



Sabine Kubesch
(Hrsg.)

Exekutive Funktionen und Selbstregulation

Neurowissenschaftliche
Grundlagen und Transfer in die
pädagogische Praxis

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

 **hogrefe**

Exekutive Funktionen und Selbstregulation

Exekutive Funktionen und Selbstregulation

Sabine Kubesch (Hrsg.)

Sabine Kubesch

Herausgeberin

Exekutive Funktionen und Selbstregulation

Neurowissenschaftliche Grundlagen und Transfer
in die pädagogische Praxis

2., aktualisierte und erweiterte Auflage



Geschützte Warennamen (Warenzeichen) werden nicht besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen eines solchen Hinweises kann also nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Warennamen handelt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Kopien und Vervielfältigungen zu Lehr- und Unterrichtszwecken, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Anregungen und Zuschriften bitte an:

Hogrefe AG

Lektorat Psychologie

Länggass-Strasse 76

3000 Bern 9

Schweiz

Tel: +41 31 300 45 00

E-Mail: verlag@hogrefe.ch

Internet: <http://www.hogrefe.ch>

Lektorat: Dr. Susanne Lauri

Herstellung: Daniel Berger

Druckvorstufe: punktgenau GmbH, Bühl

Umschlagabbildung: © iStock/Christopher Futcher

Umschlag: Claude Borer, Riehen

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Finidr s.r.o., Český Těšín

Printed in Czech Republic

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

© 2014 Verlag Hans Huber, Hogrefe AG, Bern

© 2016 Hogrefe Verlag, Bern

(E-Book-ISBN_PDF 978-3-456-95624-4)

(E-Book-ISBN_EPUB 978-3-456-75624-0)

ISBN 978-3-456-85624-7

Nutzungsbedingungen:

Der Erwerber erhält ein einfaches und nicht übertragbares Nutzungsrecht, das ihn zum privaten Gebrauch des E-Books und all der dazugehörigen Dateien berechtigt.

Der Inhalt dieses E-Books darf von dem Kunden vorbehaltlich abweichender zwingender gesetzlicher Regeln weder inhaltlich noch redaktionell verändert werden. Insbesondere darf er Urheberrechtsvermerke, Markenzeichen, digitale Wasserzeichen und andere Rechtsvorbehalte im abgerufenen Inhalt nicht entfernen.

Der Nutzer ist nicht berechtigt, das E-Book – auch nicht auszugsweise – anderen Personen zugänglich zu machen, insbesondere es weiterzuleiten, zu verleihen oder zu vermieten.

Das entgeltliche oder unentgeltliche Einstellen des E-Books ins Internet oder in andere Netzwerke, der Weiterverkauf und/oder jede Art der Nutzung zu kommerziellen Zwecken sind nicht zulässig.

Das Anfertigen von Vervielfältigungen, das Ausdrucken oder Speichern auf anderen Wiedergabegeräten ist nur für den persönlichen Gebrauch gestattet. Dritten darf dadurch kein Zugang ermöglicht werden.

Die Übernahme des gesamten E-Books in eine eigene Print- und/oder Online-Publikation ist nicht gestattet. Die Inhalte des E-Books dürfen nur zu privaten Zwecken und nur auszugsweise kopiert werden.

Diese Bestimmungen gelten gegebenenfalls auch für zum E-Book gehörende Audiodateien.

Anmerkung:

Sofern der Printausgabe eine CD-ROM beigelegt ist, sind die Materialien/Arbeitsblätter, die sich darauf befinden, bereits Bestandteil dieses E-Books.

Inhalt

Hinweise zur 2. Auflage	8
Vorwort <i>Sabine Kubesch</i>	9
„Muss das so heißen?“ <i>Katja Weidner</i>	19
Von der Forschung ins Klassenzimmer und aufs Spielfeld <i>Sabine Kubesch und Sonja Hansen</i>	21
Teil 1	
Wissenschaftliche Grundlagen zur Bedeutung und Förderung exekutiver Funktionen und der Selbstregulation	25
<i>Adele Diamond</i> Biologische und soziale Einflüsse auf kognitive Kontrollprozesse, die vom präfrontalen Kortex abhängen	27
<i>Manfred Spitzer</i> Geld und Glück, Karies und Kriminalität	57
<i>Roy F. Baumeister</i> Wo ein Wille ist	67
<i>Sabine Kubesch</i> Entwicklung, Testung und neuronale Korrelate „kalter“ und „heißer“ exekutiver Funktionen	75
<i>Clancy Blair</i> Stress und die Entwicklung von Selbstregulation im Armutskontext	87
<i>Philip David Zelazo und Kristen E. Lyons</i> Das Potenzial frühkindlichen Achtsamkeitstrainings: Neurowissenschaftliche Perspektive auf entwicklungsbezogene und sozial-kognitive Prozesse	103
<i>Torkel Klingberg</i> Training und Plastizität des Arbeitsgedächtnisses	117
<i>Sabine Kubesch</i> Der Sport macht's!	137

Adele Diamond und Kathleen Lee

Interventionen, die sich bei der Entwicklung exekutiver Funktionen
bei 4- bis 12-jährigen Kindern als hilfreich erwiesen haben 161

Teil 2

Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die pädagogische Praxis 179

Katrin Hille

Exekutive Funktionen – Häufig gestellte Fragen von Lehrkräften 181

Ross W. Greene

Kinder machen ihre Sache gut, wenn sie können 189

Markus Karr

ADHS und ADS in der Schule. Informationen und Empfehlungen eines
Kinder- und Jugendpsychiaters 205

Janina Eberhart

Pädagogische Konzepte zur Förderung der exekutiven Funktionen
und der Selbstregulation von Kindern und Jugendlichen 217

Marie Ottilie Frenkel

Achtsamkeitstraining in der Schule 231

Daniel J. Siegel

Blick ins Gehirn. Das Gehirn in Ihrer Hand 247

Andrea Liebers, Sabine Kubesch und Sonja Hansen

Stopp oder es kracht! Die Drei aus Hirnschmalz 257

Elena Bodrova und Deborah J. Leong

Selbstregulation: Eine Basis für frühes Lernen 267

Walter Mischel

„Selbstkontrolle kann man lernen“ 273

Verena Hofer, Sabine Kubesch und Sonja Hansen

„Weit entfernt von Bullerbü“. Förderung der Selbstregulation – Tipps für Eltern 279

Center on the Developing Child, Harvard University

Exekutive Funktionsfähigkeiten üben und verbessern – von der frühen
Kindheit bis ins Jugendalter 295

Susan E. Gathercole und Tracy P. Alloway

Arbeitsgedächtnis verstehen. Ein Leitfaden fürs Klassenzimmer 323

Monika Brunsting

Exekutive Funktionen und Lernschwierigkeiten oder: Wo ist denn hier der Regisseur? . . 337

<i>Jutta Maurach und Roland Bauer</i>	
Exekutive Funktionen im offenen Mathematik- und Deutschunterricht in Grundschulen – am Beispiel von <i>Einstern</i> und <i>Einsterns Schwester</i>	357
<i>Darya Lenz und Stefan Zöllner-Dressler</i>	
Wege zur Förderung exekutiver Funktionen im instrumentalen und allgemeinen Musikunterricht	369
<i>Thomas Bannenberg</i>	
Yoga. Eine Bewegungspause	387
<i>Armin Emrich</i>	
„Mein Verhalten muss auch in der Niederlage ein positiv konstruktives, ein selbstreguliertes Verhalten sein“	393
Die Herausgeberin	401
Die Autoren	401
Sachwortverzeichnis	407

Hinweise zur 2. Auflage

In der zweiten Auflage des Herausgeberbandes wurden bereits enthaltene Texte der ersten Auflage teilweise aktualisiert und weitere Texte in das Buch aufgenommen. Mit einem Artikel von Roy F. Baumeister und einem Interview mit Walter Mischel sind zwei Beiträge renommierter Wissenschaftler aus dem Bereich der Willensforschung hinzugekommen. Durch zwei weitere Texte wurde der Praxisteil des Buches gestärkt: In der Übungssammlung vom Center on the Developing Child der Harvard University und einem Beitrag zur verhaltenstherapeutischen Förderung sind zahlreiche Übungen und praktische Hinweise beschrieben, mit denen exekutive Funktionen und die Selbstregulation über die gesamte Entwicklungsspanne in Krippe, Kindergarten, Schule und im häuslichen Umfeld gefördert werden können. Ein Wissensposter, das einen Überblick über die spannende Geschichte der Erforschung exekutiver Funktionen liefert, leitet den Theorieteil des Buches ein.

In den Texten dieses Buches wird aus Gründen der sprachlichen Vereinfachung und der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Vorwort

Sabine Kubesch

Die exekutiven Funktionen und die Fähigkeit zur Selbstregulation sind entscheidend für den Lernerfolg und in diesem Zusammenhang vergleichbar bedeutsam wie die Intelligenz. Gleichzeitig beeinflussen sie wesentlich die sozial-emotionale Entwicklung der Kinder und Jugendlichen. Die Erkenntnisse, die Monat für Monat in den wichtigsten nationalen und internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften in den Bereichen Medizin, Psychologie, Pädagogik und Neurowissenschaft dazu publiziert werden, machen deutlich, wie wichtig es ist, dass diese Erkenntnisse in Kindergärten und Schulen, aber auch in Familien und in den Freizeitbereich Einzug halten und dort umgesetzt werden. All diejenigen, die Kinder in ihrer Entwicklung und beim Lernen begleiten, sollten über die Bedeutung und Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation informiert sein.

Bereits vor etwa zwanzig Jahren erfuhren die Leser der New York Times (NYT), dass das Arbeitsgedächtnis vom präfrontalen Kortex beeinflusst wird. Seitdem wird in dieser weltweit wichtigsten Tageszeitung regelmäßig über die exekutiven Funktionen berichtet. In der Online-Ausgabe ist zu lesen, dass das Stirnhirn im REM-Schlaf (engl. *Rapid Eye Movement*) „offline“ geht, dass Wutattacken von den exekutiven Funktionen beeinflusst werden und dass bei jugendlichen Amokläufern die Tatsache eine Rolle spielen kann, dass ihr Stirnhirn noch nicht ausgereift ist. Aber auch zur Frage des Lernerfolgs werden seit dem Jahr 2001 Millionen Leser der NYT über die Bedeutung und Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation informiert: zu förderlichen Aspekten der Mehrsprachigkeit und des Sports, zur Bedeutung des kindlichen Spiels, zum Zusammenhang von exekutiven Funktionen und ADHS und zum negativen Einfluss schneller Zeichentrickfilme.

Im deutschsprachigen Raum und in den öffentlichen und politischen Diskussionen dieser Länder sind diese Erkenntnisse noch nicht in einem vergleichbaren Ausmaß angekommen. Das verdeutlicht der Beitrag „Muss das so heißen?“ von Katja Weidner. Die Rektorin einer Heidelberger Grundschule beschreibt auf unterhaltsame Weise, dass die etwas umständliche Bezeichnung „exekutive Funktionen“ bislang immer wieder zu Missverständnissen und dadurch häufig zu Irritationen führt. Gleichzeitig geht aus ihrem Artikel hervor, dass dieses Konstrukt wichtige Hilfestellungen bietet, sobald ein ausreichendes Hintergrundwissen vorhanden ist. Mit diesem Beitrag wollten wir einer wichtigen Zielgruppe des Buches, den Lehrern, eine Stimme geben und auf die nachfolgenden Texte neugierig machen.

Der durchgängig illustrierte Beitrag „Entwicklungsgeschichten“ von Sabine Kubesch und Sonja Hansen gibt einen kurzen Überblick über die Erforschung der exekutiven Funktionen. Der Weg reicht zurück ins 19. Jahrhundert und führt von Läsionsstudien an Tier und Mensch zur Hightech-Forschung im neurowissenschaftlichen Labor an gesunden Personen bis aufs Spielfeld und ins Klassenzimmer der Schule von heute.

Das Buch ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden wissenschaftliche Grundlagen zu den exekutiven Funktionen und der Selbstregulation vermittelt. Im zweiten Teil wird aufgezeigt, wie die wissenschaftlichen Erkenntnisse in die pädagogische Arbeit übertragen werden können. Dabei zeigt sich, wie vielfältig Pädagogen in ihrem jeweiligen Handlungsfeld zur Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation von Kindern und Jugendlichen beitragen können.

