber nicht nur im Vereinssport sondern auch hinsichtlich des Schulsports benachteiligt, denn sie erhalten auch weniger Sportunterricht (Brettschneider et al. 2005).

Selbst milde Formen sozialer Ausgrenzung verursachen im Gehirn Schmerz. Dies bestätigen bildgebende Studien, mit denen nachgewiesen werden konnte, dass bereits soziale Ausgrenzung durch eine ballspielende Gruppe zu einem vergleichbaren Aktivitätsmuster im Gehirn führt, wie physisch empfundener Schmerz (Eisenberger et al., 2003; Rainville et al., 1997). An diesen beiden Empfindungen ist der anteriore cinguläre Kortex beteiligt. Bei dieser Hirnstruktur handelt es sich um ein Alarmsystem, das in Konfliktsituationen aktiviert wird. Dabei macht es für das Gehirn offenbar keinen Unterschied, ob ihm durch körperlich oder psychisch wahrgenommenen Schmerz signalisiert wird: Hier ist etwas nicht in Ordnung!

Somit steht der Sport vor einer zentralen Herausforderung. Sport hat eine wichtige Integrationsfunktion. Er sollte so organisiert sein, dass Schülerinnen und Schüler Erfolgsergebnisse erfahren und eine Position einnehmen können, die sie zu einem wichtigen Bestandteil der Gruppe bzw. der Mannschaft macht (vgl. Emrich in diesem Band). Im Sportunterricht sollte deshalb das Ziel verfolgt werden, kooperatives Verhalten von Schülerinnen und Schülern zu fördern. Kooperation bedeutet dabei vor allem auch Rücksichtnahme gegenüber untrainierteren oder körperlich schwächeren Schülerinnen und Schülern. Das erfordert Verhaltensweisen, die man von Kindern nicht uneingeschränkt erwarten kann, sondern die im Laufe der Entwicklung erlernt werden müssen (Spitzer, 2002). Wertgeleitetes Handeln wird über das Frontalhirn gesteuert, dessen Verbindungen zu anderen Gehirnbereichen als Letztes mit einer isolierenden Myelinschicht versehen werden. Nicht myelinisierte Nervenfasern können Informationen (Aktionspotenziale) nur langsam weiterleiten und sind deshalb nicht voll funktionsfähig (siehe Kubesch [Entwicklung, Testung und neuronale Korrelate «kalter» und «heißer» exekutiver Funktionen] in diesem Band). Das bedeutet aber nicht, dass wertgeleitetes Handeln erst nach Abschluss der Myelinisierung erlernt werden kann. Heranwachsende benötigen dafür ausreichend Zeit und Raum zum

Probehandeln. Unterstützt wird dieser Prozess durch gute Vorbilder und klare Regeln. Die sind im Sport eindeutig definiert und werden bei Nichteinhaltung sanktioniert. Aus diesem Grund sollten durch den Sport neben Leistungsbereitschaft und Durchsetzungsvermögen sowohl wichtige sportsspezifische als auch sportübergreifende Werte wie Teamgeist, Toleranz, Verantwortungsbewusstsein und Fairness bis in die letzte Jahrgangsstufe nicht in der Theorie vermittelt sondern im Spiel regelmäßig erprobt werden. Es gibt sie also, die Möglichkeit, über Sport soziale Kompetenzen zu erlernen. Aber dies geschieht in erster Linie durch eigenes Handeln im Sport.

Fairplay! Sonst schlägt Sport auf den Magen

77 Prozent der Schülerinnen und Schüler und 79 Prozent der Lehrerinnen und Lehrer sehen eine wichtige Aufgabe des Sportunterrichts darin, den fairen Umgang miteinander zu fördern. Für Schulleiterinnen und Schulleiter, Lehrerinnen und Lehrer stellt Fairness damit das wichtigste Ziel des Sportunterrichts dar (Brettschneider et al., 2005). Für das Gehirn ist faires Verhalten gleichzusetzen mit einem Sieg. Auf unfaires Verhalten reagiert es dagegen mit Schmerz und körperlichem Unwohlsein über die Aktivierung des Gehirnabschnitts, der den Magen repräsentiert.

