

Zeitschrift für Sportpsychologie

1/13

www.hogrefe.de/zeitschriften/spo

Themenheft

Motorische und kognitive Leistungs- fähigkeit über die Lebensspanne

Tanja Hohmann, Benjamin Holfelder und Nadja Schott

Herausgeber:

Henning Plessner

Anne-Marie Elbe · Petra Jansen

Nadja Schott · Karen Zentgraf

HOGREFE



Originalia	Plessner, H., Elbe, A.-M., Jansen, P., Schott, N. & Zentgraf, K.: Editorial	1
	Hohmann, T., Holfelder, B. & Schott, N.: Editorial. Motorische und kognitive Leistungsfähigkeit über die Lebensspanne	2
	Zwicker, J. & Holfelder, B.: Motorische Ungeschicklichkeit aus der Perspektive der Neurowissenschaft <i>Developmental coordination disorder: Insights from neuroimaging</i>	5
	Stodden, D. & Holfelder, B.: Kein Kind bleibt zurück. Die Rolle der Entwicklung von motorischen Fertigkeiten <i>No child left behind: The role of motor skill development</i>	10
	Seidler, R. D. & Schott, N.: Mechanismen altersassoziierter Abnahmen im motorischen Lernprozess <i>Mechanisms underlying age-related declines in motor skill learning</i>	18
	Erickson, K. I. & Hohmann, T.: Die Effekte von Alter und Training auf die kognitive Gesundheit <i>The effects of age and training on cognitive health</i>	25
Hillman, C. H. & Schott, N.: Der Zusammenhang von Fitness, kognitiver Leistungsfähigkeit und Gehirnzustand im Schulkindalter. Konsequenzen für die schulische Leistungsfähigkeit <i>Fitness and cognitive performance in childhood</i>	33	
Nachrichten	Nachrichten aus der asp	42
	Gutachterinnen und Gutachter, Jahrgang 2012	41

Zeitschrift für Sportpsychologie

Organ der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie in Deutschland e. V.,
zugleich Organ der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGPs)

Ihr Artikel wurde in einer Zeitschrift des Hogrefe Verlages veröffentlicht.
Dieser e-Sonderdruck wird ausschließlich für den persönlichen Gebrauch
der Autoren zur Verfügung gestellt. Eine Hinterlegung auf einer persönlichen
oder institutionellen Webseite oder einem sog. „Dokumentenserver“ bzw.
institutionellen oder disziplinären Repositorium ist nicht gestattet.

Falls Sie den Artikel auf einer persönlichen oder institutionellen Webseite
oder einem sog. Dokumentenserver bzw. institutionellen oder disziplinären
Repositorium hinterlegen wollen, verwenden Sie bitte dazu ein „pre-print“
oder ein „post-print“ der Manuskriptfassung nach den Richtlinien der
Publikationsfreigabe für Ihren Artikel bzw. den „Online-Rechte für
Zeitschriftenbeiträge“ (www.hogrefe.de/zeitschriften).

Die Effekte von Alter und Training auf die kognitive Gesundheit

Kirk I. Erickson¹ und Tanja Hohmann²

¹University of Pittsburgh, ²Universität Stuttgart

Zusammenfassung. Mit zunehmendem Alter kommt es zu einem Abbau von Gehirnmasse. Es liegen allerdings zunehmend Hinweise darauf vor, dass moderate körperliche Aktivität vor diesem Prozess schützen bzw. diesem sogar entgegenwirken kann. Diese Forschungsrichtung zeigt, dass sich die Effekte von körperlicher Aktivität mit einiger Spezifität nachweisen lassen und sich mit der höchsten Konsistenz und am stärksten im präfrontalen Kortex und dem Hippocampus ereignen. Analysen haben gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen körperlicher Aktivität und besseren Leistungen in kognitiven Aufgaben durch die Größenveränderung von bestimmten Gehirnarealen moderiert wird. Des Weiteren konnten im Rahmen von funktionellen Bildgebungsstudien (funktionelle Magnetresonanztomografie; kurz: fMRT) ähnlich positive Effekte von Training auf Aktivierungsmuster im Gehirn gefunden werden. Körperliche Aktivität fördert darüber hinaus auch die Konnektivität zwischen frontalen Arealen und dem Hippocampus. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass Altersunterschiede in Bezug auf die Konnektivität dieser einzelnen Hirnareale nach einem 1-jährigen körperlichen Training ausgeglichen werden konnten. Bislang ist allerdings noch eine Reihe von Fragen in Bezug auf die Wirkungsweise von körperlichem Training (Dauer, Häufigkeit, Intensität, Art) sowie weiteren moderierenden Faktoren auf die kognitive Leistungsfähigkeit und Gehirngesundheit offen. Schlüsselwörter: Training, Gehirn, Altern

The effects of age and training on cognitive health

Abstract. The brain typically deteriorates in later life, but there is emerging evidence that participation in moderate intensity physical activity can both protect and treat volumetric losses. This research suggests that the effects of physical activity on the brain have some degree of specificity with the effects occurring most consistently and robustly in the prefrontal cortex and hippocampus. Analyses have reported that changes in the size of certain brain areas mediate the association between physical activity and better performance on cognitive tasks. In addition, functional magnetic resonance imaging studies have shown similar beneficial effects of exercise on task-evoked brain patterns as well as improvements in the degree of connectivity of frontal and hippocampal circuits, such that age differences in connectivity are eliminated after 1-year of exercise. Yet, despite these findings there remain many unanswered questions related to the dose of exercise, the moderators of exercise, and the types of exercise that influence brain health in late life.