Die wissenschaftlichen Grundlagen werden von zwei Beiträgen der nordamerikanischen Wissenschaftlerin Adele Diamond umrahmt. Diamond ist Professorin für Development Cognitive Neuroscience an der University of British Columbia in Vancouver. Sie gilt als eine der weltweit führenden Wissenschaftlerinnen auf diesem Forschungsgebiet und befasst sich seit vielen Jahren mit Entwicklungsprozessen der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation. In ihrem ersten Beitrag beschreibt sie biologische und soziale Einflüsse auf kognitive Kontrollprozesse (exekutive Funktionen), die vom Stirnhirn, dem präfrontalen Kortex, beeinflusst werden. Diese haben Implikationen sowohl für klinische Störungen wie ADHS als auch für Bildungsprozesse. Erkenntnisse dieses einleitenden Beitrages ziehen sich durch das gesamte Buch: Exekutive Funktionen und die Selbstregulation können mit einfachen Methoden und Materialien in alltäglichen Situationen gefördert werden. Der Artikel macht bewusst, wie wichtig das Spiel, der Sport und die musischen Fächer für die Ausbildung exekutiver Funktionen sind. Gemeinsam mit Kathleen Lee vom Development Cognitive Neuroscience Lab der University of British Columbia führt Diamond in ihrem zweiten Beitrag aus, welche Programme in der Kindheit nachweislich positiv auf die exekutiven Funktionen und die Selbstregulation einwirken.

Eine der wichtigsten Untersuchungen zu Selbstkontrolle und Selbstdisziplin stammt aus einer neuseeländischen Langzeitstudie. Die Ergebnisse dieser Studie werden von Manfred Spitzer, Professor und Leiter der Psychiatrischen Universitätsklinik und des ZNL TransferZentrums für Neurowissenschaften und Lernen an der Universität Ulm in seinem Beitrag „Geld und Glück, Karies und Kriminalität. Selbstkontrolle fürs Leben und Überleben“ detailliert dargestellt. Den Lesern wird bewusst gemacht, wie wichtig es ist, in der Kindheit die Selbstregulation zu fördern, denn die kindliche Selbstregulation hat weit über die Schulzeit hinaus Einfluss auf Bildung, Gesundheit, Wohlstand und soziale Sicherheit. Wenn Schulen die Kinder auf das Leben vorbereiten wollen, dann müssen sie die Selbstregulation der Kinder fördern!

Roy F. Baumeister ist einer der international bekanntesten Sozialpsychologen. In seinem Beitrag zeigt er, dass Willenskraft und Selbstdisziplin eine wesentliche Grundlage für Glück und Erfolg darstellen. Wird Willenskraft beansprucht, ermüdet diese. Gleichzeitig kann sie durch regelmäßige, niedrig dosierte Übungen zur Selbstkontrolle gestärkt werden. Willenskraft lässt sich trainieren wie ein Muskel, so bringt es Baumeister auf den Punkt.

Als Nächstes gibt Sabine Kubesch, Geschäftsführerin und Leiterin von INSTITUT BILDUNG plus, einen kurzen Überblick über die Entwicklung und Testung sowie zu den neuronalen Korrelaten sogenannter „heißer“ und „kalter“ exekutiver Funktionen. Während man bei abstrakten Entscheidungsprozessen in neutralen Situationen von „kalten“ exekutiven Funktionen spricht, ordnet man „heiße“ exekutive Funktionen risikoreichen Entscheidungsprozessen und motivational und emotional bedeutsamen Situationen zu. Die Untersuchungsergebnisse zu den in diesem Beitrag dargestellten Testverfahren belegen, dass sich die Entwicklung „heißer“ exekutiver Funktionen langsamer vollzieht als die Entwicklung „kalter“ exekutiver Funktionen. Dies entspricht der Erfahrung, dass Heranwachsenden die Selbstregulation in einem neutralen Kontext leichter und früher gelingt als in einer emotional herausfordernden Situation.

Clancy Blair, Psychologieprofessor an der New York University, beschreibt in seinem Beitrag „Stress und die Entwicklung von Selbstregulation im Armutskontext“ die Auswirkungen von psychosozialen Stress auf die kindliche Entwicklung und auf neuronale Netze, die exekutive Funktionen und Selbstregulation beeinflussen. Anhaltender Stress in der frühen Kindheit beeinträchtigt die Aktivität von Stressreaktionssystemen. Dies kann die Selbstregulation negativ beeinflussen. Blair macht deutlich, welchen Einfluss Bildungseinrichtungen haben, den negativen Folgen von frühem Lebensstress entgegenzuwirken, der im Armutskontext häufiger auftritt. Dieses Wissen sollte Pädagogen Mut machen! Die Förderung der Selbstregulation kann in Bildungseinrichtungen auch dann gelingen, wenn Kinder aus sozial schwierigen Verhältnissen stammen. Gelingt die Förderung, profitieren davon alle Kinder – besonders aber Kinder aus sozial schlechter gestellten Schichten.

Philip David Zelazo, Professor am Institute for Child Development der University of Minnesota, und Kristen Lyons, Professorin an der Abteilung Psychologie der Metropolitan State University in Denver, zeigen in ihrem Beitrag, welches Potenzial in einem frühkindlichen Achtsamkeitstraining steckt. Ein Achtsamkeitstraining kann die Entwicklung von Selbstregulation fördern, indem Top-down-Prozesse (regulierte) über den präfrontalen Kortex gestärkt und Bottom-up-Prozesse (automatische) wie Stress und Angst abgeschwächt werden.

Torkel Klingberg, Professor für kognitive Neurowissenschaft am Karolinska Institut in Stockholm, befasst sich in seinem Beitrag mit dem Training und der Plastizität des Arbeitsgedächtnisses. Das Arbeitsgedächtnis galt lange Zeit als nicht trainierbar. Wie in allen hoch innovativen Wissenschaftsbereichen besteht hier nach wie vor ein erheb-

licher Forschungsbedarf. Bereits auf Grundlage der vorliegenden Studien wird deutlich, dass die Arbeitsgedächtniskapazität durch Training beeinflussbar ist. Ein Training des Arbeitsgedächtnisses hat darüber hinaus u. a. für die Aufmerksamkeitsleistung wichtige Transfereffekte. Klingberg zeigt auf, dass diese Erkenntnisse für schulische Lernleistungen und damit für den Bildungsbereich von Bedeutung sind.

Das Arbeitsgedächtnis und weitere exekutive Funktionen werden auch durch körperliches Training positiv beeinflusst. Auf die vielfältigen Effekte von Sport und Bewegung auf exekutive Funktionen, Selbstregulation, Lernleistung und sozial-emotionale Lernprozesse geht Sabine Kubesch in ihrem Beitrag „Der Sport macht’s!“ ein. Er ist ein Plädoyer für mehr Sportunterricht und außerunterrichtliche Sportangebote an den Schulen.

Der Praxisteil beginnt mit einem Beitrag von Katrin Hille, Direktorin des ZNL TransferZentrums für Neurowissenschaften und Lernen an der Universität Ulm. Basierend auf einem intensiven Austausch mit Vertretern aus der Praxis gibt sie Antworten auf häufig gestellte Fragen von Lehrkräften zu den exekutiven Funktionen.

Im Umgang mit Kindern und Jugendlichen, die größere Probleme mit der Selbstregulation haben, ist eine wertschätzende Haltung die zentrale Voraussetzung dafür, um mit ihnen an ihrer Selbstregulationsfähigkeit arbeiten zu können. In dem Artikel „Kinder machen ihre Sache gut, wenn sie können“ macht Ross Greene, Professor für Psychiatrie an der Harvard University, bewusst, dass kein böser Wille dahintersteckt, wenn sich Kinder und Jugendliche „herausfordernd“ verhalten. Er zeigt auf, wie wichtig und hilfreich es ist, hinter das Verhalten zu blicken und zu erkennen, welche kognitiven Fähigkeiten gefördert werden müssen, damit die Heranwachsenden ihr Handeln besser steuern können.

Kinder und Jugendliche mit einer Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitäts-Störung (ADHS) haben besonders große Schwierigkeiten mit der Selbstregulation. Markus Karr, Oberarzt im Kinder- und Jugendpsychiatrischen Dienst des Kantons Zürich, beantwortet in seinem Beitrag Fragen der Grundschulpädagogin Katja Weidner zu ADHS.

Nationale und internationale pädagogische Konzepte, die auf die Förderung der exekutiven Funktionen und der Selbstregulation von Kindern und Jugendlichen ausgerichtet sind, werden von Janina Eberhart vom Internationalen Zentrum Frühkindliche Bildung, Betreuung und Erziehung am Deutschen Jugendinstitut beschrieben. Ihr Beitrag verdeutlicht, wie die Förderung in unterschiedlichen Formen umgesetzt werden kann. Dazu können eine gut strukturierte Lernumgebung, die kindgerechte Vermittlung neurobiologischer Erkenntnisse, die Anwendung von Problemlösestrategien, ein umfassendes Coaching von Eltern und Pädagogen sowie die Einbeziehung von Bewegung, Sport und Spiel beitragen.

Die Sportpsychologin und Gymnasiallehrerin Marie Otilie Frenkel beschreibt am Beispiel eines von ihr an der Universität Heidelberg entwickelten Trainingsprogramms, wie Achtsamkeitsübungen in der Schule umgesetzt werden können.

Damit Kinder und Jugendliche lernen, über ihr Verhalten, ihr Denken und ihre Emotionen zu reflektieren, ist es hilfreich, ihnen zu erläutern, welche Prozesse sich im Gehirn vollziehen, wenn die Selbststeuerung schwerfällt. Der Beitrag von Daniel Siegel, „Blick ins Gehirn. Das Gehirn in Ihrer Hand“, veranschaulicht, wie neurobiologische Grundlagen zur Selbstregulation vermittelt werden können. Das Handmodell, das der Psychiater und Professor an der University of California entwickelt hat, hilft dabei, sich mentaler Prozesse bewusst zu werden, die an der Steuerung von Denken, Verhalten und Gefühlen beteiligt sind.

Dass man selbst Grundschulkindern neurobiologische Grundlagen zu den exekutiven Funktionen und der Selbstregulation vermitteln kann, zeigen die Ausschnitte aus dem Kinderbuch „Stopp oder es kracht!“ der Bilderbuchreihe „Die Drei aus Hirnschmalz“ von Andrea Liebers, Sabine Kubesch und Sonja Hansen.

In den folgenden Beiträgen rückt das schulische Lernen in den Mittelpunkt. Lernschwierigkeiten von Kindern basieren nicht selten auf einer mangelnden Selbstregulationsfähigkeit. Diese Kinder haben häufig Schwierigkeiten mit der Impulskontrolle und dem Belohnungsaufschub. Die beiden Psychologinnen aus Denver, Professorin Deborah Leong und Elena Bodrova, haben das Kindergarten- und Vorschulprogramm „Tools of the Mind“ entwickelt, auf das in mehreren Texten in diesem Buch eingegangen wird. Sie beleuchten gängige Mythen zur Selbstregulation, weisen auf Ursachen mangelnder Selbstregulation hin und zeigen Förderungsmöglichkeiten in Kindergärten und Schulen auf.

Um eine besondere Form der Selbstregulation, der Fähigkeit zum Belohnungsaufschub, geht es im Interview mit Walter Mischel, dem Erfinder des legendären Marshmallow-Tests. Der Psychologe erläutert, wie bedeutsam es ist, auf Belohnung warten zu können, und was wir dabei von Kindern lernen können.

Wie man Belohnungsaufschub und weitere wichtige selbstregulatorische Fähigkeiten wie Emotionsregulation, Umstellungsfähigkeit und fokussierte Aufmerksamkeit zu Hause mit den Kindern und Jugendlichen üben und lernen kann, beschreiben Verena Hofer, Sabine Kubesch und Sonja Hansen in ihrem Beitrag „Weit entfernt von Bullerbü“. Sie zeigen, dass auch Lehrer die Eltern bereits in kurzen Gesprächen, bei Elterninformationsveranstaltungen und im Rahmen von Elternabenden mit einfachen Hinweisen und Beispielen dabei unterstützen können. Dies kann sich nicht nur auf die Eltern-Kind-Beziehung und die täglichen Abläufe zu Hause positiv auswirken, sondern auch auf das Lern- und Sozialverhalten der Kinder und Jugendlichen in der Schule. Rund 100 weitere Übungsbeispiele für verschiedene Altersgruppen von 6 Monaten bis zum jungen Erwachsenenalter sind im Leitfaden des Center on the Developing Child der Harvard University beschrieben.