Verhält sich ein Sportler fair, werden beim Beobachter das gehirneigene Belohnungssystem und, damit verbunden, das ventrale Striatum und der orbitofrontale Kortex aktiviert (Singer/Kraft, 2004). Die Aktivierung dieses Belohnungssystems bei kooperativem Verhalten verstärkt dieses Verhalten und motiviert den Beobachter selbst zur Kooperation (Spitzer, 2002). Aus diesem Grund sind gute Vorbilder im Sport so wichtig. Durch faires Verhalten des Sportlers reagiert das Gehirn des Beobachters aufgrund der gesteigerten Aktivierung im ventralen Striatum und im orbitofrontalen Kortex mit Zustimmung und Empathie. Das faire Verhalten motiviert den Beobachter auf diese Weise dazu, sich ebenfalls kooperativ und fair zu verhalten. Fairness bekommt dem Gehirn also ebenso gut wie ein Sieg, denn in beiden Fällen wird das Belohnungssystem über dieselben neuronalen Mechanismen aktiviert. Unfares Verhalten quittiert das Gehirn dagegen über die Aktivierung der rechten Insel mit körperlichem Unwohlsein (Sanfey et al., 2003). Damit der Sport uns nicht auf den Magen schlägt, gibt es Regeln und Schiedsrichter bzw. Sportlehrer, Übungsleiter und Trainer, aber auch die Schüler selbst, die auf die Einhaltung der Regeln achten (vgl. Emrich in diesem Band). Bei Nichteinhaltung der Regeln wird der Sportler über eine dritte und neutrale Instanz, den Schiedsrichter bzw. das Kampf- oder Schiedsgericht, bestraft. Für das Gehirn ist es nicht notwendig, dass die geschädigte Person selbst die Sanktionierung durchführt. Bildgebende Studien haben gezeigt, dass es neurobiologisch betrachtet ausreicht, wenn Recht durch einen Dritten gesprochen wird, dann nämlich wird das ventrale Striatum des Belohnungssystems aktiviert (Singer et al., 2006). Der Sport schafft ideale Rahmenbedingungen dafür, sich gemäß den Spielre-

geln zu verhalten und auf diese Weise faires bzw. kooperatives und damit selbstreguliertes Verhalten zu erlernen.

Fazit

Das Gehirn ist anpassungsfähiger als ein trainierter Muskel; es gilt als das anpassungsfähigste Organ des menschlichen Körpers überhaupt. Die Neuroplastizität schafft die Voraussetzung dafür, dass über Sport und Bewegung auf Gehirnstrukturen und deren Funktionen eingewirkt werden kann. Dieser Prozess, der bereits im Fetalstadium einsetzt, hält über die gesamte Lebensspanne an und ist damit von der Kindheit bis ins hohe Alter von Bedeutung.

Auf struktureller Ebene fördert körperliche Aktivität die Neubildung, das Wachstum, die Aufrechterhaltung und Vernetzung von Nervenzellen. Diese Adaptionen erfolgen unter anderem auf der Grundlage einer belastungs- und trainingsbedingten Erhöhung neurotropher Wachstumsfaktoren und über die gesteigerte Konzentration von Neurotransmittern wie Serotonin. Die Anzahl der Nervenzellen und die Verbindung, die sie mit anderen Neuronen eingehen, beeinflussen dabei kognitive, emotionale und soziale Funktionen. Insbesondere exekutive Funktionen und die Fähigkeit zur Selbstregulation, die für Lernleistungen von Kindern und Jugendlichen, aber auch für deren sozial-emotionale Entwicklung zentral sind, können im Sport und durch den Sportunterricht gefördert werden. Soziales Lernen findet im Stirnhirn statt, in dem allgemeine Regeln repräsentiert sind. Es erfolgt am günstigsten durch eigenes Handeln in der Gruppe. Dabei können soziale Werte, die über den Sport vermittelt werden, auf andere Kontexte übertragen werden. Wer durch den Sport lernt, Erfolge zu erarbeiten und Niederlagen zu bewältigen, wird von diesen Kompetenzen auch in anderen Lebensbereichen profitieren. Ist das Sportangebot in Kindergärten, Schulen und Vereinen also darauf ausgerichtet, die Selbstregulation von Kindern und Jugendlichen zu fördern, kann die dort erlernte Selbstregulationsfähigkeit auf andere Bereiche und Lernsituationen übertragen werden. Dabei gilt es zu beachten, dass das Erlernen der Selbstregulation nicht von heute auf morgen und nicht allein aufgrund von Einsicht erfolgt. Da der präfrontale Kortex sich langsam entwickelt und vergleichsweise langsam lernt, benötigen Kinder und Jugendliche im Laufe ihrer Entwicklung sehr viele Situationen, in denen sie selbstreguliertes Verhalten üben und auf diese Weise lernen können. Ein Sportangebot, das auf die Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation ausgerichtet ist, kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten (Kubesch, 2013).