Key words: exercise, brain, aging

Im Alter lassen einige kognitive Funktionen nach wie z. B. das Gedächtnis oder die exekutiven Funktionen. Die nachlassenden kognitiven Fähigkeiten gehen einher mit dem Schrumpfen bzw. einer Atrophie des Kortex und der subkortikalen Strukturen, die für das Befinden, sowie die kognitiven und motorischen Funktionen relevant sind (Raz et al., 2005). Obwohl der Rückgang kognitiver Funktionsfähigkeit, Gedächtniseinbußen und die Atrophie des Gehirns als „normale“ Alterserscheinungen angesehen werden, geht man zunehmend davon aus, dass ein radikaler Funktionsverlust nicht so unvermeidbar ist, wie man lange dachte. Tatsächlich haben sich etliche Studien der hohen Plastizität des älteren Gehirns und der Möglichkeit gewidmet, dass es sich bei Gedächtniseinbußen, der Atrophie des Gehirns und einer sich entwickelnde Demenz nicht zwangsläufig um einen unumgänglichen Prozess handelt. Die Ergebnisse le-

gen die Frage nahe, was getan werden kann, um den altersbedingten Verlust der kognitiven Funktionen entgegenwirken zu können.

In diesem Zusammenhang muss man davon ausgehen, dass die Trajektorien kognitiven Alterns signifikant unterschiedlich von Individuum zu Individuum sind. Während einige Personen bis ins hohe Alter relativ gesund bleiben, weisen andere Personen bereits frühzeitig deutliche Abnahmen der kognitiven Funktionen auf. Welche Faktoren tragen nun zu einem gelingenden Altern bei? Wenn wir in der Lage sein sollten, diejenigen Faktoren zu identifizieren, die zu einem gelingenden Altern beitragen, können wir dann auch solche Methoden entwickeln, die den Verlust von kognitiven Funktionen vorbeugen bzw. behandeln? Diese Fragen sind von essentieller Bedeutung. Zum einen wird unsere Gesellschaft immer älter, d.h. die Zahl

der über 65-Jährigen nimmt immer weiter zu, zum anderen ist es bislang nicht gelungen, pharmazeutische Methoden zu entwickeln, die effektiv den Verlust von Gedächtnisinhalten vorbeugen bzw. diesen behandeln.

Verschiedene Studien der letzten Jahre haben gezeigt, dass körperliche Aktivität eine der wenigen effektiven Methoden zu sein scheint, welche auf der einen Seite das Risiko senkt an Demenz zu erkranken und auf der anderen Seite eine positive Wirkung auf die kognitiven Funktionen hat. Mittlerweile liegt eine Vielzahl an Studien vor, die die Effekte von körperlicher Aktivität auf kognitive Funktionen beobachten bzw. das Gehirn aus einer molekularen oder epidemiologischen Perspektive betrachten. Des Weiteren ist es durch die Entwicklung von neurowissenschaftlichen Bildgebungsverfahren nun möglich, den Einfluss von körperlicher Aktivität und den Grad der kardiorespiratorischen Fitness auf verschiedene Dimensionen geistiger Gesundheit, wie das Gehirnvolumen, die Gehirnfunktion und die Konnektivität einzelner Areale zu untersuchen. Auf Basis dieses Überblickbeitrages werden wir die Schlussfolgerung ziehen, dass bereits moderate körperliche Aktivität ausreichend ist, um die kognitive Gesundheit während der gesamten Lebensspanne zu erhalten und die körperliche Aktivität intensiv zur Unversehrtheit des alternden Gehirns beiträgt.

Die Effekte von körperlicher Aktivität und kardiorespiratorischer Fitness auf das Gehirnvolumen

Mit zunehmendem Alter schrumpft und atrophiert das Gehirn (Jack et al., 2000; Raz et al., 2005). Einige Regionen wie der präfrontale und der mediale temporale Lappen schrumpfen dabei früher und schneller als andere Gehirnareale. Kognitive Prozesse, die von diesen Gehirnarealen unterstützt werden, zeigen ähnliche Verluste für das Gedächtnis und die exekutiven Funktionen (Raz et al., 2005). Die betroffenen Areale weisen allerdings auch im fortgeschrittenen Alter eine hohe Plastizität auf und es scheint, dass körperliche Aktivität den konsistentesten und robustesten Effekt auf diese Gehirnareale hat.

In einer ersten Studie untersuchten Colcombe et al. (2003) den Zusammenhang von kardiorespiratorischer Fitness und dem Gehirnvolumen innerhalb einer Gruppe relativ gesunder älterer Erwachsener. Konkret sollte die Frage beantwortet werden, ob eine höhere aerobe Ausdauer dazu führt, dass das Volumen des präfrontalen Kortex erhalten bleibt. Um das kortikale Volumen zu messen, wurde ein optimiertes Verfahren der voxel-basierten Morphometrie eingesetzt, das erlaubt, auf der Ebene einzelner Voxel den Anteil an grauer Gehirnmasse in Abhängigkeit vom Fitnesslevel

zu bestimmen. Obwohl zunehmendes Alter mit einem Verlust an grauer Gehirnmasse im präfrontalen, parietalen und temporalen Lappen assoziiert ist, zeigten die Ergebnisse der Studie, dass eine höhere kardiorespiratorische Fitness diese Verluste reduzierte. Diese Studie demonstriert als Erste, dass die positiven Effekte von aerober Fitness und Training möglicherweise *in vivo* durch den Einsatz von hochauflösenden Bildgebungsverfahren beobachtet werden könnten. Des Weiteren legt diese Studie als Erste nahe, dass das menschliche Gehirn auch im Alter noch eine hohe Plastizität besitzen könnte.