Susan Gathercole, Professorin an der University of York, und Tracy Alloway, University of North Florida, erläutern in ihrem Praxisbeitrag zum Arbeitsgedächtnis, warum das Arbeitsgedächtnis für schulisches Lernen wichtig ist. Sie zeigen Merkmale

von Kindern mit schwachem Arbeitsgedächtnis auf und geben Tipps, wie die Förderung von Kindern mit Arbeitsgedächtnisproblemen in der Schule umgesetzt werden kann.

Monika Brunsting geht in ihrem Beitrag auf Lernschwierigkeiten ein, die mit exekutiven Funktionen in enger Verbindung stehen. Die Schulpsychologin, Psychotherapeutin und Sonderpädagogin zeigt auf, wo in der Schule exekutive Funktionen gefordert sind, wie diese erfasst werden können und welche Möglichkeiten es gibt, sie in der Schule zu trainieren.

In dem Beitrag von Jutta Maurach, Grund- und Hauptschullehrerin und Referentin für Qualitätsentwicklung und Evaluation beim Landesinstitut für Schulentwicklung Baden-Württemberg, und Roland Bauer, ehemaliger Grund- und Hauptschullehrer und Schulrat mit langjähriger Erfahrung in der Ausbildung von Lehrkräften, werden Mathematik- und Deutschaufgaben der Grundschule vorgestellt, für deren erfolgreiche Bearbeitung exekutive Funktionen eine wichtige Grundlage darstellen. Diese Beispiele machen bewusst, wie groß die Herausforderungen für Kinder beim täglichen Lernen sind, die über nicht gut ausgebildete exekutive Funktionen verfügen.

Darya Lenz, INSTITUT BILDUNG plus, und Stefan Zöllner-Dressler, Musikpädagoge und Professor an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg, stellen musikalische Übungen aus dem Musikunterricht an Schulen vor, die die exekutive Funktionen der Schüler bereits implizit schulen. Darüber hinausgehend werden erste Übungen aufgezeigt, in denen exekutive Funktionen im Musikunterricht explizit trainiert werden. Trotz des auch hier bestehenden Forschungsbedarfs deutet sich an, wie eng der Zusammenhang von Musizieren und exekutiven Funktionen ist.

Erste Studien belegen die förderlichen Effekte von Yoga auf exekutive Funktionen. Thomas Bannenberg, Sozialpädagoge, Yogalehrer und Autor erfolgreicher Bücher zum Kinderyoga, demonstriert, wie Yoga in Bewegungspausen an Schulen zum Training exekutiver Funktionen eingesetzt werden kann.

Den Abschluss des Bandes bildet ein Interview mit Armin Emrich, Fachleiter Sport am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung in Freiburg, ehemaliger Handballnationalspieler und Handballbundestrainer. Das Interview zur Förderung exekutiver Funktionen und der Selbstregulation im Sportunterricht zeigt eindrucksvoll, dass im Sport nicht nur die Chance liegt, Kinder und Jugendliche körperlich stark zu machen. Der Sportunterricht eignet sich in besonderer Weise auch dafür, die mentale Stärke der Heranwachsenden auszubilden. Dabei kommt den Sportlehrern eine Schlüsselrolle zu.

Die im ersten Teil beschriebenen theoretischen Grundlagen verdeutlichen, wie wichtig es ist, dass in Bildungseinrichtungen und im häuslichen Umfeld die exekutiven Funktionen und die Selbstregulation von Kindern und Jugendlichen gezielt gefördert werden. Für diejenigen Leser, die direkt in den Praxisteil des Buches einsteigen möchten, werden am Ende des Vorworts die zentralen exekutiven Funktionen *Arbeits-*

gedächtnis, Inhibition und *kognitive Flexibilität*, die der Fähigkeit zur Selbstregulation unterliegen, erläutert.¹

Wir wünschen viel Freude beim Lesen des Buches und bei der Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Für den Lernerfolg von Kindern und Jugendlichen und für ihr weiteres Leben ist es wichtig, dass wir mit Geduld und mit einer wertschätzenden Haltung beharrlich an der Ausbildung ihrer Selbstregulationsfähigkeit arbeiten. Das dafür notwendige Hintergrundwissen möchte dieses Buch liefern.

Eine kurze Einführung in die exekutiven Funktionen

Zu den exekutiven Funktionen zählen das *Arbeitsgedächtnis*, die *Inhibition* und die *kognitive Flexibilität*. Das *Arbeitsgedächtnis* ermöglicht es uns, Informationen kurzzeitig zu speichern und mit den gespeicherten Informationen zu arbeiten. Mithilfe der *Inhibition* sind wir in der Lage, spontane Impulse zu unterdrücken, die Aufmerksamkeit willentlich zu lenken und Störreize auszublenden. Die *kognitive Flexibilität* ist die Fähigkeit, den Fokus der Aufmerksamkeit zu wechseln, sich schnell auf neue Situationen einstellen und andere Perspektiven einnehmen zu können. Diese exekutiven Funktionen steuern im Zusammenspiel selbstreguliertes Verhalten. Sie unterstützen uns zudem dabei, Entscheidungen zu treffen, planvoll, aber auch flexibel und zielgerichtet vorzugehen, das eigene Handeln zu reflektieren und es gegebenenfalls zu korrigieren. Nur wer in der Lage ist, spontane Impulse zu unterdrücken und damit eigene Bedürfnisse für eine gewisse Zeit hintanzustellen – man spricht auch vom Belohnungsaufschub – und somit auch herausfordernde oder ermüdende Aufgaben mit Ausdauer meistert, wer sein angestrebtes Ziel nicht aus den Augen bzw. aus dem Arbeitsgedächtnis verliert, wer flexibel reagiert und sich nicht allzu leicht ablenken lässt, kann erfolgreich lernen. Damit tragen die exekutiven Funktionen auch zur Willensbildung und zu diszipliniertem Verhalten bei. Die Fähigkeit zur Selbstregulation ist folglich auch Grundlage für eigenverantwortliches und selbstgesteuertes Lernen und Arbeiten. Sie ist gleichzeitig die Basis für die Entwicklung sozial-emotionaler Kompetenzen von Kindern und Jugendlichen und damit für ein friedliches Zusammenleben in der Gemeinschaft.

Arbeitsgedächtnis

Das Arbeitsgedächtnis ist trotz seiner begrenzten Speicherkapazität – von etwa durchschnittlich fünf bis sieben Elementen wie Worte, Objekte und Ziffern über einen Zeitraum von nur wenigen Sekunden – von großer Bedeutung. Es ermöglicht eine aktive Aufrechterhaltung aufgabenrelevanter Informationen, die für weitere Operationen

1 Inhalte und Abbildungen stammen aus: Kubesch, S. (2013). Förderung exekutiver Funktionen und der Selbstregulation im Sport. PfiFF-Lehrwerk. Heidelberg: VERLAG BILDUNG plus.

benötigt werden, wodurch komplexe kognitive Funktionen wie die Sprache und mathematische Leistungen entstehen können. Das Arbeitsgedächtnis ist z. B. dann besonders gefordert, wenn Schüler sich die Zwischenergebnisse einer Kopfrechenaufgabe merken, längere Sätze verstehen und mehrere Anweisungen befolgen sollen („Schlagt das Buch auf Seite 23 auf und bearbeitet die Aufgaben 4a bis 4c. Anschließend ...“). Ein gut funktionierendes Arbeitsgedächtnis ermöglicht es daher, sich an eigene Handlungspläne und an Instruktionen anderer Personen besser zu erinnern, wodurch auch Handlungsalternativen verstärkt berücksichtigt werden können.



Abbildung 1: Arbeitsgedächtnis

Inhibition

Die Inhibition unterstützt situationsangemessenes Verhalten. Vielfach bedeutet dies, nicht ständig von äußeren Bedingungen, den eigenen Emotionen oder fest verankerten Verhaltensweisen beeinflusst zu sein, sondern zielgerichtet und flexibel zu handeln. Durch die Fähigkeit, Verhalten zu hemmen, gelingt es, diejenigen Aktivitäten oder



Abbildung 2: Inhibition

Handlungen zu vermeiden, die einem angestrebten Ziel oder dem aktuellen Kontext entgegenstehen. Mit einer guten Inhibition fällt es also leichter, sich nicht ablenken zu lassen, den Computer nicht einzuschalten, sondern mit den Hausaufgaben zu beginnen oder einen Konflikt mit Worten und nicht mit Fäusten auszutragen.

Kognitive Flexibilität

Die kognitive Flexibilität ermöglicht es, den Fokus der Aufmerksamkeit zu wechseln und sich schnell auf neue Anforderungen einstellen zu können. Sie beschreibt zudem die Fähigkeit, Personen und Situationen aus neuen Perspektiven zu betrachten und zwischen diesen Perspektiven zu wechseln. Eine gut ausgebildete kognitive Flexibilität hilft, offen für die Argumente anderer zu sein, aus Fehlern zu lernen und sich auf neue Lebenssituationen und Arbeitsanforderungen schneller und besser einstellen zu können.



Abbildung 3: Kognitive Flexibilität

„Muss das so heißen?“

Katja Weidner

Das fragte mich neulich eine Kollegin in der Gesamtlehrerkonferenz und ergänzte: „Immer wenn ich diesen Begriff exekutive sowieso höre, denke ich an Tote“. Andere pflichteten ihr sofort bei. Unterbrechung – Gelächter – Gemurmel. Das kam mir bekannt vor. Das kenne ich doch aus dem Unterricht? Ich war gerade dabei, mein Kollegium über einen möglichen pädagogischen Tag zum Thema Förderung von exekutiven Funktionen im Unterricht zu informieren und darauf einzustimmen. Eine andere Kollegin nahm den verloren geglaubten Faden wieder auf und schmetterte mir entgegen: „Das ist doch nichts Neues, das machen wir doch schon immer.“ Ich atmete einmal tief durch, schob meinen „Frust“ beiseite und erklärte, dass man in der Gehirnforschung exekutive Funktionen als geistige Fähigkeiten bezeichnet, die das menschliche Denken, Fühlen und Handeln steuern. Eben ausführende Funktionen. Nicht zu verwechseln mit einer Exekution!

Ja, in gewisser Weise machen wir das schon immer, doch bin ich erleichtert, endlich das Kind beim Namen nennen zu können. Häufig stellte ich mir die Frage, warum intelligente Schülerinnen und Schüler in meinem Unterricht über „Kleinigkeiten“ stolpern und ihnen so der Weg zum erfolgreichen Lernen verwehrt bleibt. Wochenplaneinführungen werden da zum unüberwindbaren Hindernis. Manche Kinder reagieren äußerst nervös auf mehrteilige Arbeitsanweisungen und steigen gedanklich schon gleich am Anfang aus.

Bei einigen Kindern scheidet es daran, dass sie spontane Impulse kaum unterdrücken können, da ist jeder plötzliche Reiz wichtiger als das Ziel, eine Aufgabe zu Ende zu bringen. Auf eine Frage der Lehrerin sind Antworten wie „Kann ich kleine Pause machen?“ oder „Wann bekommen wir Essenspause?“ an der Tagesordnung. Aber auch Ausrufe wie „Ich will jetzt lieber Nintendo spielen, das ist mir zu anstrengend!“ verwundern mich nicht mehr.

Ein paar Kinder schlendern plötzlich ziellos durchs Klassenzimmer. Sie haben wohl ihr vorher gefasstes Ziel aus den Augen verloren. Wo wollten sie eigentlich hin? Es fällt ihnen schwer, Prioritäten zu setzen. Lehrerinnen bemerken oft, dass diese Kinder in Freiarbeitsphasen besonders häufig auf die Toilette müssen.

Manche Kinder fallen in der großen Pause durch unbeherrschtes Verhalten auf. Da ist die Stopp-Regel auf dem Schulhof schnell vergessen, wenn die Emotionen überkochen. Diese Kinder haben auch oft Umstellungsprobleme im Unterricht, zum Beispiel von Stillarbeit zu Freiarbeit, von bewegter Pause zu konzentrierter Mitarbeit im Un-

terricht. Es fällt ihnen schwer, sich auf neue Arbeitsanweisungen einzustellen, aus Fehlern zu lernen oder sich in andere Menschen hineinzusetzen.