Das psychische Wohlbefinden steht ebenfalls in einem engen Zusammenhang mit körperlicher Aktivität. «Verbrennt» der Körper durch sportliche Aktivität Fett, bewirkt dies einen Anstieg von Serotonin im Gehirn, der sich positiv auf das Wohlbefinden auswirkt, indem die Stimmung gesteigert und aggressives Verhalten reduziert

wird. Die durch körperliche Aktivität angeregte Serotoninbiosynthese unterstützt auf diese Weise die Selbstregulationsfähigkeit. Serotonin hat zudem einen stimulierenden Einfluss auf den Wachstumsfaktor BDNF, der die Neurogenese anregt. Über die durch muskuläre Beanspruchung induzierte Neubildung von Nervenzellen im Hippokampus werden Lern- und Gedächtnisprozesse gefördert. Voraussetzung dafür ist, dass man ohne Stress, d. h. freiwillig und mit Freude seine körperliche Leistungsfähigkeit trainiert. Gleichzeitig schützt körperliche Aktivität vor den negativen Folgen von Stress und damit vor einem Rückgang neurotropher Wachstumsfaktoren. Für die Förderung von Lernprozessen ist es weiterhin wichtig, dass ohne Angst und damit ohne die Aktivierung der Amygdala, also in einem positiven emotionalen Kontext über den Hippokampus gelernt wird. Es gilt also, über muskuläre Beanspruchung Angst abzubauen und das Wohlbefinden zu steigern, damit über positive Emotionen die Lernleistung verbessert werden kann. Durch Sport und Bewegung läuft Lernen also leichter!

Deshalb ist es falsch, dass wir den Sportunterricht kürzen anstatt ihn auszubauen, wenn ihm eine so wichtige Rolle für die Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation zukommt. Und es ist innerhalb des Sport- und Bewegungsangebots an Schulen tatsächlich der Sportunterricht, der die besten Voraussetzungen dafür liefert. Durch ihn werden aufgrund seiner Verbindlichkeit nahezu alle Kinder- und Jugendlichen erreicht, er lässt ausreichend Zeit und Raum, um die Fitness zu steigern, die die Voraussetzung dafür ist, sich intensiv und ausdauernd zu belasten. Und er ermöglicht es, soziale Kompetenzen zu erwerben, wozu sich die Mannschaftssportarten im Besonderen eignen. Doch damit die Schüler von den vielfältigen Effekten des Sportunterrichts profitieren können, müssen sich zunächst die Entscheidungsträger in Schule und Politik aber auch die Eltern bewegen und sich für ein größeres Angebot an Sportunterricht und außerunterrichtlichen Sportangeboten an den Schulen einsetzen.

Gleichzeitig braucht es gut ausgebildete Sportlehrerinnen und Sportlehrer gerade an den Grundschulen, da diese frühe Lebensphase nicht nur für das motorische Lernen, sondern auch für das Erlernen der Selbstregulation entscheidend ist. Zudem sollten wissenschaftliche Erkenntnisse zur Bedeutung und Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation künftig einen festen Platz in der Aus- und Weiterbildung von (Sport-)Pädagogen und Pädagoginnen einnehmen. Die Vermittlung dieser Erkenntnisse ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Schulung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation im und durch den Sport nicht nur nebenbei, sondern explizit und dadurch effizient erfolgen kann.