Mittlerweile haben eine Reihe von anderen Studien die Ergebnisse dieser Studie repliziert und den Zusammenhang von hoher kardiorespiratorischer Fitness und dem Gehirnvolumen weiter entwickelt. Beispielsweise konnten Erickson et al. (2007) in einer Gruppe von Frauen nach der Menopause nachweisen, dass diejenigen, die sich mehr als 10 Jahre einer Hormontherapie unterzogen hatten, größere Volumenverluste im medialen frontalen Kortex und im parahippocampalen Gyrus aufwiesen. Es zeigte sich jedoch, dass eine höhere kardiorespiratorische Fitness nicht nur die positiven Effekte einer kurzfristigen Hormontherapie fördert, sondern dass sie auch den Verlust an Gehirnmasse, der mit der längerfristigen Einnahme von Hormonen verbunden ist, mindert. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass eine höhere kardiorespiratorische Fitness einen generellen positiven Effekt auf die Größe des Gehirnvolumens haben könnte.

Der Zusammenhang zwischen dem kardiorespiratorischen Fitnesslevel und dem Volumen des präfrontalen Kortex wird erst seit kurzem gemeinsam mit kognitiven Funktionen betrachtet. Weinstein et al. (2012) gingen der Frage nach, inwiefern eine Zunahme des Volumens des präfrontalen Kortex den Zusammenhang von gesteigerter kardiorespiratorischer Fitness und den Leistungen in Tests zur exekutiven Kontrolle moderiert. Die Gruppe um Weinstein setzte die Methode der voxel-basierten Morphometrie ein, um den Zusammenhang von körperlicher Aktivität und dem Volumen der grauen Gehirnmasse einerseits und dem Zusammenhang von grauer Gehirnmasse und exekutiven Funktionen andererseits zu untersuchen. Zwischen allen Variablen konnten positive Verbindungen nachgewiesen werden.

Eine Mediationsanalyse mit bootstrapping-basiertem Verfahren sollte die Frage beantworten, inwiefern mehr graue Gehirnmasse zu besseren kognitiven Leistungen führt. Die Analyse zeigte, dass der Anteil an grauer Gehirnmasse im präfrontalen Cortex den Zusammenhang zwischen dem aeroben Fitnesslevel und den exekutiven Funktionen moderiert. Ein größerer Anteil an grauer Gehirnmasse ist deshalb nicht nur ein Nebenprodukt einer gesteigerten körperlichen Fitness,

sondern sie hat einen bedeutenden Einfluss auf die kognitiven Funktionen und das Verhalten.

Neben dem präfrontalen Kortex zeigen auch Gehirnregionen wie der Hippocampus signifikante atrophische Veränderungen mit zunehmendem Alter. Die Atrophie beträgt ungefähr 1–2 % pro Jahr nach dem 55. Lebensjahr bei Personen ohne Demenz und ungefähr 3 % bei Personen mit Demenz (Jack et al., 2000). Da ein höheres Maß an körperlicher Aktivität das Risiko minimiert, an Demenz zu erkranken, formulierte Erickson et al. (2009) die Hypothese, dass bei älteren Personen ein höheres Maß aerober Fitness mit einem größeren Volumen des Hippocampus in Verbindung steht. In einer eigenen Studie untersuchte Erickson et al. (2009) innerhalb einer Gruppe von Probanden ($n = 165$) den Zusammenhang von aerober Fitness und dem Volumen des Hippocampus. Er setzte dabei einen automatisierten Segmentierungsalgorithmus ein, der die Außenränder des Hippocampus für jede einzelne Person bestimmte, um so dessen Volumen bestimmen zu können. Die Daten der Studie zeigten, dass ein höherer Grad an kardiorespiratorischer Fitness mit einem größeren Volumen des Hippocampus assoziiert ist, auch wenn Variablen wie das Alter, das Geschlecht oder die Schulbildung kontrolliert werden. Die Ergebnisse der Studie zeigten darüber hinaus, dass die Größe des Hippocampus den Zusammenhang zwischen körperlicher Fitness und besseren Leistungen in einer räumlichen Gedächtnisaufgabe moderiert. Ähnlich wie die Ergebnisse der Studie von Weinstein et al. (2012), weisen die Ergebnisse der Studie von Erickson et al. (2009) darauf hin, dass diese Veränderungen in Bezug auf das Volumen einer Gehirnregion nicht nur ein Nebenprodukt sind, sondern einen bedeutenden Einfluss auf die kognitive Leistung und das Verhalten haben.

Die beschriebenen Studien zeigen einen klaren Zusammenhang zwischen der kardiorespiratorischen Fitness und dem Volumen der grauen Hirnmasse im präfrontalen Kortex und dem Hippocampus bei älteren Personen. Allerdings handelte es sich bei diesen Studien um Querschnittsstudien. Es bleibt daher offen, inwiefern es einen kausalen Zusammenhang zwischen der Teilnahme an entsprechenden Sportangeboten und dem Volumen der grauen Hirnsubstanz gibt. Es ist beispielsweise durchaus denkbar, dass ein größeres Volumen an grauer Hirnsubstanz generell zu einem gesünderen Lebensstil führen könnte und dass die weiter oben beschriebenen Zusammenhänge nicht automatisch durch eine gesteigerte körperliche Aktivität per se zustande gekommen sind. Um zu klären, ob es einen kausalen Zusammenhang gibt, sind Längsschnitt- und randomisierte Studien notwendig, in denen die Probanden gezielt körperlich aktiver sind. Das Volumen der grauen Gehirnmasse müsste vor und nach der Intervention gemessen werden, so dass die Kausalität

zwischen körperlicher Aktivität und Gehirnvolumen geklärt werden könnte.