Bei solchen Verhaltensauffälligkeiten oder Lernproblemen geschieht es schnell, dass der Verdacht ADS/ADHS geäußert wird. In meiner Zeit als Lehrerin in München verfolgte ich entsetzt den schlagartigen Anstieg von medikamentös eingestellten – vermeintlichen ADHS – Kindern in den dritten und vierten Klassen. Vielleicht hätte man einigen dieser Kinder schon mit einem gezielten Training exekutiver Funktionen helfen können.

Nun bin ich erleichtert, eine Begründung für diese Phänomene in der Hand zu haben, um auf die Handlungsweisen meiner Schülerinnen und Schüler zielgerichteter reagieren zu können und von vornherein in meine Planung miteinzubeziehen.

Aber mein Kollegium lässt das Thema scheinbar auch nicht los. Vor kurzem spricht mich eine Kollegin im Lehrerzimmer an: „Übrigens habe ich eine Freundin gefragt, was sie wohl unter dem Begriff exekutive Funktionen verstehen würde.“ Ich ahne nichts Gutes, denn die Kollegin fängt schon an zu grinsen. „Meine Freundin meinte, das hätte sicher etwas mit Bestrafung zu tun.“

Von der Forschung ins Klassenzimmer und aufs Spielfeld

Sabine Kubesch und Sonja Hansen

ENTWICKLUNGSGESCHICHTEN EXEKUTIVE FUNKTIONEN

VON DER FORSCHUNG INS KLASSENZIMMER UND AUFS SPIELFELD
SABINE KUBESCH, SONJA HANSEN



DIE BEZEICHNUNG "EXEKUTIVE FUNKTIONEN" WURDE 1973 VON PROF. KARL H. PRIBRAM (1919-2015) EINGEFÜHRT. DER BEDEUTENDE GEHIRNFORSCHER, PSYCHOLOGE UND PHILOSOPH FORSCHTE UND LEHRTE 30 JAHRE AN DER STANDFORD UNIVERSITÄT. PRIBRAM GILT ALS DER „MAGELLAN DES GEISTES“.

EXEKUTIVE FUNKTIONEN WERDEN ALS „UMBRELLA TERM“, ALS SAMMELBEGRIFF FÜR UNTERSCHIEDLICHE FUNKTIONEN UND FÄHIGKEITEN BEZEICHNET.

Exekutive Funktionen
Kernkomponenten der Selbstregulation, Selbstkontrolle und Willensstärke.

INZWISCHEN GEHT MAN VON ÜBER 30 DEFINITIONEN UND KONZEPTEN AUS, DIE EXEKUTIVE FUNKTIONEN BESCHREIBEN UND ERKLÄREN.

Arbeitsgedächtnis
Informationen kurzzeitig speichern, aktualisieren und weiterverarbeiten.

Initiieren
Eine Tätigkeit selbstständig einleiten.

Inhibition
Spontane Impulse und Emotionen unterdrücken.
Aufmerksamkeit willentlich lenken (fokussieren).
Irrelevante Reize ausblenden.

Kognitive Flexibilität
Fokus der Aufmerksamkeit gezielt wechseln.
Sich auf neue Situationen schnell einstellen.
Andere Perspektiven einnehmen.

Komplexe Fähigkeiten
Monitoring (Überwachen)
Ordnen/Organisieren/
Strukturieren
Planen
Problemlösen
Entscheiden

ERSTE WICHTIGE ERKENNTNISSE ZU DEN EXEKUTIVEN FUNKTIONEN STAMMEN AUS KLINISCHEN BEOBACHTUNGEN AM MENSCHEN MIT UNFALLVERURSACHTEN GEHIRNSCHÄDIGUNGEN UND AUS TIERSTUDIEN, BEI DENEN MAN LÄSIONEN EXPERIMENTELL ERZEUGT HAT.

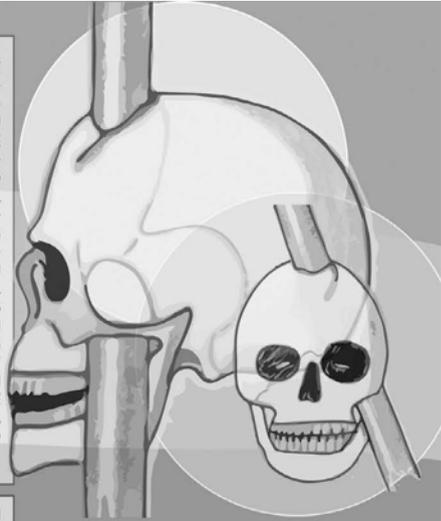


1046 ERLITT DER 25-JÄHRIGE PHINEAS P. GAGE BEI EISENBANARBEITEN IN CAVENDISH (VERMONT, USA) EINEN SCHWEREN UNFALL. BEI EINER SELBST GELEGTEN SPRENGUNG SCHOSS IHM EINE EISENSTANGE DURCH DEN KOPF. SIE DURCHBOHRTE DEN SCHÄDEL UND DURCHDRANG DEN FRONTO-ORBITALEN UND PRÄFRONTALEN KORTEX IN DER LINKEN HEMISPHERE.



© VERLAG BILDUNG plus

TROTZ DIESER SCHWEREN VERLETZUNG ÜBERLEBTE GAGE. ER WAR NACH DEM UNFALL BEI BEWUSSTSEIN, KONNTE FRAGEN BEANTWORTEN, DEN UNFALLHERGANG BESCHREIBEN UND WAR IN DER LAGE ZU GEHEN. DENNOCH HATTE DER UNFALL WEITREICHENDE FOLGEN. ER FÜHRTE ZU STARKEN PERSÖNLICHKEITSVERÄNDERUNGEN. DER EINST FREUNDLICHE UND BELIEBTE JUNGE MANN, WURDE NACH DEM UNFALL ALS IMPULSIV, LAUNISCH, RESPEKTLOS, UNGEDULDIG, EIGENSINNIC, KINDISCH UND UNZUVERLÄSSIG BESCHRIEBEN. GAGES FALL MACHTE IN DER MEDIZINISCHEN FORSCHUNG DEN ZUSAMMENHANG ZWISCHEN PERSÖNLICHKEIT UND FRONTALLAPPEN DEUTLICH. GLEICHZEITIG VERLOR GAGE, NACH AUSSAGEN SEINES ARZTES DURCH DEN UNFALL SEINEN GESCHÄFTSSINN UND DIE ENERGIE UND AUSDAUER FÜR DIE UMSETZUNG ALL SEINER PLÄNE. DIESE BESCHREIBUNG SPIEGELT GAGES BEEINTRÄCHTIGTE EZEKUTIVE FUNKTIONEN UND FÄHIGKEITEN WIDER. GAGES SCHÄDEL UND DIE EISENSTANGE, DIE SEINEN SCHÄDEL DURCHBOHRTE, SIND IM WARREN ANATOMICAL MUSEUM DER HARVARD UNIVERSITY ZU SEHEN.



RUND 100 JAHRE SPÄTER KONNTE C. F. JACOBSEN AN PRIMATEN ZEIGEN, DASS SCHÄDIGUNGEN IM PRÄFRONTALEN KORTEX VON AFFEN DEREN FÄHIGKEIT BEEINTRÄCHTIGT, INFORMATIONEN ÜBER EINEN KURZEN ZEITRAUM ABZUSPEICHERN.



JACOBSEN SETZTE DAZU 1935/36 VERZÖGERTE VERGLEICHAUFGABEN (DELAYED RESPONSE TASK) EIN, BEI DENEN TIEREN ZUNÄCHST EINE FUTTERSTELLE GEZEIGT WURDE. DER BLICK AUF DIE FUTTERSTELLE WURDE ANSCHLIESSEND FÜR EIN BESTIMMTES INTERVALL (DELAY: VON CA. 10 BIS 100 SEKUNDEN) VERHINDERT. ANSCHLIESSEND ERFOLGTE DIE AUFGABENANTWORT (RESPONSE). DER AFFE ERHIELT DAS FUTTER ALS BELOHNUNG, WENN ER SICH AN DIE FUTTERSTELLE ERINNERN KONNTE. AUF DIESE WEISE BEGANN DIE ERFORSCHUNG DES ARBEITSGEDÄCHTNISSES. SOLCHE VERZÖGERTEN VERGLEICHAUFGABEN WERDEN AUCH NOCH HEUTE STANDARDMÄSSIG ZUR UNTERSUCHUNG DES ARBEITSGEDÄCHTNISSES EINGESETZT.



SEIT DEM AUSGEHENDEN 20. JAHRHUNDERT WERDEN EZEKUTIVE FUNKTIONEN MIT MODERNEN BILDGEBENDEN VERFAHREN, WIE DEM EEG UND DER FMRT, AUCH AN GESUNDEN PERSONEN UNTERSUCHT. DABEI WERDEN GEHIRNAKTIVITÄTEN UND GEHIRNSTRUKTUREN SICHTBAR, DIE BEI DER BEARBEITUNG NEUROPSYCHOLOGISCHER AUFGABEN ZUR UNTERSUCHUNG EZEKUTIVER FUNKTIONEN AKTIV SIND.

ELEKTROENZEPHALOGRAFIE (EEG)



DAS ELEKTROENZEPHALOGRAMM MISST DIE ELEKTRISCHE AKTIVITÄT FEUERNDER NEURONEN AN DER SCHÄDELOBERFLÄCHE BZW. AN DER KOPFHAUT.

FUNKTIONELLE MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (FMRT)
 SAUERSTOFFREICHES BLUT WIRD ZU AKTIVEN NEURONEN TRANSPORTIERT, DADURCH HABEN SIE ANDERE MAGNETISCHE EIGENSCHAFTEN ALS NICHT AKTIVE NEURONE. DIESE UNTERSCHIEDE IN DER GEHIRNAKTIVITÄT MACHT DAS FMRT SICHTBAR.

Study: 59390
Series: 003
Image: 45

E2: inverse
Date:

Software: 28.0.00
TE: 0.00

Window: 500
Level: 500

Jahr	Anzahl Publikationen
1966	1
1990	1
1995	53
2000	177
2005	406
2009	847
2011	1384
2014	2322

MIT DEM EINSATZ BILDGEBENDER VERFAHRENDER BEI DER UNTERSUCHUNG EXEKUTIVER FUNKTIONEN STIEGEN AUCH DIE WISSENSCHAFTLICHEN FACHPUBLIKATIONEN ZU DEN EXEKUTIVEN FUNKTIONEN RASANT AN.

ABER SELBST MIT GANZ EINFACHEN SPIELERISCHEN METHODEN LASSEN SICH EXEKUTIVE FUNKTIONEN UND DIE DARAUF AUFBAUENDE SELBSTREGULATIONSFÄHIGKEIT UNTERSUCHEN:

HEAD TO TOES TASK

MARSHMALLOW TEST

GLAS FISCH GOLD

ZAHLEN-, BUCHSTABEN-, OBJEKTSÄNNEN AUFGABEN VORWÄRTS/RÜCKWÄRTS

HATTEN SICH ANFÄNGLICH NUR ÄRZTE UND PSYCHOLOGEN MIT DEN EXEKUTIVEN FUNKTIONEN BEFASST, ...

... INTERESSIEREN SICH HEUTE UNTERSCHIEDLICHSTE PERSONEN- UND BERUFSGRUPPEN FÜR DIESE WICHTIGEN GEHIRNFUNKTIONEN UND FÄHIGKEITEN, DA SIE EINEN STARKEN UND VIELFÄLTIGEN EINFLUSS AUF DAS TÄGLICHE LEBEN UND DEN LERNERFOLG HABEN; DAZU ZÄHLEN TRAINER, SPORT- UND MUSIKWISSENSCHAFTLER, ÖKONOMEN, SOZIOLOGEN, SPIELENTWICKLER, ELTERN, SENIORN, PÄDAGOGEN, SCHÜLER, SCHULBUCHVERLAGE...

© VERLAG BILDUNG plus

Das Wissensposter wurde entwickelt für: Kubesch, S. (2016). Sport im Fokus. *Exekutive Funktionen trainieren. Mentale Stärke ausbilden. Leistung optimieren* (im Druck). Heidelberg: VERLAG BILDUNG plus.