Literatur

- Aberg, M. A., Pedersen, N. L., Torén, K., Svartengren, M., Bäckstrand, B., Johnsson, T., Cooper-Kuhn, C. M., Aberg, N. D., Nilsson, & M., Kuhn, H. G. (2009). Cardiovascular Fitness is Associated with Cognition in Young Adulthood. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106 (49), 20906–20911.
- Aldard, P. A., Cotman, & C. W. (2004). Voluntary Exercise Protects Against Stress-induced Decreases in Brain-derived Neurotrophic Factor Protein Expression. *Neuroscience*, 124, 985–992.
- Ameri, A. (2001). Neue Nervenzellen in alten Gehirnen. Eine mögliche Rolle bei Reparatur- und Lernprozessen. *Extracta Psychiatrica/Neurologica*, 1/2, 12–16.
- Beck, F., & Kubesch, S. (2013). Die Förderung exekutiver Funktionen in kleinen Sportspielen in der Grundschule – ein neurobiologisch motivierter Ansatz. *Erziehung und Unterricht*, 7–8; im Druck.
- Berchtold, N. C., Chinn, G., Chou, M., Kessler J. P., & Cotman C. W. (2005). Exercise Primes a Molecular Memory for Brain-derived Neurotrophic Factor Protein Induction in the Rat. *Neuroscience*, 133, 853–861.
- Bös, K., & Obst, F. (2000). Tägliche Sportstunde – Bericht eines Modellversuches. In R. Laging, G. Schillack (Hrsg), *Die Schule kommt in Bewegung*. Baltmannsweiler: Schneider-Verlag Hohengehren.
- Brettschneider, W. D., DSB, DSJ (2005). *DSB Sprint-Studie. Sportunterricht in Deutschland. Eine Untersuchung zur Situation des Schulsports*. Aachen: Meyer und Meyer Sport-Verlag.
- Brettschneider, W. D. (2003). Jugend, Jugendliche und ihre Lebenssituation. In W. Schmidt, I. Hartmann-Tews, W. D. Brettschneider (Hrsg), *Erster Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (S. 43–61). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.
- Buchner, A., & Brandt, M. (2002). Gedächtniskonzeptionen und Wissensrepräsentationen. In J. Müseler, W. Prinz (Hrsg), *Allgemeine Psychologie* (S. 495–543). Heidelberg: Spektrum.
- Buck, S. M., Hillman, C. H., Castelli, D. M. (2008). The Relation of Aerobic Fitness to Stroop Task Performance in Preadolescent Children. *Med Sci Sports Exerc*, 40, 166–172.
- Budde, H., Voelcker-Rehag, C., Pietrassyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P., & Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience letters*, 441, 219–223.
- Castelli, D. M., Hillman, C. H., Hirsch, J., Hirsch, A., & Drollette, E. (2011). FIT Kids: Time in target heart zone and cognitive performance. *Preventive Medicine*, doi:10.1016/j.ypmed.2011.01.019
- Castelli, D. M., Hillman, C. H., Buck, S. M., & Erwin, H. E. (2007). Physical Fitness and Academic Achievement in Third- and Fifth-grade Students. *Journal of Sports & Exercise Psychology*, 29, 239–252.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. V., VanPatter, M., Pontifex, M. B. et al. (2012a). A Functional MRI Investigation of the Association Between Childhood Aerobic Fitness and Neurocognitive Control. *Biol Psychol*, 89, 260–268.
- Chaddock, L., Hillman, C. H., Pontifex, M. R., Johnson, C. R., Raine, L. B., & Kramer, A. F. (2012b). Childhood Aerobic Fitness Predicts Cognitive Performance one Year Later. *Journal of Sports Sciences*, 30 (5), 421–430.
- Chaddock, L., Pontifex, M. B., Hillman, C. H., Kramer, A. F. (2011). A Review of the Relation of Aerobic Fitness and Physical Activity to Brain Structure and Function in Children. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17, 1–11.
- Chaddock-Heyman, L., Erickson, K. I., Voss, M. W., Knecht, A. M., Pontifex, M. B., Castelli, D. M., Hillman, C., & Kramer, A. F. (2013). The Effects of Physical Activity on Functional MRI Activation Associated with Cognitive Control in Children: A randomized controlled intervention. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1–13.
- Chang, Y. K., Laban, J. D., Gapin, J. I., & Etnier, J. L. (2012). The Effects of Acute Exercise on Cognitive Performance: A meta-analysis. *Brain Res*, 1458, 87–101. doi:10.1016/j.brainres.2012.02.068.
- Chaouloff, F. (1997). Effects of Acute Physical Exercise on Central Serotonergic Systems. *Med Sci Sports Exerc*, 29 (1), 58–62.
- Chomitz, V. R., Slining, M. M., McGowan, R. J., Mitchell, S. E., Dawson, G. F., & Hacker, K. A. (2009). Is There a Relationship Between Physical Fitness and Academic Achievement? Positive results from public school children in the northeastern United States. *Journal of School Health*, 79, 30–37.
- Eisenberger, N. I., Lieberman, M. D., & Williams, K. D. (2003). Does Rejection Hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*, 302, 290–292.