Um die Effekte eines systematischen Trainings auf die Veränderungen des Gehirnvolumens zu untersuchen, wurde eine Gruppe von älteren Personen zufällig auf eine Trainings- und Kontrollgruppe verteilt. Die Probanden der Interventionsgruppe führten innerhalb von 6 Monaten an 3 Tagen in der Woche ein moderates Ausdauertraining (Gehen) durch (Colcombe et al., 2006). Die Kontrollgruppe führte ein kombiniertes Beweglichkeits- und Krafttraining durch, das dem zeitlichen Umfang der Interventionsgruppe entsprach. Die Daten der Studie zeigten, dass es bereits nach 6 Monaten Training zu einer Volumenzunahme entlang der medialen Wand des präfrontalen Cortex und im Genu des Corpus Callosum gekommen war, während die Kontrollgruppe eine leichte Abnahme an Hirnmasse in den gleichen Arealen aufwies. Diese Daten zeigen erstmals, dass durch eine entsprechende Intervention das Volumen der präfrontalen Areale in einer Gruppe von älteren Probanden gesteigert werden kann. Darüber hinaus zeigen diese Ergebnisse, dass auch im höheren Lebensalter die Plastizität des Gehirns gegeben ist, und dass schon eine moderate körperliche Belastung ausreicht, um die gewünschten Effekte zu erzielen.

In Anlehnung an die Studie von Colcombe et al. (2006), führte die Gruppe um Erickson et al. (2011) eine Studie mit dem Ziel durch, die Größe des Hippocampus durch ein entsprechendes Ausdauertraining bei einer Gruppe von älteren Personen zu trainieren. Die Intervention dauerte ein Jahr. Die Probanden wurden zufällig auf die beiden Experimentalgruppen verteilt. Eine Gruppe führte ein gezieltes Ausdauertraining (Gehen) an 3 Tagen die Woche für eine Dauer von 30–45 Minuten durch. Die andere Gruppe führte ein kombiniertes Beweglichkeits- und Krafttraining durch, das in der Intensität eher gering war und den gleichen zeitlichen Umfang wie das der Ausdauergruppe hatte. Die Daten wurden erneut mit dem bereits weiter oben beschriebenen Segmentationsalgorithmus (Erickson et al., 2009) analysiert. Betrachtet wurden der Hippocampus, Thalamus und Nucleus Caudatus. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Probanden der Ausdauergruppe nach einem Jahr ein erhöhtes Volumen des Hippocampus zeigten, aber nicht von Thalamus oder den Nucleus Caudatus. Im Gegensatz dazu zeigte die kombinierte Beweglichkeits- und Krafttrainingsgruppe leichte Verluste in Bezug auf die graue Hirnmasse nach dem einjährigen Training (Erickson et al., 2009). Die Berechnung der Effektgrößen ergab, dass die Ausdauergruppe eine Volumenzunahme von ca. 2 % in Bezug auf die Größe des anterioren Hippocampus zeigte, während die Kontrollgruppe eine um 1,5 % verringerte Größe derselben Region zeigte. Daraus kann geschlossen werden, dass ein moderates Ausdauerprogramm

zu einer im Verhältnis zum altersbedingten Volumentrückgang erhöhten Volumenzunahme des Hippocampus führt. Sowohl diese Studie, als auch die Studie von Colcombe et al. (2006) zeigen, dass auch ein älteres Gehirn noch plastisch ist und dass Areale, die normalerweise mit zunehmendem Alter kleiner werden, durch ein moderates Ausdauertraining sogar wieder vergrößert werden können. Darüber hinaus zeigen die Daten, dass ein moderates Ausdauertraining spezifische Effekte auf Volumenänderungen im Gehirn hat. Das Training wirkt sich vor allem auf den präfrontalen Kortex und den Hippocampus aus, während andere Areale wie der Thalamus, der Nucleus Caudatus und der sensomotorische Kortex seltener mit Training in Verbindung gebracht werden.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Studien gibt es Längsschnittstudien, die zeigen, dass sich körperliche Aktivität auch über eine Spanne von neun Jahren positiv auf das Volumen des Gehirns auswirkt. Beispielsweise untersuchten Erickson et al. (2010), ob ein höheres Maß an körperlicher Aktivität einen Langzeiteffekt auf das Volumen an grauer Hirnmasse hat. In einer Gruppe von Personen, die älter als 65 Jahre waren, wurde die selbst berichtete körperliche Aktivität erfasst. Zudem wurde berechnet, welche Strecke die Personen pro Woche zu Fuß absolvierten. Neun Jahre später wurden dieselben Personen dazu eingeladen, an einer Studie mit Magnetresonanztomographie (MRT) teilzunehmen, wobei entsprechend hochaufgelöste Bilder des Gehirns generiert werden konnten. Erickson et al. (2010) konnten in dieser Studie zeigen, dass ein höheres Maß an körperlicher Aktivität, das durch die zurückgelegte Strecke pro Woche erfasst worden war, ein Prädiktor für ein höheres Volumen an grauer Gehirnmasse war. Deutlich wurde dieser Effekt vor allem in den frontalen und parietalen Lappen und er zeigte sich am deutlichsten bei Probanden, die eine Strecke von mindestens 72 Häuserblocks pro Woche liefen. Vier Jahre später wurden die Probanden erneut getestet. Es zeigte sich, dass das größere Gehirnvolumen, das durch mehr körperliche Aktivität erreicht worden war, zu einem 2-fach verringerten Risiko führte, kognitive Störungen zu erleiden (entweder Demenz oder leichte kognitive Störungen). Diese Studie ist die erste, die demonstrieren konnte, dass die Effekte körperlicher Aktivität auf das Gehirnvolumen möglicherweise langfristige Konsequenzen haben und das Risiko, an Demenz zu erkranken, direkt reduzieren könnten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass körperliche Aktivität und ein höheres Fitnesslevel in direkter Verbindung zum Volumen des Gehirns bei älteren Menschen stehen. Dieses größere Gehirnvolumen steht wiederum in direkter Verbindung mit besseren Gedächtnisleistungen, besserer exekutiver Kontrolle und einem reduzierten Risiko kognitive Einschränkungen zu erleiden. Es ergeben sich zudem zwei wich-

tige Prinzipien aus den oben beschriebenen Studien. Erstens, die zahlreichen Studien und Stichproben weisen mit bemerkenswerter Konsistenz darauf hin, dass sich körperliche Aktivität und Fitness positiv auf das Volumen an grauer Gehirnmasse auswirkt. Zweitens zeigt sich, dass die Effekte von körperlicher Aktivität und Fitness spezifisch sind. Sie wirken vor allem auf das Volumen des präfrontalen Kortex und des Hippocampus.