Teil 1

Wissenschaftliche Grundlagen zur Bedeutung und Förderung exekutiver Funktionen und der Selbstregulation

Biologische und soziale Einflüsse auf kognitive Kontrollprozesse, die vom präfrontalen Kortex abhängen²

Adele Diamond

Einleitung

Exekutive Funktionen (EF, auch als kognitive Kontrollfunktionen bezeichnet) sind die Voraussetzung für logisches Denken und die Fähigkeit zum Problemlösen und wären, wenn sie „automatisiert ablaufen“ würden, unzureichend oder noch mangelhaft. Sie hängen von einem neuronalen Schaltkreis ab, bei dem der präfrontale Kortex (PFC) eine wichtige Rolle spielt, und werden durch Schädigungen oder Dysfunktionen des PFC beeinträchtigt. Sie sind von entscheidender Bedeutung für psychische Gesundheit, schulische Leistungen und Erfolg im Leben. Die drei zentralen exekutiven Funktionen, auf denen komplexere (wie logisches Denken) aufbauen, sind (1) *inhibitorische Kontrolle* (einem starken Drang, etwas Bestimmtes zu tun, widerstehen und stattdessen etwas besonders Notwendiges oder Angemessenes tun, z.B. seine Aufmerksamkeit auf etwas fokussieren, diszipliniert eine Aufgabe zu Ende bringen, Selbstkontrolle ausüben und nichts sozial Unverträgliches sagen oder tun); (2) *Arbeitsgedächtnis* (Informationen im Gedächtnis behalten und mit ihnen arbeiten: Ideen gedanklich verändern; Verbindung herstellen zwischen dem, was man gerade erfährt, hört oder liest, und dem, was man früher erfahren, gehört oder gelesen hat, und eine Wirkung mit der vorausgegangenen Ursache in Zusammenhang bringen); und (3) *kognitive Flexibilität* (imstande sein, die Perspektive zu wechseln oder den Aufmerksamkeitsfokus zu verlagern; eingefahrene Denkbahnen verlassen, um neue Wege der Problemlösung zu finden) (Diamond, 2006; Huizinga et al., 2006; Lehto et al., 2003; Miyake et al., 2000).

Sowohl Biologie (Gene und Neurochemie) als auch Umwelt (z.B. Schulprogramme) modulieren die Funktionsweise des präfrontalen Kortex und beeinflussen somit exekutive Funktionen. Das Dopaminsystem im PFC mit seinen besonderen Eigenschaften ist verantwortlich dafür, dass der präfrontale Kortex anfällig ist für Umwelt-

2 Übersetzung des Artikels von Diamond, A. (2011). Biological and social influences on cognitive control processes dependent on prefrontal cortex. *Progress in Brain Research*, 189, 319–339. Mit freundlicher Genehmigung von Elsevier. Übersetzung von Astrid Hildenbrand.

einflüsse und genetische Variationen, die sich andernorts kaum auswirken, und einige dieser Variationen scheinen Männer und Frauen unterschiedlich zu beeinflussen. Inwieweit dies bei Störungen wie ADHS und PKU (Phenylketonurie, angeborene Stoffwechselstörung) relevant ist, wird in den folgenden Abschnitten diskutiert; und es geht um die Frage, wie Genotyp und Geschlecht Einfluss nehmen können, welche Umwelt besonders förderlich ist.

Durch die Erkenntnisse aus der Gehirnforschung werden manche bildungsbezogene Überlegungen auf den Kopf gestellt. „Gehirnbasiert“ bedeutet nicht unveränderbar oder unveränderlich. Exekutive Funktionen hängen vom Gehirn ab, können aber durch geeignete Aktivitäten verbessert werden. Der präfrontale Kortex ist erst im frühen Erwachsenenalter voll ausgereift (Gogtay et al., 2004), doch exekutive Funktionen können schon im ersten Lebensjahr und sicherlich bis zum Alter von vier bis fünf Jahren verbessert werden. Neuroplastizität ist nicht nur ein Merkmal des unreifen Gehirns. Der präfrontale Kortex bleibt selbst bis ins hohe Alter plastisch, und exekutive Funktionen können in jedem Alter verbessert werden. Im Vergleich zu früheren Generationen hinken heutzutage viele Kinder – unabhängig von ihrer Herkunft – wichtigen EF-Fertigkeiten hinterher (Smirnova, 1998; Smirnova & Gudareva, 2004), doch diese Fertigkeiten können ohne Hinzuziehung von Experten und ohne großen Aufwand verbessert werden. Untersuchungen zeigen, dass oft aus Lehrplänen verdrängte Aktivitäten (wie Spielen, Sportunterricht und musische Aktivitäten) eher dazu beitragen, exekutive Funktionen zu verbessern und Schulleistungen zu steigern, als den Schulerfolg zu behindern. Solche Strategien können auch Probleme abwenden helfen, bevor Beeinträchtigungen exekutiver Funktionen, z.B. ADHS, diagnostiziert werden, und dramatische Auswirkungen auf den weiteren Lebensverlauf von Kindern haben. Durch die frühe Verbesserung zentraler EF-Fertigkeiten werden Kinder auf einen erfolgreichen Weg gebracht. Wenn dagegen Kinder bei Schuleintritt diese Fertigkeiten noch nicht entwickelt haben, kann ihre Laufbahn dadurch eine negative Richtung einschlagen, die zu ändern extrem schwierig und teuer sein kann.

Besondere Eigenschaften des Dopaminsystems im PFC

Das Dopaminsystem im PFC ist untypisch. Verglichen mit den Dopaminsystemen in den meisten anderen Hirnregionen zeichnet sich der präfrontale Kortex durch einen relativen Mangel an dem Dopamintransporter (DAT-Protein) aus. Während also Variationen im DAT1-Gen, das das DAT-Protein kodiert, sich in anderen Hirnregionen maßgeblich auswirken, haben solche Polymorphismen wenige oder keine direkten Auswirkungen auf den präfrontalen Kortex.

Das bedeutet auch, dass der präfrontale Kortex im Unterschied zu anderen Hirnregionen, die einen großen DAT-Vorrat haben, von anderen Mechanismen als dem Dopamintransporter abhängt, um ausgeschüttetes Dopamin zu entfernen. DAT bie-

tet die beste Art der Entfernung von freigesetztem Dopamin; jene an DAT reichen Hirnregionen haben wenig Bedarf an Sekundärmechanismen der Dopaminentfernung. Weil der präfrontale Kortex arm an DAT und sein eigenes DAT-Protein nicht ideal lokalisiert ist (etwas entfernt von der Synapse [synaptic sites]), hängt er zur Dopaminentfernung ungewöhnlich stark von dem Enzym Catechol-O-Methyltransferase (COMT) ab. Von daher haben Variationen im COMT-Gen, das das COMT-Enzym kodiert, wichtige direkte Auswirkungen auf den präfrontalen Kortex, nicht aber auf die meisten anderen Hirnregionen. Da Östrogen die COMT-Transkription herunterreguliert, gibt es geschlechtsbezogene (und von der Menstruationsphase abhängige) Unterschiede in den Auswirkungen der Variationen im COMT-Gen.

Das Dopaminsystem im PFC ist auch in der Hinsicht untypisch, als die an den präfrontalen Kortex vermittelnden Dopaminneuronen eine höhere Ausgangsfrequenz und einen höheren Dopaminumsatz haben. Dadurch wird das Dopaminsystem im PFC besonders sensibel für kleine Veränderungen bei der Verfügbarkeit des Vorboten Tyrosin (Tyr). Andere Hirnregionen, wie etwa das Striatum, sind von kleinen Veränderungen bei der Verfügbarkeit von Tyrosin nicht betroffen.

Der relative DAT-Mangel im PFC und Erklärungen für verschiedene Subtypen der Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS)

Diagnostische Richtlinien beschreiben derzeit drei Subtypen von ADHS: den vorwiegend unaufmerksamen Typ, den vorwiegend hyperaktiv-impulsiven Typ und den Mischtyp (DSM-IV; American Psychiatric Association, 1994). Die meisten Studien haben den Mischtyp im Blick. Es gibt starke Hinweise darauf, dass die Primärstörung im Striatum lokalisiert und mit einem striatofrontalen Regelkreis verbunden ist, wenn ADHS mit Hyperaktivität (Mischtyp und vorwiegend hyperaktive Typen) einhergeht (Casey et al., 1997; Filipek et al., 1997; Hynd et al., 1993; Schrimsher et al., 2002; Soliva et al., 2010; Teicher et al., 1996; Vaidya et al., 1998). Da DAT wichtig ist für die Dopaminentfernung aus dem Striatum, sollten Polymorphismen des DAT1-Gens wichtige Folgen für diese Subtypen von ADHS haben. Das ist tatsächlich der Fall (Barr et al., 2001; Bedard et al., 2010; Cook, 2000; Cook et al., 1995; Daly et al., 1999; Gill et al., 1997; Schrimsher et al., 2002; Shook et al., 2011; Swanson et al., 2000; Waldman et al., 1998; Yang et al., 2007).

Die primäre Ursache der kognitiven Defizite bei ADHS (z.B. Unaufmerksamkeit und schlechtes Arbeitsgedächtnis) liegt im PFC begründet, nicht im Striatum. Im präfrontalen Kortex ist DAT nur spärlich vorhanden und spielt dort eine unbedeutende Rolle (Durstun et al., 2005; Lewis et al., 2001; Sesack et al., 1998). Von daher sollten Polymorphismen im DAT1-Gen die kognitiven Probleme, unter denen Menschen mit ADHS leiden können, und den vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ

kaum beeinflussen. Das trifft tatsächlich zu. Beispielsweise korreliert das Ausmaß der Symptome von Hyperaktivität-Impulsivität mit der Anzahl hochriskanter DAT1-Allele, das Ausmaß der Symptome von Unaufmerksamkeit aber nicht (Waldman et al., 1998), und die DAT-Bindung weist einen Zusammenhang mit motorischer Hyperaktivität, aber nicht mit Symptomen der Unaufmerksamkeit auf (Jucaite et al., 2005).

Eine Funktion von Polymorphismen des DAT1-Gens in den hyperaktivitätsbetonten Formen von ADHS deckt sich bei der Behandlung dieses ADHS-Typs mit der Wirksamkeit von Methylphenidat, da dieses die DAT-Funktion direkt beeinflusst (Dresel et al., 2000; Seeman & Madras, 1998; Shenker, 1992; Volkow et al., 2002, 2005, 2007). DAT entfernt freigesetztes Dopamin dadurch, dass es freigesetztes Dopamin in präsynaptische Neuronen wieder aufnimmt. Methylphenidat bindet sich an das DAT-Protein und hindert es daran, Dopamin aufnehmen zu können (siehe **Abb. 1**). Die meisten Kinder mit ADHS des Mischtyps oder des hyperaktiven Typs (90%) reagieren positiv auf Methylphenidat; über 67% positiv auf Methylphenidat bei moderater bis hoher Dosierung (Barkley, 2001; Barkley et al., 1991; Milich et al., 2001; Weiss et al., 2003). Dies entspricht Methylphenidat, das DAT direkt beeinflusst, wobei DAT besonders wichtig ist im Striatum, dem Ort der Primärstörung bei hyperaktivitätsbetonten ADHS-Formen.

Doch einer signifikanten Zahl von Kindern mit dem vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ kann mit Methylphenidat nicht oder nur bei niedriger Dosierung geholfen werden (Barkley, 2001; Barkley et al., 1991; Milich et al., 2001; Weiss et al., 2003). Dies entspricht den anderen Wirkmechanismen von Methylphenidat bei niedriger Dosierung. Gering dosiert verstärkt Methylphenidat vorzugsweise die dopaminerge Neurotransmission im PFC (Berridge et al., 2006).

Bei Menschen kommt der Dopaminrezeptor Typ 4 (DRD4) im PFC vor, aber nicht im Striatum (Meador-Woodruff et al. 1996). Folglich sollten Polymorphismen im

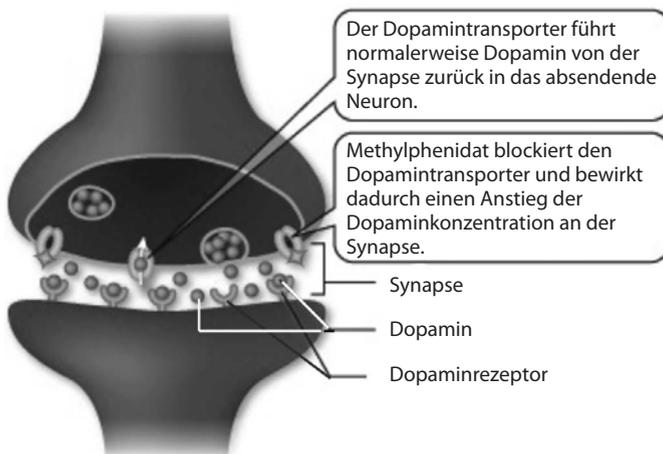


Abbildung 1:
Wirkmechanismus von
Methylphenidat.