- Eliot, L. (2002). *Was geht da drinnen vor? Die Gehirnentwicklung in den ersten fünf Lebensjahren*. Berlin: Berlin.
- 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, 1313–1317.
- Erk, S., Kiefer, M., Grothe, J., Wunderlich, A. P., Spitzer, M., & Walter, H. (2003). Emotional Context Modulates Subsequent Memory Effect. *Neuroimage*, 18, 439–447.
- Furley, P. A., & Memmert, D. (2012). Working Memory Capacity as Controlled Attention in Tactical Decision Making. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 34, 322–344.
- Gothé, N., Pontifex, M. B., Hillman, C., & McAuley, E. (2013). The Acute Effects of Yoga on Executive Function. *Journal of Physical Activity & Health*, 10 (4), 488–495.
- Hattie, J. (2009). *Visible learning. A synthesis of over 800 Meta Analyses relating to achievement*. New York: Routledge
- Heim, R., & Stucke, C. (2003). Körperliche Aktivitäten und kindliche Entwicklung – Zusammenhänge und Effekte. In W. Schmidt, I. Hartmann-Tews, W. D. Bretschneider (Hrsg), *Erster Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (S. 127–144). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The Effect of Acute Treadmill Walking on Cognitive Control and Academic Achievement in Preadolescent Children. *Neuroscience*, 159, 1044–1054.
- Hogan, M., Kiefer, M., Kubesch, S., Collins, P., Kilmartin, L., & Brosnan, M. (2013). The Interactive Effects of Physical Fitness and Acute Aerobic Exercise on Electrophysiological Coherence and Cognitive Performance in Adolescents. *Experimental Brain Research*, 229, 85–96.
- Hollmann, W., Strüder, H. K., & Tagarakis, C. V. M. (2005). Gehirn und körperliche Aktivität. *Sportwissenschaft*, 1, 3–14.
- Hollmann, W., & Strüder, H. K. (2001). Gehirn, Geist, Psyche und körperliche Aktivität. In J. R. Nitsch, H. Allmer (Hrsg), *Denken – Sprechen – Bewegen* (S. 13–27). Köln: bps.
- Hollmann, W. (2000). *Öffentliche Anhörung zur Aktuelle Situation im Schulsport. Wortprotokoll der 20. Sitzung des Sportausschusses im Deutschen Bundestag*.
- Hüther, G., & Rütger, E. (2000). *Das serotonerge System*. Bremen: UNI-MED.
- Kamjio, K., Pontifex, M. B., O’Leary, K. C., Scudder, M. R., Wu, C., Castelli, D. M. et al. (2011). The Effects of an Afterschool Physical Activity Program on Working Memory in Preadolescent Children. *Dev Sci*, 14, 1046–1058.
- Kee, N., Teixeira, C. M., Wang, A. H., & Frankland, P. W. (2007). Preferential Incorporation of Adult-generated Granule Cells into Spatial Memory Networks in the Dentate Gyrus. *Nature Neuroscience*, 10 (3), 355–362.
- Kempermann, G. (2012). Körperliche Aktivität und Hirnfunktion. *Der Internist*, 53 (6), 698–704.
- Kida, N., Oda, S., & Matsumura, M. (2005). Intensive Baseball Practice Improves the Go/Nogo Reaction Time, but not the Simple Reaction Time. *Cognitive Brain Research*, 22, 257–264.
- Knutson, B., Wolkowitz, O. M., Cole, S. W., Chan, T., Moore, E. A., Johnson, R. C., Terpstra, J., Turner, R. A., & Reus, V. I. (2002). Selective Alteration of Personality and Social Behavior by Serotonergic Intervention. In J. T. Cacioppo, G. G. Berntson, R. Adolphs, C. S. Carter, R. J. Davidson, M. K. McClintock, B. S. McEwen, M. J. Meaney, D. L. Schacter, E. M. Sternberg, S. S. Suomi, S. E. Taylor (Eds.), *Foundations in social neuroscience* (pp. 1059–1069). Cambridge: The Mit Press.
- Kubesch, S. (2012). *Die vielfältigen Effekte körperlicher Aktivität auf Geist und Gehirn*. Ringbuchsammlung Schulsport, 44.55.
- Kubesch, S. (2013). *Förderung exekutiver Funktionen und der Selbstregulation im Sport*. PfiFF-Lehrwerk. Heidelberg: VERLAG BILDUNG plus.
- Kubesch, S., Walk, L., Spitzer, M., Kammer, T., Lainburg, A., Heim, R., & Hille, K. (2009). A 30-Min Physical Education Program Improves Students’ Executive Attention. *Mind, Brain, and Education*, 3 (4), 235–242.
- Kubesch, S., Bretschneider, V., Freudenmann, R., Weidenhammer, N., Lehmann, M., Spitzer, M., & Grön, G. (2003). Aerobic Endurance Exercise Improves Executive Functions in Depressed Patients. *Journal of Clinical Psychiatry*, 9, 1005–1012.