Die Effekte von körperlicher Aktivität und Fitness auf funktionelle Messungen der Integrität des Gehirns

Die weiter oben beschriebenen strukturellen Veränderungen des Gehirns sind nur ein Faktor der kognitiven Gesundheit. Zusätzlich zu Unterschieden und Veränderungen im Volumen der grauen Gehirnmasse konnten andere Studien Effekte von körperlicher Aktivität auf die Integrität der weißen Gehirnmasse dokumentieren (Voss et al., 2012; Marks et al., 2007). Die weiße Gehirnmasse besteht aus verbindenden Fasern, die verschiedenen Gehirnarealen erlauben, miteinander zu kommunizieren. Es liegt die Vermutung nahe, dass durch körperliche Aktivität mehr Verbindungen entstehen, so dass die Areale besser miteinander kommunizieren können und demzufolge die kognitiven Funktionen positiv beeinflusst werden. Funktionelle Bildgebungsverfahren (fMRT) können genutzt werden, um die verbesserte Kommunikation der einzelnen Gehirnareale bei unterschiedlichen Aufgaben darzustellen bzw. um die funktionellen oder intrinsischen Verbindungen innerhalb des Gehirns zu veranschaulichen.

In der ersten Studie, die fMRT für die Untersuchung der Effekte körperlicher Aktivität nutzte, führten Colcombe et al. (2004) eine 2-teilige Studie durch. Im ersten Teil der Studie, eine Querschnittsanalyse, untersuchten Colcombe et al. den Zusammenhang von höherer aerober Fitness, die durch eine geschätzte $VO_2\max$ bestimmt wurde, und den aufgabenevozierten Aktivierungen im Gehirn mit Hilfe einer modifizierten Flanker Task. Die Flanker Task erfasst die selektive Aufmerksamkeit des Probanden und die Qualität der exekutiven Kontrolle. Colcombe et al. (2004) konnten in dieser Studie nachweisen, dass fittere ältere Erwachsene stärkere Aktivierungen bei den schwierigeren Aufgaben innerhalb der Flanker Task zeigten. Dies betrifft vor allem Areale wie den dorsolateralen präfrontalen und den parietalen Kortex, in denen Inhalte im Arbeitsgedächtnis gehalten werden bzw. die bei der selektiven Aufmerksamkeit eine Rolle spielen. Eine reduzierte Aktivierung bei den schwie-

rigsten Aufgaben innerhalb der Flanker Task zeigte sich hingegen im anterioren cingulären Kortex. Diese Region ist vor allem dann involviert, wenn es darum geht, gegensätzliche Informationen zu verarbeiten. Im zweiten Teil der Studie wurden die Probanden zufällig auf eine Ausdauergruppe und eine kombinierte Beweglichkeits- und Krafttrainingsgruppe verteilt. Das Training wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten ausgeführt. Zu Beginn und am Ende der Intervention wurden die Gehirne der Probanden, wie im ersten Teil der Studie, mittels fMRT gescannt. Die Ergebnisse dieser Studie waren ähnlich zu denen, die im ersten Teil der Studie gefunden worden waren. Die Probanden der Ausdauergruppe zeigten größere Aktivierungen im dorsolateralen und parietalen Kortex und eine verringerte Aktivierung im anterioren cingulären Kortex. Diese Ergebnisse sind insofern von Bedeutung als dass sie zeigen, dass körperliches Training nicht nur einen Effekt auf das Volumen des Gehirns hat, sondern sich auch auf die Aktivierungsmuster innerhalb des Gehirns auswirkt, welche für die Qualität der kognitiven Funktionen zentral sind.

Eine Reihe von weiteren fMRT Studien konnte ebenfalls bei Gruppen von älteren Erwachsenen, die entweder aerob fitter waren oder an einem Ausdauertraining teilnahmen, eine erhöhte Aktivität im präfrontalen Kortex feststellen während Aufgaben, die eine selektive Aufmerksamkeit (Prakash et al., 2011) oder eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit (Rosano et al., 2010) erforderten bzw. das semantische Gedächtnis (Smith et al., 2011) betrafen. Die Ergebnisse der Studien lassen vermuten, dass der präfrontale Kortex besonders sensitiv für die Effekte eines Ausdauertrainings und das Fitnesslevel sein könnte. Des Weiteren halten die Studien fest, dass nicht eine einzelne Gehirnregion (wie z. B. der präfrontale Kortex) die kognitiven Funktionen unterstützt, sondern dass es sich dabei vielmehr um ein ganzes Netzwerk von Arealen handelt. Deshalb scheint die Frage interessant, inwiefern körperliche Aktivität oder auch Fitness mit Veränderungen oder Unterschieden im funktionellen Zusammenwirken dieser einzelnen Areale assoziiert ist.