DRD4-Gen die präfrontale Funktion beeinflussen und in Zusammenhang stehen mit dem vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ, die striatale Funktionen aber nicht direkt beeinflussen. Befunde stützen diese Annahme. Man hat festgestellt, dass Einzel-Nukleotid-Polymorphismen (SNP) in der Promoterregion von DRD4 bei ADHS stark und primär mit Unaufmerksamkeits-symptomen verbunden sind (Lasky-Su et al., 2008). Der unaufmerksame ADHS-Typ scheint der am stärksten mit dem DRD4 7-Repeat-Allel korrelierende Subtyp zu sein (Rowe et al., 1998), und bei Kindern mit einem 7-Repeat-Allel von DRD4 hat man Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnis-defizite festgestellt (Auerbach et al., 2001). Zudem ist eine Relation zwischen dem Vorkommen der 7-Repeat-Allel-Variation von DRD4 und Hyperaktivität bzw. Impulsivität nicht nachgewiesen, also Defizite, die eine striatale Abnormität darstellen (Bellgrove et al., 2005; Johnson et al., 2008; Kramer et al., 2009).

Kinder mit dem vorwiegend hyperaktiven ADHS-Typ neigen zu Hektik. Kinder mit dem vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ neigen dagegen oft zum Gegenteil; sie können wenig aktiv, träge und langsam in ihren Reaktionen sein (Carlson & Mann, 2002, Carlson et al., 1986; Milich et al., 2001). Kinder mit dem vorwiegend hyperaktiven ADHS-Typ neigen zu mangelnder Inhibition. Kinder mit dem vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ können übermäßig gehemmt sein.

Beide Gruppen haben soziale Probleme, diese jedoch aus unterschiedlichen Gründen. Kinder mit dem vorwiegend hyperaktiv-impulsiven ADHS-Typ können andere Menschen verprellen, weil sie z. B. nicht warten können, bis sie an der Reihe sind, und agieren, ohne die Gefühle anderer zu berücksichtigen. Kinder mit ADHS ohne Hyperaktivitätssymptome haben eher deshalb soziale Probleme, weil sie zu passiv oder zu schüchtern sind. Solche Kinder sind weniger leicht von etwas abzulenken, dafür umso schneller gelangweilt. Ihr Problem hat eher mit Motivation (Untererregung) zu tun als mit inhibitorischer Kontrolle. Statt dass sie Ablenkung aus dem Gleis bringt, suchen sie Ablenkung, weil ihr Interesse an der begonnenen Aktivität schon wieder nachgelassen hat. Wenn sie die Lust an ihrem aktuellen Projekt verloren haben, wandert ihre Aufmerksamkeit auf der Suche nach interessanten Dingen umher. Herausforderungen oder Risiken, also etwas, das buchstäblich ihre Adrenalinpumpe anwirft, können darüber entscheiden, ob Kinder mit solchen Problemen ihre Aufmerksamkeit fokussieren und optimale Leistungen erbringen können.

Es ist kein Zufall, dass Methylphenidat in niedriger (und für solche Kinder wirksamster) Dosierung nicht nur die Wiederaufnahme von Dopamin hemmt (wie das bei hoher Dosierung der Fall ist), sondern vorzugsweise auch die Freisetzung von Dopamin und Noradrenalin stimuliert (Ishimatsu et al., 2002). Kindern mit ADHS gibt man in Tests oft viel Zeit, um ihnen zu helfen, aber Kinder mit dem vorwiegend unaufmerksamen ADHS-Typ sind oft leistungsfähiger, wenn sie mit Aufgaben in schneller Abfolge gefordert werden.

Im Jahr 2005 haben meine Kolleginnen und ich nachgewiesen, dass hyperaktivitätsbetonte ADHS und ausschließlich unaufmerksamkeitsbetonte ADHS zwei grundverschiedene Störungen sind und unterschiedliche genetische und neuronale Grundlagen, kognitive Profile, Reaktionen auf Medikamente und Komorbiditätsmuster aufweisen (Diamond, 2005). Dies erzeugte bei Klinikern und Patienten ein großes Echo. Schlagartig stieg die Zahl der Webseiten, die sich mit unaufmerksamkeitsbetonter ADHS (Aufmerksamkeitsdefizitstörung, ADS) befassen, von vier auf mehrere tausend. Karin Windt, Gründerin und Vorsitzende der Dutch ADD Association (Stichting ADD Nederland), schrieb in dem Zusammenhang: „Viele Menschen mit Aufmerksamkeitsdefiziten sind sehr begabt, haben oft einen hohen IQ und sind innovativ und kreativ. Doch werden sie als Tagträumer wahrgenommen, die sich nicht gut konzentrieren können. Früher wurden sie als dumm oder faul bezeichnet ... Aufgrund der Studie [von Diamond] können wir nun anderen erklären, weshalb ADS etwas ganz anderes ist als ADHS. Diese Frage war bis zum Erscheinen ihres Artikels im Jahr 2005 unbeantwortet geblieben.“ Das DSM-V ist zwar noch nicht erschienen, aber in der nächsten Ausgabe des diagnostischen Manuals werden ADS und die hyperaktivitätsbetonten ADHS-Formen getrennten Kategorien zugeordnet, d. h. als grundverschiedene Störungen gelistet.

Höherer Dopaminsatz im PFC und Erklärungen, weshalb eine ungenügend strenge Diät bei Phenylketonurie (PKU) zu Defiziten führt, die nur PFC-abhängige kognitive Fähigkeiten (die „exekutiven Funktionen“) betreffen

PKU ist eine angeborene (d. h. genetische) Stoffwechselstörung, die durch eine Punktmutation bzw. durch Chromosomendeletionen des Phenylalanin-Hydroxylase-Gens verursacht wird, das das Enzym Phenylalaninhydroxylase kodiert (DiLella et al., 1986; Lidsky et al., 1985; Woo et al., 1983). Phenylalaninhydroxylase ist essentiell dafür, dass die Aminosäure Phenylalanin (Phe) zu Aminosäure Tyrosin (Tyr) hydroxyliert. Bei Menschen mit PKU ist die Aktivität der Phenylalanin-Hydroxylase entweder nicht vorhanden oder signifikant reduziert.

Da wenig Phe metabolisiert wird, wenn dies überhaupt stattfindet, steigt der Phe-Blutspiegel sprunghaft an. Wenn dieser drastische Anstieg des Phe-Blutspiegels nicht frühzeitig korrigiert wird, sind großflächige Hirnschädigungen und eine schwere mentale Retardierung die Folgen (Cowie, 1971; Hsia, 1967; Koch et al., 1982; Krause et al., 1985; Tourian & Sidbury, 1978). Ideal wäre es, wenn die Phe-Aufnahme fast auf Schwellenniveau gesenkt werden könnte, aber die Phe-Aufnahme kann nur durch die Reduktion der Proteinaufnahme gesenkt werden, sodass eine diätetische Behandlung der PKU zwangsläufig ein Kompromiss zwischen der notwendigen Minimierung der Phe-Aufnahme und dem Proteinbedarf sein muss. Deshalb führt die Phe-arme Diät

selten zu einem vollständig normalen Phe-Blutspiegel; der Phe-Spiegel wird zwar gesenkt, bleibt aber moderat erhöht. Außerdem wird der Tyr-Blutspiegel moderat gesenkt, da wenig oder überhaupt kein Tyr aus Phe produziert wird, und oral eingenommene Tyr-Ergänzungen erhöhen den Tyr-Blutspiegel nur leicht. Letzten Endes führt diese diätetische Behandlung der PKU zu einem leichten Ungleichgewicht im Phe/Tyr-Verhältnis im Blut (ohne Diät wäre das Phe/Tyr-Verhältnis stark erhöht).

Wenn PKU frühzeitig und konsequent durch eine Phe-arme Diät behandelt wird, werden schwere Hirnschädigungen und schlimme mentale Retardierung abgewendet (Bickel et al., 1971; Holtzman et al., 1986). Doch so behandelte Kleinkinder zeigen immer noch Defizite, wenn ihr Phe-Blutspiegel nur auf 6 bis 10mg/dl (360–600 $\mu\text{mol/l}$) gesenkt wird – grob drei- bis fünfmal so viel wie der Normalwert –, was bis in die späten 1960er-Jahre weltweit als sicherer Wert gesehen wurde. Solche Defizite sind typisch für die Funktionsweise des PFC und die PFC-abhängigen kognitiven Fähigkeiten und darauf auch begrenzt (DeRoche & Welsh, 2008; Diamond, 2001; Diamond et al., 1994, 1997; Smith et al., 2000; Welsh et al., 1990). Die Ursache ist folgende:

Phe und Tyr wetteifern um denselben begrenzten Vorrat an Transporterproteinen, um die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden. Diese Proteinträger haben tatsächlich eine höhere Affinität für Phe als für Tyr (Miller et al., 1985; Oldendorf, 1973; Pardridge, 1977; Pardridge & Oldendorf, 1977). Ein im Verhältnis zu Tyr erhöhter Phe-Blutspiegel führt folglich dazu, dass weniger Tyr das Gehirn erreicht. Weil bei diätetisch behandelten Kindern mit PKU das Phe/Tyr-Verhältnis im Blut nur mäßig erhöht ist, ist das Absinken des Tyr-Spiegels im Gehirn nur mäßig. Im Unterschied zu Dopaminsystemen in den meisten Hirnregionen, die bei mäßigem Absinken des verfügbaren Tyr robust sind, wird das Dopaminsystem im PFC tiefgreifend beeinträchtigt (Tyr ist der Vorbote von Dopamin). Eine höhere Feuerungsrate und ein höherer Umsatz an Dopaminneuronen, die an den präfrontalen Kortex vermitteln, führen dazu, dass der PFC sogar auf ein mäßiges Absinken des verfügbaren Tyr äußerst sensibel reagiert. Tyr-Reduktionen, die zu klein sind, um Dopaminsysteme in anderen Hirnregionen, wie etwa im Striatum, zu beeinflussen, lassen den Dopaminspiegel im PFC stark absinken (Bannon et al., 1981; Bradberry et al., 1989; Tam et al., 1990; Thierry et al., 1977).

So zeigen früh und konsequent behandelte Säuglinge und Kleinkinder mit PKU Defizite in den PFC-abhängigen kognitiven Fähigkeiten, wenn ihr Phe-Spiegel nicht auf 2–6 mg/dl (120–360 $\mu\text{mol/l}$; siehe Abb. 2) gehalten wird. Je höher ihr Phe-Spiegel, desto schlechter ist ihre Leistung bei Aufgaben, die vom PFC abhängige exekutive Funktionen erfordern (Diamond et al., 1997). Solange bei Kleinkindern der Phe-Spiegel 10 mg/dl nicht übersteigt, finden sich die Defizite scheinbar ausschließlich bei PFC-abhängigen Fähigkeiten. Wie viel Tyr das Gehirn erreicht, hängt nicht nur vom Phe-Blutspiegel, sondern auch vom Tyr-Spiegel ab. Demnach sind bei Kindern mit PKU defizitäre exekutive Funktionen noch viel enger mit dem Phe/Tyr-Verhältnis im