- Lan, X. (2009). *Bridging Naturalistic and Laboratory Measures of Self-Regulation: The development and validation of challenge tasks*. Dissertation, The University of Michigan.
- Langdon, K. D., & Corbett, D. (2011). *Improved Working Memory Following Novel Combinations of Physical and Cognitive Activity*, 9 Dez. [Epub ahead of print].
- Lee, I. M., Paffenbarger, R. S. jr., & Hennekens, C. H. (1997). Physical Activity, Physical Fitness and Longevity. *Aging Clinical and Experimental Research*, 9, 2–11.
- McEwen, B. S. (1999). Stress and Hippocampal Plasticity. *Annual Review of Neuroscience*, 22, 105–122.
- OECD (2013). *OECD Health Data 2004*. Paris: OECD.
- OECD (2011). *Health at a Glance 2011: OECD indicators*, OECD Publishing.
- Petruzello, S. J., & Tate, A. K. (1997). Brain Activation, Affect, and Aerobic Exercise: An examination of both state-independent and state-dependent relationships. *Psychophysiology*, 34, 527–533.
- Rainville, P., Duncan, G. H., Price, D. D., Carrier, B., & Bushnell, C. (1997). Pain Affect Encoded in Human Anterior Cingulate but not Somatosensory Cortex. *Science*, 277, 968–971.
- Ratey, J., & Hagerman, E. (2013). *Superfaktor Bewegung. Das Beste für ihr Gehirn*. Kirchzarten: VAK Verlag.
- Rimmele, U., Zellweger, B. C., Marti, B., Seiler, R., Mohiyeddini, C., Ehlert, U., & Heinrichs, M. (2007). Trained Men Show Lower Cortisol, Heart Rate and Psychological Responses to Psychosocial Stress Compared with Untrained Men. *Psychoneuroendocrinology*, 32 (6), 627–635.
- Sanfey, A. G., Rilling, J. K., Aronson, J. A., Nystrom, L. E., & Cohen, J. D. (2003). The Neural Basis of Economic Decision-making in the Ultimatum Game. *Science*, 300 (5626), 1755–1758.
- Scharff, C., Kirn, J. R., Grossmann, M., Macklis, J. D., & Nottebohm, F. (2000). Targeted Neuronal Death Affects Neuronal Replacement and Vocal Behavior in Adult Songbirds. *Neuron*, 25, 481–429.
- Schmidt, W. (2003). Kindheiten, Kinder und Entwicklung: Modernisierungstrends, Chancen und Risiken. In W. Schmidt, I. Hartmann-Tews, W. D. Brettschneider (Hrsg), *Erster Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (S. 19–42). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.
- Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J. P., Stephan, K. E., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2006). Empathic Neural Responses are Modulated by the Perceived Fairness of Others. *Nature*, 439, 26.
- Singer, T., & Kraft, U. (2004). Zum Mitfühlen geboren. *Geist und Gehirn*, 4, 32–37.