Mittlerweile hat eine Reihe von Studien die Effekte aerober Fitness und der Teilnahme an entsprechenden Bewegungsangeboten auf das funktionelle Zusammenwirken der verschiedenen Areale untersucht. In der ersten Studie untersuchten Voss et al. (2010a), inwiefern eine höhere Fitness Variationen in der altersbedingten Abnahme der Konnektivität zwischen Arealen erklären kann. Auf der Grundlage der oben beschriebenen Studien vermuteten die Forscher, dass ein höheres Maß an körperlicher Aktivität den altersbedingten Rückgang der funktionellen Konnektivität mindern könnte. Des Weiteren vermuteten sie, dass eine bessere Konnektivität bestimmter Areale den

Zusammenhang zwischen gesteigerter körperlicher Fitness und besserer kognitiven Leistung moderieren könnte. Für beide Annahmen fanden die Forscher Belege. Erstens zeigen ältere Probanden, die über eine bessere Ausdauerleistungsfähigkeit (gemessen mit der $VO_2\max$) verfügen, eine höhere Konnektivität zwischen den präfrontalen und parietalen Gehirnregionen sowie dem Hippocampus. Daher sind die altersbedingten Konnektivitätsverluste dieser Hirnnetzwerke bei fitteren älteren Personen weniger stark ausgeprägt. Zweitens ist eine höhere funktionelle Konnektivität zwischen diesen Hirnarealen mit besseren exekutiven Funktionen assoziiert, was wiederum die Assoziation zwischen höherer Fitness und kognitiver Leistungsfähigkeit moderiert. Die Ergebnisse der Studie unterstreichen die Bedeutung der Erforschung des Einflusses von Fitness und körperliche Aktivität nicht nur auf aufgaben-evozierte Aktivierungen, sondern auch auf die Integrität und Funktionalität der Netzwerke.

Im Anschluss an die Studie von Voss et al. (2010a) wurden von der gleichen Gruppe zwei weitere körperliche Aktivitätsinterventionen durchgeführt. Diese untersuchten, ob körperliche Aktivität systematisch die durch Voss et al. (2010a) identifizierte Hirnnetzwerke verändern würde. Voss et al. (2010b) führten eine einjährige Intervention mit körperlicher Aktivität durch, die ähnlich zu der bereits weiter oben beschriebenen Intervention von Erickson et al. (2011) war. Das Ziel der Intervention war, festzustellen, ob intrinsische, funktionale Konnektivitätsmessungen im Gehirn nach einem Jahr Fitnesstraining anders sein würden. Die Daten der Studie zeigten, dass sich die Konnektivität, oder der Grad der Kohärenz der einzelnen Areale (präfrontale, parietale Areale und Hippocampus) tatsächlich verbesserte und ähnlich zu der einer jüngeren Kontrollgruppe nach Abschluss der Intervention war. Das bedeutet, dass die Altersunterschiede in funktioneller Konnektivität durch eine einjährige Intervention eliminiert werden konnten. In einer ähnlichen, aber kleineren Studie konnten Burdette et al. (2010) ebenfalls feststellen, dass sich die funktionelle Konnektivität des Hippocampus in einer Gruppe von älteren Erwachsenen durch eine entsprechende Trainingsintervention verbessert hatte.

Die Ergebnisse sind wichtig und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse früherer aufgaben-evozierter Studien berücksichtigt werden, in denen es darum ging, Aktivierungsmuster mittels fMRT zu betrachten. Insgesamt gibt es zunehmend Evidenz dafür, dass bereits moderate körperliche Bewegung ausreicht, um aufgaben-evozierte fMRT-Aktivierungsmuster im Gehirn zu verändern und die Konnektivität und Kohärenz der Areale zu verbessern. Diese Unterschiede in Muster und Konnektivität scheinen die mit Fitness und körperliche Aktivität assoziierten kognitive Verbesserungen zu moderieren. Sie stimmen mit den im

vorherigen Abschnitt beschriebenen Hirnregionen überein, die eine auf Volumen bezogene Assoziation aufweisen. Zusammenfassend ist eine Erhöhung der körperlichen Aktivität möglicherweise ein wichtiger Schutz vor altersbedingten Verlusten in der funktionellen Konnektivität und könnte sogar die Funktionstüchtigkeit spezifischer Netzwerke des Gehirns verbessern, die an der exekutiven Kontrolle und der Gedächtnisleistung beteiligt sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die altersbedingte Abnahme der kognitiven Leistungsfähigkeit ist bekannt, aber möglicherweise weder so omnipräsent noch so unvermeidbar wie bisher angenommen. Körperliche Aktivität ist ein Faktor, der möglicherweise individuelle Variationen in der Gesundheit und Integrität des Gehirns beim Älterwerden erklärt. Sie könnte auch eine effektive Intervention zur Prävention und Behandlung manifesterter Abbau- und Verlusterscheinungen sein. Wie in diesem Review beschrieben, finden sich mittlerweile einige Studien, die zeigen, dass körperliche Aktivität zu einem größeren Volumen gerade in solchen Arealen führt, die typischerweise am stärksten durch das Altern betroffen sind. Zudem können die funktionellen Verbindungen zwischen den Arealen, die mit fortschreitendem Alter häufig an Kohärenz verlieren, durch körperliche Aktivität wieder gestärkt werden. Zusammengefasst bedeutet das, dass bereits moderate körperliche Aktivität eine gute Behandlung und Prävention sein könnte, die tiefgreifende Implikationen in der Reduktion von Hirnkrankheiten und kognitiven Einschränkungen im hohen Alter haben könnte.

Aus den oben beschriebenen Studien ergeben sich einige wichtige Prinzipien. Erstens scheinen die Effekte von körperlicher Aktivität und Fitness auf das Gehirn zum einen sehr umfassend zu sein, jedoch auch sehr spezifisch. Es gibt einige Areale, wie z. B. die frontalen, parietalen und medialen temporalen Lappen, die anscheinend durch Training beeinflusst werden können. Jedoch sind die stark konsistenten Effekte gerade in denjenigen Hirnarealen zu finden, die am frühesten und am deutlichsten vom Alter betroffen sind, wie der präfrontale Kortex und der Hippocampus. Diese Ergebnisse decken sich mit anderen Untersuchungen zu den kognitiven Funktionen. Diese zeigen, dass die Effekte von körperlicher Aktivität am konsistentesten und robustesten auf die exekutiven Funktionen und das Gedächtnis wirken. Besonders der präfrontale Kortex aber auch der Hippocampus spielen für diese kognitiven Funktionen eine zentrale Rolle. Des Weiteren werden die beschriebenen Ergebnisse durch Tierstudien unterstützt. In diesen Studien konnten signifikante morphologische und funktionel-

le Veränderungen des Hippocampus durch körperliche Aktivität nachgewiesen werden.