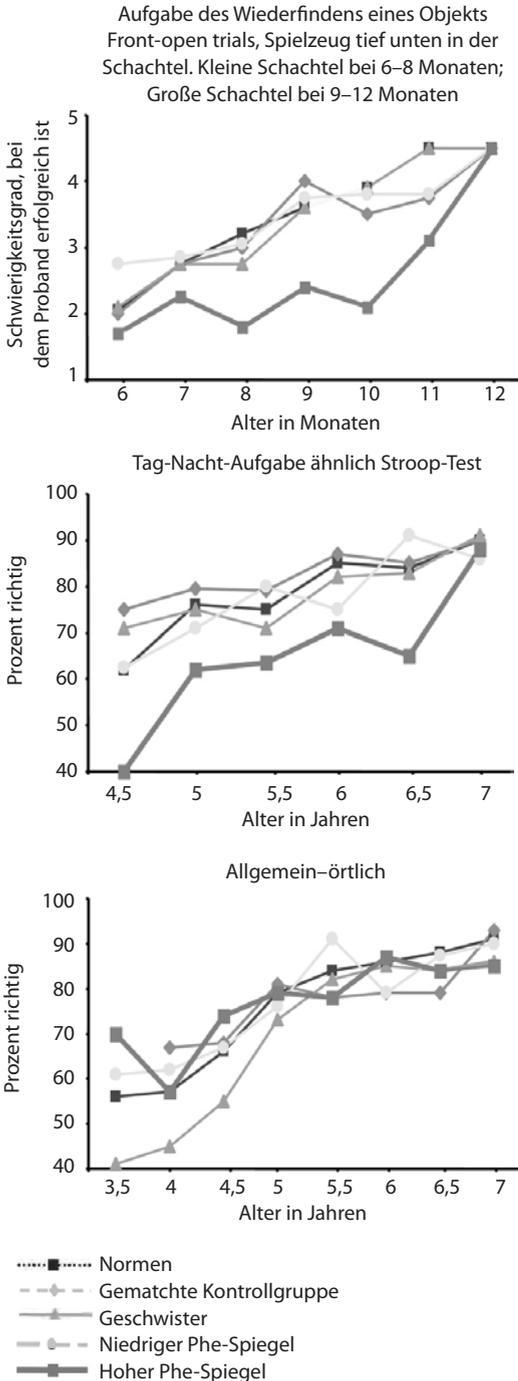


Abbildung 2: Vergleich der Leistung der Kinder mit PKU, deren Phe-Blutspiegel bei 6–10 mg/dl (360–600 µmol/l; als „Gruppe mit hohem Phe-Wert“ bezeichnet) lag, mit der Leistung von vier Vergleichsgruppen bei Aufgaben, mit denen exekutive Funktionen beurteilt werden (oberes und mittleres Panel), und bei einer Aufgabe, mit der keine exekutiven Funktionen beurteilt werden (unteres Panel). In jeder untersuchten Altersgruppe (das obere Panel zeigt eine der Altersgruppen, und das mittlere Panel zeigt eine andere) und bei allen Manifestationen exekutiver Funktionen, bei denen Arbeitsgedächtnis und inhibitorische Kontrolle notwendig waren, zeigten die Kinder mit PKU und einem relativ hohen Phe-Spiegel (der zu dem Zeitpunkt durchaus im klinisch akzeptablen Bereich lag) signifikant schlechtere Leistungen als alle anderen Vergleichsgruppen: andere Kinder mit PKU und einem niedrigeren Phe-Spiegel (Phe-Spiegel 2–6 mg/dl, 120–360 µmol/l; als „Gruppe mit niedrigem Phe-Wert“ bezeichnet); die eigenen Geschwister, gematchte Kontrollgruppe oder Kinder aus der Allgemeinpopulation. Bei keiner der zehn Kontrollmessungen (eine ist im unteren Panel dargestellt), bei denen die Funktionen der Parietalrinde bzw. des medialen Schläfenlappens erforderlich waren, zeigten sie Beeinträchtigungen (modifiziert mit Erlaubnis von Diamond et al., 1997).

Blut verbunden als nur mit dem Phe-Blutspiegel oder aber dem Tyr-Blutspiegel (Luciana et al., 2001).

Die gute Nachricht ist, dass Defizite bei exekutiven Funktionen verhindert und rückgängig gemacht werden können. Wenn der Phe-Blutspiegel durchschnittlich zwischen 2 und 6 mg/dl gehalten wird, scheint die kognitive Funktion völlig normal zu sein. Bei Kleinkindern mit PKU können Defizite bei exekutiven Funktionen vollständig verhindert werden, wenn der Phe-Spiegel zwischen 2 und 6 mg/dl (120–360 $\mu\text{mol/l}$; Diamond et al., 1997; Stemerink et al., 1995) gehalten wird, und bei älteren Kindern und Erwachsenen mit PKU können solche Defizite durch eine strikte Diät, die den Phe-Spiegel senkt, rückgängig gemacht werden (Schmidt et al., 1994). Ferner gibt es in der Kinetik der Blut-Hirn-Schranke individuelle Unterschiede in der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für verschiedene Aminosäuren. Manche Menschen haben einen unüblichen Schutzmechanismus, der darüber wacht, wie viel Phe das Gehirn erreicht, und weisen deshalb auch bei einem sehr hohen Phe/Tyr-Verhältnis wenige oder überhaupt keine Defizite auf (Koch et al., 2000; Moller et al., 1998, 2000; Weglage et al., 2001).

In den 1970er- und 1980er-Jahren wurde berichtet, dass Kinder mit PKU trotz Behandlung kognitive Defizite zeigten und dass diese Defizite anscheinend auf PFC-abhängige kognitive Fertigkeiten begrenzt waren. Diese Berichte blieben jedoch unbeachtet, weil man sich keinen Mechanismus vorstellen konnte, der sich so selektiv auswirken würde. Glücklicherweise erbrachte – in Unkenntnis jener, die über angeborene Stoffwechselstörungen forschten – in den 1970er- und 1980er-Jahren eine Entdeckung der Neuropharmakologie den Nachweis dieses Mechanismus: die besondere Sensibilität präfrontal vermittelnder Dopaminneuronen auf geringe Absenkungen des Tyr-Spiegels. Neurochemische und verhaltensbezogene Untersuchungen an einem Tiermodell (Diamond et al., 1994) und umfangreiche neurokognitive Testreihen bei Kindern (DeRoche & Welsh, 2008; Diamond et al., 1997) bestätigten, dass dieser Mechanismus tatsächlich für kognitive Defizite im PFC bei behandelten Personen mit PKU verantwortlich war. Schließlich wurden im Jahr 2000 die Richtlinien für die Behandlung von Kleinkindern mit PKU weltweit geändert und eine strikte Einhaltung der Diät gefordert, die den Phe-Blutspiegel durchschnittlich auf einem Niveau von 2–6 mg/dl hält, was dazu geführt hat, dass Tausende von Kindern mit PKU ein produktiveres Leben führen können.

Der relative DAT-Mangel im PFC und entsprechende Abhängigkeit vom COMT-Enzym

Bei einer weniger extensiven Dopamin-Wiederaufnahme durch DAT hängt der präfrontale Kortex stärker von Sekundärmechanismen ab, um die Wirkung freigesetzten Dopamins zu beenden, z. B. von dem COMT-Enzym, das Dopamin durch Hinzufü-

gen einer Methylgruppe deaktiviert (Napolitano et al., 1995; Weinshilboum et al., 1999). Das COMT-Enzym ist verantwortlich für >60% des Dopaminabbaus im PFC, aber für <15% des Dopaminabbaus im Striatum (Karoum et al., 1994). Nehmen Parkinson-Patienten einen COMT-Hemmer (Tolcapone), verbessert das ihre exekutiven Funktionen (Gasparini et al., 1997), weil sich dadurch Dopamin im PFC erhöht, aber es verbessert nicht ihre motorischen Probleme, die auf eine striatale Dysfunktion zurückzuführen sind (Chong et al., 2000).

Variationen im COMT-Gen beeinflussen den präfrontalen Kortex unverhältnismäßig. Eine gängige Variation im COMT-Gen, eine Guanin-zu-Adenin-Mutation (eine einzelne Basenpaarsubstitution [CGTG gegen CATG]) führt zur Substitution von Methionin (Met) zu Valin [(Val) AGVKD vs. AGMKD] in der Kodiersequenz des Gens (Lachman et al., 1996). Met bei Codon 158 des COMT-Gens kodiert ein langsames COMT-Enzym im Gehirn; es methyliert Dopamin viermal langsamer als das COMT-Enzym, das aus der Val-158-Version des COMT-Gens kodiert ist (Lotta et al., 1995; Tenhunen et al., 1994). Je langsamer COMT arbeitet, desto länger ist die zeitliche und räumliche Dopaminpräsenz an PFC-Synapsen.

Die Variante des COMT-Gens, das die Dopaminwirkung im PFC verlängert (Met-158), hat sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern zu außergewöhnlichen Leistungen bei kognitiven Aufgaben geführt, die exekutive Funktionen voraussetzen (Diamond et al., 2004; Egan et al., 2001; Malhotra et al., 2002), und auch zu einer effizienteren präfrontalen Funktionsweise, die die kognitive Leistungsfähigkeit konstant hält (Egan et al., 2001; Winterer et al., 2006). Dieser Effekt ist typisch für die Funktionsweise des präfrontalen Kortex. Kein Zusammenhang besteht zwischen dem Met-versus Val-COMT-Genotyp und dem IQ oder anderen kognitiven Leistungen, die nicht zentral vom PFC abhängen, wie z. B. dem Erinnerungs- oder Wiedererkennungsgedächtnis (Diamond et al., 2004; Egan et al., 2001; siehe **Abb. 3**).

Val und Met sind bei Codon 158 gleichwahrscheinlich in COMT-Allelen von Personen europäischer Abstammung (Palmatier et al., 1999). Da COMT Met-158 mit einer besseren Funktionsweise des präfrontalen Kortex assoziiert ist, könnte man fragen, weshalb es im Verlauf der Evolution nicht ausgewählt wurde und zur gängigeren Version des Gens geworden ist. Der Grund ist wahrscheinlich der, dass COMT Val-158 auch bestimmte Vorteile hat. Menschen, die bezüglich der Val-Variante des COMT-Gens homozygot sind, reagieren unter Stress tendenziell ruhiger; dagegen sind Menschen, die bezüglich der Met-158-Variante des COMT-Gens homozygot sind, tendenziell anfälliger für Stress, haben mehr Angst und reagieren stärker auf Schmerzbelastung (Diatchenko et al., 2005; Zubieta et al., 2003).

Die Ursache, weshalb Homozygotie für COMT Met-158 (was zu mehr Dopamin im PFC führt) mit einer weniger guten Stressabwehr assoziiert ist, liegt wahrscheinlich darin, dass hier selbst milder Stress den Dopaminspiegel im PFC (aber sonst nirgendwo im Gehirn) deutlich ansteigen lässt (Del Acro et al., 2007; Deutsch & Roth, 1990;

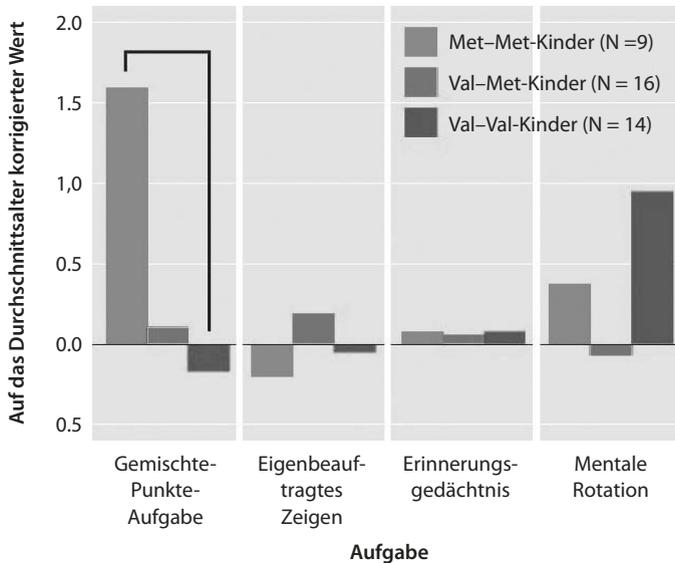


Abbildung 3: Leistung von Kindern nach COMT-Genotyp bei vier kognitiven Manifestationen. Bei der Gemischte-Punkte-Aufgabe, die verlangt, dass zwei Regeln höherer Ordnung im Gedächtnis behalten werden und zwischen Zurückhalten einer präpotenten Antwort und dem Antworten gewechselt wird, und deren Ausführung mit dem Dopaminspiegel zusammenhängt, zeigten bezüglich Met-158 homozygote Kinder eine signifikant bessere Leistung (Wilcoxon $t = 126.0$, $p < 0.01$) als bezüglich des Genotyps COMT Val-158 homozygote Kinder. Alle Gruppen zeigten bei allen Kontrollaufgaben vergleichbare Leistungen (d. h., es gab keine Auswirkung des COMT-Genotyps auf eine Kontrollaufgabe): (1) Self-ordered Pointing Task, der vom PFC abhängt, aber nicht mit dem Dopaminspiegel zusammenhängt; (2) Recall Memory Task, der von dem medialen Schläfenlappen abhängt; und (3) Mental Rotation Task, die vom Parietalkortex abhängt. Um den Alterseffekt zu kontrollieren, wurden altersdurchschnittliche Differenzwerte benutzt. Bei jeder Aufgabe wurde der durchschnittliche Prozentsatz richtiger Antworten für das Alter des Probanden in Jahren von dem Prozentsatz richtiger Antworten des Probanden abgezogen, was einen Altersdifferenzwert ergibt. Dadurch wurden Alterseffekte beseitigt. Bei keiner der drei genannten kognitiven Aufgaben hatte das Geschlecht eine signifikante Relation zur Leistung (aus: Diamond et al., 2004, mit Erlaubnis).