- Spitzer, M. (2002). *Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens*. Heidelberg: Spektrum.
- Spitzer, M. (1996). *Geist im Netz. Modelle für Lernen, Denken und Handeln*. Heidelberg: Spektrum.
- Spitzer, U., & Hollmann W. (2013). Experimental Observations of the Effects of Physical Exercise on Attention, Academic and Prosocial Performance in School settings. *Trends in Neuroscience and Education*, 2, 1–6.
- Statistisches Bundesamt (2010). *Gesundheit auf einen Blick*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- 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.
- Sygyusch, R., Brehm, W., & Ungerer-Röhrich, U. (2003). Gesundheit und körperliche Aktivität bei Kindern und Jugendlichen. In W. Schmidt, I. Hartmann-Tews, W. D. Brettschneider (Hrsg), *Erster Deutscher Kinder- und Jugendsportbericht* (S. 63–84). Schorndorf: Verlag Karl Hofmann.
- Tausch, A. M., Barthel, A., Fittkau, B., Langer, I., & Theunißen, R. (1976). Die Auswirkung ermutigender Lehreraußerungen auf die Leichtathletikleistung von Schülern. In D. Bierhoff-Alfermann (Hrsg), *Soziale Einflüsse im Sport* (S. 166–171). Darmstadt: Steinkopf.
- Theill, N., Schumacher, V., Adelsberger, R., Martin, M., & Jäncke, L. (2013). Effects of Simultaneously Performed Cognitive and Physical Training in Older Adults. *BMC Neuroscience*, 14, 103.
- Toering, T. T., Elferink-Gemser, M. T., Jordet, G., & Visscher, C. (2009). Self-regulation and Performance Level of Elite and Non-elite Youth Soccer Players. *Journal of Sports Sciences*, 27 (14), 1509–1517.
- Unger, J., & Spitzer, M. (2000). Bildung neuer Nervenzellen in alten Gehirnen? Ein kritischer Überblick über das Problem der postnatalen Neurogenese. *Nervenheilkunde*, 2, 65–68.
- Voss, M. W., Chaddock, L., Kim, J. S., VanPatter, M., Pontifex, M. B., Raine, L. B. et al. (2011). Aerobic Fitness is Associated with Greater Efficiency of the Network Underlying Cognitive Control in Preadolescent Children. *Neuroscience*, 199, 166–176.

- Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive Functions Predict the Success of Top-Soccer Players. *PLoS ONE*, 7 (4), e34731, 1–5.
- Voelcker-Rehage, C. (2005). Der Zusammenhang zwischen motorischer und kognitiver Entwicklung im frühen Kindesalter – Ein Teilergebnis der MODALIS-Studie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 56, 358–363.
- Winter, B., Breitenstein, C., Mooren, F. C., Voelker, K., Fobker, M., Lechtermann, A., Krueger, K., Fromme, A., Korsukewitz, C., Floel, A., & Knecht, S. (2007). High Impact Running Improves Learning. *Neurobiol Learn Mem*, 87 (4), 597–609.