Das zweite Prinzip, das sich aus den dargestellten Studien ergibt ist, dass das Gehirn auch im fortgeschrittenen Alter noch eine hohe Plastizität besitzt und dass körperliche Aktivität diese Hirnplastizität für sich nutzen kann. Die oben beschriebenen Studien zeigen, dass Hirnplastizität anhand von Volumen (Erickson et al., 2011), Funktion (Colcombe et al., 2004) und Konnektivität (Voss et al., 2010b) gemessen werden kann. Innerhalb aller drei beschriebenen Maße zeigte sich, dass körperliche Aktivität dem altersbedingten Abbau entgegenwirken, oder sogar schon entstandene Altersunterschiede eliminieren kann. In der Tat scheint körperliche Aktivität bislang eine der effektivsten Methoden zu sein, um die Gesundheit und die Funktionsfähigkeit des Gehirns auch im fortgeschrittenen Alter zu beeinflussen. Anstatt das Gehirn als eine unveränderbare Struktur zu begreifen, sollte vielmehr davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei sehr wohl um eine form- und veränderbare Struktur handelt. Das bedeutet, auch ein älteres Gehirn ist noch sehr plastisch.

Obwohl aus den beschriebenen Studien sehr deutlich wird, dass sich körperliche Aktivität positiv auf die Gesundheit des älter werdenden Gehirns auswirkt, sind dennoch viele Fragen offen, die es gilt, in Zukunft zu beantworten. Beispielsweise ist nach wie vor unklar, wie viel eigentlich trainiert werden muss, bis sich körperliche Aktivität zuverlässig und konsistent auf die Gehirnfunktion auswirkt. Bislang liegen keine randomisiert-kontrollierten Studien vor, innerhalb derer die Dosis (Dauer und Intensität) des Trainings systematisch manipuliert wurde. Es liegen lediglich Hinweise darauf vor, dass die Teilnahme an intensiven Ausdauerbelastungen effektiver ist als die Teilnahme an weniger intensiven Trainingsprogrammen. Allerdings wurde das noch nicht weiter systematisch untersucht. Auf der Grundlage der oben beschriebenen Studien ist klar, dass ein 6-monatiges moderates Training ausreicht, um die Funktionsfähigkeit des Gehirns zu verbessern. Unklar ist allerdings wie viel Training notwendig ist und in welcher Intensität es erfolgen sollte, um optimale Effekte erzielen zu können. Des Weiteren kann angenommen werden, dass es von der zu untersuchenden Stichprobe abhängt, wie viel Training und welche Intensität notwendig ist, um Effekte erzielen zu können. Es ist beispielsweise denkbar, dass gebrechliche ältere Personen bereits nach einem 3-monatigen Training deutliche Verbesserungen in Bezug auf die kognitiven Funktionen zeigen, während bei bereits fitteren älteren Probanden eine 6-monatige Intervention notwendig ist, um ähnliche Effekte erzielen zu können. Zusammengefasst bedeutet das, dass es noch einige ungeklärte Fragen in Bezug auf die Dauer und Intensität der Interventionen gibt, wenn sie sich positiv auf die Funktionsfähigkeit des Gehirns aus-

wirken soll und dass die körperliche Verfassung der zu untersuchenden Stichprobe dabei eine nicht unerhebliche Rolle spielt. Des Weiteren ist bislang nicht bekannt, welche Art bzw. Form von Training am effektivsten ist, wenn es darum geht, die Funktionalität des Gehirns zu verbessern. Es ist beispielsweise durchaus denkbar, dass Mannschaftssportarten, die zusätzlich eine höhere soziale als auch kognitive Komponente haben, effektiver sind als solche Sportarten, die einen weniger sozialen Charakter haben. Allerdings ist es außerdem möglich, dass es auch von der Persönlichkeit der einzelnen Person abhängt, ob eher Sportarten bevorzugt werden bzw. effektiv sind, die man alleine ausführt oder solche, die man im Team macht.

Eine andere bislang wenig erforschte Frage ist die nach den Faktoren, die die Effekte von Training auf die Funktionsweise des Gehirns moderieren. Beispielsweise könnten genetische Faktoren den Einfluss von körperlicher Aktivität auf die kognitiven Funktionen bzw. die Gehirnfunktionen als solche moderieren. In einer Studie von Erickson et al. (2011) konnte gezeigt werden, dass Veränderungen in Bezug auf das Volumen des Hippocampus mit einem höheren Level des Proteins BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor) einhergehen. Ein bestimmter Nukleotid-Baustein innerhalb des BDNF Genes ist dafür verantwortlich wie viel BDNF ausgeschüttet wird. Es ist deshalb denkbar, dass die positiven Effekte von körperlicher Aktivität auf die Funktionsfähigkeit des Gehirns nicht zuletzt auf das Protein BDNF zurückzuführen sind. Dennoch sind weitere Studien notwendig, um zu klären, inwiefern genetische Faktoren hier eine Rolle spielen. Ähnlich könnte aber auch das Essverhalten einen Effekt in Bezug auf die Funktionsfähigkeit des Gehirns haben. Es ist beispielsweise möglich, dass eine Kombination aus einem gesunden Essverhalten und körperlicher Aktivität einen größeren positiven Einfluss auf die Gehirnfunktionen hat, als es durch einen einzelnen der beiden Faktoren erreicht werden könnte. Aktuell liegen dazu allerdings keine Daten vor, ob und inwiefern die Ernährung bzw. die Kombination aus gesunder Ernährung und körperlicher Aktivität eine Rolle spielt.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass bislang unklar ist, wie lange die Effekte von körperlicher Aktivität erhalten bleiben. Wie weiter oben beschrieben wurde, kann durch ein 6-monatiges bzw. 1-jähriges Training das Volumen der grauen Hirnmasse vergrößert und die Verbindungen einzelner Areale gestärkt werden. Unklar ist bislang allerdings, wie lange diese Effekte nach Beendigung der Intervention anhalten. Es stellt sich die Frage, ob die nachgewiesene Zunahme des Gehirnvolumens sich auch dann noch nachweisen lässt, wenn die Probanden nach Beendigung der Intervention weiter trainieren. Unklar ist auch, was passiert, wenn das Training beendet wird, d. h. gehen die positiven Effekte in Bezug auf das Volumen und