Roth et al., 1988; Reinhard et al., 1982; Thierry et al., 1976). Bezüglich COMT Val-158 homozygote Menschen haben bis zur Erhöhung des Dopaminspiegels im PFC etwas mehr Stresstoleranz, bevor schädliche Wirkungen zu beobachten sind, weil ihr schnell agierendes COMT-Enzym freigesetztes Dopamin rasch entfernt. Bezüglich COMT Met-158 homozygote Menschen haben wegen ihres langsam arbeitenden COMT-Enzyms selbst im Ruhezustand einen relativ hohen Dopaminspiegel im PFC; Stress kann ihren Dopaminspiegel im PFC leicht über das Idealmaß hinaus steigen lassen.

Es ist seit langem bekannt, dass einige der klügsten Menschen auch die fragilste Persönlichkeit haben und sehr sensibel auf Stress reagieren. Möglicherweise könnte folgender Mechanismus die beiden Aspekte miteinander verbinden: Ein bezüglich COMT Met-158 homozygoter Mensch hat vielleicht außergewöhnliche exekutive

Funktionen, reagiert aber höchst verwundbar auf Stress und Angst. Boyce (2007; Boye & Ellis, 2005) hat in dem Zusammenhang die Begriffe „Orchideenkinder“ und „Löwenzahnkinder“ verwendet. „Löwenzahnkinder“ gedeihen überall, wo man sie pflanzt. Oft werden sie als Vorbild für Resilienz gesehen. Doch Untersuchungen zeigen, dass manche Kinder, die in einem nicht stützenden und belastenden Umfeld am schlechtesten gedeihen, genau die Kinder sind, die in einem guten Umfeld wunderbar aufblühen (z. B. Belsky & Beaver, 2011). Bezüglich COMT Val-158 homozygote Kinder sind vielleicht die „Löwenzahnkinder“; sie sind unter Stress robuster, haben aber nicht die Feineinstellung des präfrontalen Kortex, um die Brillanz zu erreichen, zu der ein bezüglich COMT Met-158 homozygoten Kind fähig sein kann. Vielleicht gehören einige bezüglich COMT Met-158 homozygote Kinder zu den „Orchideenkindern“ – sie können in einem belastenden Umfeld unglücklich wirken, im richtigen Umfeld aber zu voller Pracht erblühen.

Die meisten Studien zu den Auswirkungen des COMT-Genotyps haben entweder nur Männer oder größtenteils Männer untersucht oder mögliche geschlechtsbezogene Unterschiede außer Acht gelassen. Doch Östrogen regelt die COMT-Transkription des Menschen dosis- und zeitabhängig herunter (Ho et al., 2008; Jian et al., 2003; Xie et al., 1999) und führt zu einer COMT-enzymatischen Aktivität, die bei Frauen 30 % geringer ist als bei Männern (Boudikova et al., 1990; Chen et al., 2004; Cohn & Axelrod, 1971). Der Bericht, wonach Homozygotie für Met bei Codon 158 des COMT einen kognitiven Vorteil bringt, gilt nicht für Frauen in der Phase des Menstruationszyklus, in der der Östrogenspiegel hoch ist. Die COMT-Aktivität verändert sich umgekehrt zum Östrogenspiegel. Wenn Östrogen bei einem hohen Östrogenspiegel die COMT-Aktivität reduziert, bringt Homozygotie für die Met-Variante des COMT-Gens (was mit einem langsameren COMT-Enzym einhergeht) Frauen keinen kognitiven Vorteil, sondern eher einen Nachteil. Während der Lutealphase des Menstruationszyklus (wenn der Östrogenspiegel hoch ist) zeigen Frauen zwischen 19 und 35 Jahren bessere exekutive Funktionen, wenn sie bezüglich Val bei Codon 158 homozygot sind, als wenn sie bezüglich COMT Met-158 homozygot sind (Evans et al., 2009). Während der Follikelphase des Menstruationszyklus (wenn der Östrogenspiegel niedrig ist) zeigen Frauen, die bezüglich Met bei Codon 158 homozygot sind, das männliche Muster besserer exekutiver Funktionen (Evans et al., 2009).

Die Erhöhung des Dopaminspiegels im PFC ist nur bis zu einem gewissen Grad günstig. Der optimale Dopaminspiegel im PFC liegt im Mittelbereich: Zu viel ist genauso schlecht wie zu wenig Dopamin (Mattay et al., 2003; Zahrt et al., 1997). Diese umgekehrte Dosis-Wirkungs-Kurve von Dopamin hat man bei Mäusen, Ratten, Affen und Menschen beobachtet (Arnsten et al., 1994; Cai & Arnsten, 1997; Gibbs & D'esposito, 2005; Lidow et al., 2003; Vijayaraghavan et al., 2007). Folglich erhöht eine doppelte Ankurbelung des Dopaminspiegels im PFC – ein hoher Östrogenspiegel reduziert die COMT-Aktivität, und Homozygotie für COMT Met-158 reduziert die

COMT-Aktivität – nachweislich den Dopaminspiegel im PFC zu stark, sodass das für die Funktionsweise des präfrontalen Kortex optimale Niveau überschritten ist.

Ältere bezüglich COMT Val-158 homozygote Frauen schneiden im Wisconsin Card Sorting Test (eine Messmethode für exekutive Funktionen) besser ab als ältere bezüglich Met-158 homozygote Frauen, während ältere Männer tendenziell das in der Fachliteratur schon so oft beschriebene Muster zeigen, wonach bezüglich COMT Met-158 homozygote Männer besser abschneiden als bezüglich Val-158 homozygote Männer (Diamond, 2007). Ältere Frauen haben nach der Menopause keine durch den Menstruationszyklus vermittelten Östrogenwellen mehr in ihrem Körper. Der hier beobachtete geschlechtsbezogene Unterschied ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Geschlechtshormone schon sehr früh auf die Entwicklung auswirken (Shansky et al., 2004; Shors & Miesegaes, 2002).

Männliche Tiere zeigen bei PFC-abhängigen Aufgaben bessere Leistungen, wenn sie leichten Stress haben, als wenn sie ruhig sind, was bei weiblichen Tieren nicht der Fall ist; sie zeigen selbst bei leichtem Stress schlechtere Leistungen als bei Ruhe (Arnsten & Goldman-Rakic, 1998; Shansky et al., 2004; Shors, 2001; Shors & Leuner, 2003; Wood & Shors, 1998; Wood et al., 2001). Dieser geschlechtsbezogene Unterschied scheint östrogenvermittelt zu sein. Weibliche Tiere zeigen das männliche Muster als Reaktion auf leichten Stress, wenn ihr Östrogenspiegel niedrig ist, aber leichter Stress beeinträchtigt PFC-abhängige kognitive Funktionen bei weiblichen Tieren an dem Punkt des Östruszyklus, an dem der Östrogenspiegel hoch ist (Shansky et al., 2004).

Vielleicht gibt es einen bis jetzt unbeachteten oder noch nicht beschriebenen geschlechtsbezogenen Unterschied im Grundspiegel von Dopamin im PFC. Vielleicht haben Frauen einen höheren Grundspiegel (Optimalniveau) von Dopamin im PFC und Männer einen etwas zu niedrigen Grundspiegel an Dopamin im PFC. Das würde dem entsprechen, dass der Dopaminspiegel im PFC bei Männern durch leichten Stress auf optimale Höhe steigt, bei Frauen aber über das Optimalniveau hinausgeht (siehe Abb. 4).

Wenn dem so wäre, hätte das wichtige praktische Implikationen für die jeweilige effiziente Dosierung von Medikamenten, die den Dopaminspiegel im PFC beeinflussen. Frauen brauchen vielleicht eine niedrigere Dosierung als Männer, zumindest dann, wenn ihr Östrogenspiegel hoch ist. Es scheint natürlich schon Belege dafür zu geben, dass in den einzelnen Phasen des Menstruationszyklus die optimale Dosierung von Medikamenten, die den PFC beeinflussen, unterschiedlich ist; wenn der Östrogenspiegel einer Frau hoch ist, hat sie mehr Dopamin im PFC, als wenn ihr Östrogenspiegel niedrig ist; die gleiche Dosierung von Medikamenten, die den Dopaminspiegel im PFC beeinflussen und zu bestimmten Zeiten des Monatszyklus günstig sind, können folglich zu anderen Zeiten des Monatszyklus ungünstig sein.

Zu berücksichtigen ist auch das allgemeine Prinzip, dass ein Genotyp, der in einem bestimmten Umfeld vorteilhaft ist, in einem anderen Umfeld vielleicht nachteilig ist.

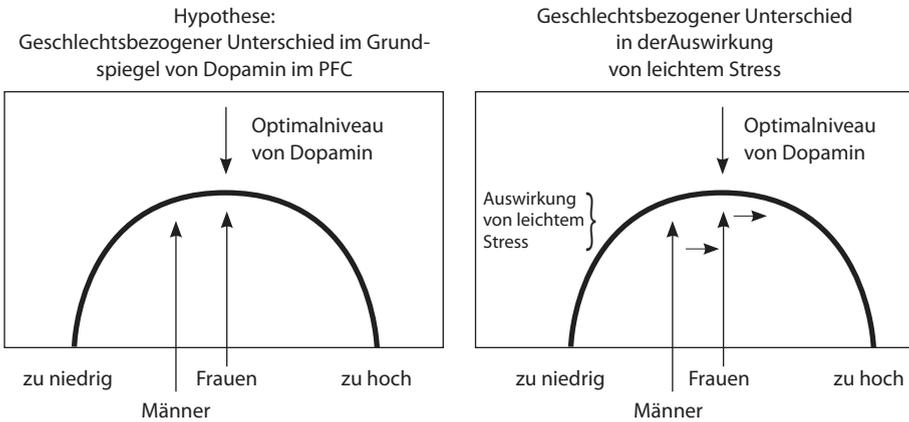


Abbildung 4: Wenn der Grundspiegel von Dopamin im PFC bei Männern und Frauen unterschiedlich ist, wäre dieser Umstand für die unterschiedlichen Auswirkungen von leichtem Stress bei Männern und Frauen verantwortlich (wobei sich leichter Stress bei Männern günstig, bei Frauen aber ungünstig auf exekutive Funktionen auswirkt).

Der Genotyp COMT Met-158 ist in einem äußerst belastenden Umfeld wahrscheinlich nicht vorteilhaft. Doch genau dieser Genotyp, der mit Risiken für Menschen in widrigen, belastenden Situationen verbunden ist, verspricht ein außergewöhnliches Potenzial, wenn für den betreffenden Menschen nur die richtigen Umweltbedingungen gefunden werden. Bei der Arbeit mit Kindern, die in benachteiligten, risikoreichen Verhältnissen leben, muss man dies im Hinterkopf behalten.

Umweltbedingungen und Interventionen, die die Entwicklung von PFC-abhängigen kognitiven Kontrollprozessen fördern

Genauso wie körperliche Fitness durch Bewegung, Erweiterung der eigenen Grenzen und regelmäßiges Training gesteigert werden kann, lassen sich auch exekutive Funktionen durch tagtägliches und den ganzen Tag über andauerndes Ausüben, Herausfordern und Anwenden verbessern. Untersuchungen zeigen, dass dies für das gesamte Menschenleben, von der Kindheit bis ins Alter, zutrifft und dass dafür keine teure, hoch technisierte oder komplizierte Ausrüstung erforderlich ist.

Zweisprachigkeit stellt harte Anforderungen an inhibitorische Kontrolle und kognitive Flexibilität (zwei zentrale Komponenten exekutiver Funktionen). Ein bilingualer Sprecher muss den Gebrauch der Sprache zurückhalten, die sein Zuhörer nicht verstehen würde (selbst wenn diese Sprache das perfekte Wort hätte, das der Sprecher benutzen möchte); er muss von der Perspektive und Mentalität einer Sprache in die der anderen Sprache umschalten; und er muss im Gespräch mit einer Person, die Sprache A spricht, und einer Person, die Sprache B spricht, flexibel hin- und herwech-