die Konnektivität der Areale dann verloren? Hat lebenslange körperliche Aktivität einen größeren Effekt bzw. ist sie nachhaltiger als das bei eher kurzfristigen Interventionen der Fall ist? Bislang liegen kaum Studien vor, die diese Fragen beantworten können.

Zusammengefasst stellt dieser Überblicksartikel eine Reihe von Studien vor, die den Einfluss von körperlicher Aktivität auf die Gesundheit und die Funktionsweise des älter werdenden Gehirns untersucht haben. Alle Studien zeigen, dass bereits moderate körperliche Aktivität zu einer Vergrößerung des Gehirnvolumens führt, wirksam gegen den altersbedingten Abbau von Hirnmasse ist, die Gehirnfunktion verbessert und dem Verlust der Konnektivität einzelner Areale entgegenwirkt. Die Studien zeigen zudem deutlich, dass auch das älter werdende Gehirn durchaus noch plastisch ist und, dass sich körperliche Aktivität sehr spezifisch auf bestimmte Art und Weise und innerhalb entsprechender Areale auswirkt. Obwohl immer deutlicher wird, welchen entscheidenden Einfluss körperliche Aktivität auf die Funktionstüchtigkeit des Gehirns hat, gibt es aktuell noch eine Reihe von offenen Fragen, die es in Zukunft zu beantworten gilt.

Literatur

- Burdette, J. H., Laurienti, P. J., Espeland, M. A., Morgan, A., Telesford, Q., Vechlekar, C. D. et al. (2010). Using network science to evaluate exercise-associated brain changes in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 23.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Raz, N., Webb, A. G., Cohen, N. J., McAuley, E. et al. (2003). Aerobic fitness reduces brain tissue loss in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological sciences and medical science*, 58, 176–180.
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E. et al. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*, 61, 1166–1170.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J. et al. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 3316–3321.
- Erickson, K. I., Colcombe, S. J., Elavsky, S., McAuley, E., Korol, D. L., Scalf, P. E. et al. (2007). Interactive effects of fitness and hormone treatment on brain health in postmenopausal women. *Neurobiology of Aging*, 28, 179–185.
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Hu, L., Morris, K. S. et al. (2009). Aerobic fitness is associated with hippocampal volume in elderly humans. *Hippocampus*, 19, 1030–1039.
- Erickson, K. I., Raji, C. A., Lopez, O. L., Becker, J. T., Rosano, C., Newman, A. B. et al. (2010). Physical activity predicts gray matter volume in late adulthood: The Cardiovascular Health Study. *Neurology*, 75, 1415–1422.

- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L. et al. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*, 3017–3022.
- Jack, C. R., Petersen, R. C., Xu, Y., O'Brien, P. C., Smith, G. E., Ivnik, R. J. et al. (2000). Rates of hippocampal atrophy correlate with change in clinical status in aging and AD. *Neurology*, *55*, 484–489.
- Marks, B. L., Madden, D. J., Bucur, B., Provenzale, J. M., White, L. E., Cabeza, R. et al. (2007). Role of aerobic fitness and aging on cerebral white matter integrity. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1097*, 171–174.
- Prakash, R. S., Voss, M. W., Erickson, K. I., Lewis, J. M., Chaddock, L., Malkowski, E. et al. (2011). Cardiorespiratory fitness and attentional control in the aging brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 229.
- Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Williamson, A. et al. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cerebral Cortex*, *15*, 1676–1689.
- Rosano, C., Venkatraman, V. K., Guralnik, J., Newman, A. B., Glynn, N. W., Launer, L. et al. (2010). Psychomotor speed and functional brain MRI 2 years after completing a physical activity treatment. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*, *65*, 639–647.
- Smith, J. C., Nielson, K. A., Woodard, J. L., Seidenberg, M., Durgerian, S., Antuono, P. et al. (2011). Interactive effects of physical activity and APOE-ε4 on BOLD semantic memory activation in healthy elders. *NeuroImage*, *54*, 635–644.
- Voss, M. W., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Chaddock, L., Malkowski, E., Alves, H. et al. (2010a). Functional connectivity: A source of variance in the association between cardiorespiratory fitness and cognition? *Neuropsychologia*, *48*, 1394–1406.
- Voss, M. W., Heo, S., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Alves, H., Chaddock, L. et al. (2012). The influence of aerobic fitness on cerebral white matter integrity and cognitive function in older adults: Results of a one-year exercise intervention. *Human Brain Mapping*. doi: 10.1002/hbm.22119.
- Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S. et al. (2010b). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *2*.
- Weinstein, A. M., Voss, M. W., Prakash, R. S., Chaddock, L., Szabo, A., White, S. M. et al. (2012). The association between aerobic fitness and executive function is mediated by prefrontal cortex volume. *Brain, Behavior, and Immunity*, *26*, 811–819.

Kirk I. Erickson, PhD

Department of Psychology
Center for the Neural Basis of Cognition
University of Pittsburgh
3107 Sennott Square
Pittsburgh, PA 15260
USA
E-Mail: kiericks@pitt.edu