

GAP

GEHIRN
ANWENDUNG
PRAXIS

Fokus Schule



GEMEINNÜTZIGE
**Hertie
Stiftung**



Dieser Bericht fasst die Ergebnisse aus dem Projekt G_AP zum Schwerpunktthema Schule zusammen. Neurowissenschaftliche Erkenntnisse

und Stand der neurowissenschaftlichen Forschung über Digitale Medien, Prävention und Früherkennung von Lernstörungen, Pubertät und Schlaf/Tagträume sind hier verständlich aufbereitet.

Unser Dank gilt allen Lehrern und Neurowissenschaftlern, die uns bei diesem Projekt unterstützt und beraten haben, insbesondere Jan Born, Brian Butterworth, Julia Föcker, Nadine Gaab, Anne-Lise Goddings, Reto Huber, Markus Kiefer, Kerstin Konrad, Martin Korte, Heikki Lyytinen, Matthias Mittner, Jiska Peper, Gerd Schulte-Körne, Elsbeth Stern, Katharina Zinke.

Dr. Emanuela Bernsmann

Stand August 2017

Über das Projekt:

Erfahrungen und Recherchen der Hertie-Stiftung haben gezeigt, dass in gesellschaftlich wichtigen Feldern praxisrelevante Ergebnisse der Hirnforschung weitgehend fehlen. Mit G_AP Gehirn-Anwendung-Praxis möchte die Hertie-Stiftung diese Transfer-Lücke schließen

Jedes Jahr wird für G_AP ein gesellschaftlich relevantes Thema als Arbeitsschwerpunkt benannt. Im nächsten Schritt bestimmt eine Gruppe gleichberechtigt aus Neurowissenschaftlern und Vertretern der betroffenen Berufsgruppe relevante Forschungsfelder in diesem Themenfeld. Mit dieser Zusammensetzung werden zugleich wissenschaftliche Expertise und praktischer Nutzen der angestrebten Forschungsergebnisse sichergestellt. Nach einem mehrmonatigen gemeinsamen Arbeitsprozess wird abschließend der Stand der Forschung in jeweils einer allgemein verständlichen Publikation zusammengefasst.

Inhalt

Digitale Medien 3

Literaturempfehlungen	9
Wie beeinflussen die Nutzung und der Konsum digitaler Medien das Gehirn von Kindern und Jugendlichen?	9

Prävention/Früherkennung 12

Literaturempfehlungen	18
Wie kann die Entstehung von Legasthenie und Dyskalkulie verhindert bzw. verringert werden?	18

Pubertät..... 22

Literaturempfehlungen	27
Wie beeinflusst die Pubertät die (schulrelevanten) Funktionen des Gehirns von Jugendlichen?	27

Schlaf/Tagträume..... 33

Literaturempfehlungen	40
Wie beeinflussen Schlaf oder Tagträume die Funktion des Gehirns von Kindern und Jugendlichen?	40

Digitale Medien

Neue Medien – Fluch oder Segen?

von Stefanie Reinberger

Muss man digitale Medien aus dem Klassenzimmer verbannen oder liegt hier der Unterricht der Zukunft? Noch kann die Neurowissenschaft keine klare Antwort geben.

Smartphones, Social Media, Computerspiele und Co – gerade Jugendliche fühlen sich zu modernen Medien geradezu magisch hingezogen. Aus ihrem Leben ebenso wie aus der modernen Gesellschaft überhaupt sind sie nicht mehr wegzudenken. Doch welche Rolle können und dürfen sie im Unterricht spielen? Sind sie eine Gefahr für die Psyche Heranwachsender, wie Manfred Spitzer, ärztlicher Direktor der Psychiatrischen Universitätsklinik Ulm behauptet?¹ Oder sind sie – ganz im Gegenteil – sogar dazu geeignet, die kognitiven Fähigkeiten der Anwender zu steigern?

Um es vorweg zu nehmen: Noch ist weitestgehend unklar wie Computer, Smartphones, Internet und Co das Gehirn und damit das Denken tatsächlich beeinflussen. Die neurobiologische Datenlage ist dünn. Zwar können Neurowissenschaftler mit Sicherheit sagen, dass neue Medien und Technologien Einfluss auf die Gehirne unserer Kinder nehmen. Doch das gilt auch für Bücher und jede andere Form des Lernens und Erlebens. Denn alles, was wir erfahren, schlägt sich in der einen oder anderen Weise in den neuronalen Netzwerken des Denkkorgans nieder. Und natürlich gilt es immer einzugrenzen, um welche Art von Medien oder Spielen es geht. Man könne ebenso wenig pauschal danach fragen, wie Technologie die kognitive Entwicklung beeinflusst, wie man die Frage stellen könne, welchen Einfluss Nahrung auf die körperliche Entwicklung hat, schreibt die Neurowissenschaftlerin Daphne Bavelier, University of Rochester, New York, USA, 2010 gemeinsam mit Kollegen in der Fachzeitschrift Neuron². Ähnlich wie bei der Nahrung kommt es auch bei der Technologie

¹ Spitzer M. Digitale Demenz: Wie wir uns und unsere Kinder um den Verstand bringen. Droemer HC; 2012

² Bavelier D, Green CS, Dye MWG. Children, wired: for better and for worse. Neuron. 2010;67(5):692-701

auf die Art und die Menge an, die konsumiert wird, ebenso wie auf die Dauer.

Eine Frage des Alters

Entscheidend ist aber auch, wer die betreffenden Medien nutzt. So wirken sich Lern-DVDs für Babys und Kleinkinder tatsächlich negativ auf die geistigen Fähigkeiten der Kleinen aus. Eine Gruppe Wissenschaftler hat bereits 2007 beobachtet, dass sich tägliches Vorlesen positiv auf die Sprachentwicklung 2 bis 24 Monate alter Babys auswirkt. Schauen die Kinder stattdessen täglich Lern-DVDs, die eigens für ihre Altersgruppe konzipiert wurden, fehlt der Lerneffekt. Vielmehr wirkt sich das DVD-Schauen sogar negativ auf das Sprachvermögen aus. In entsprechenden Tests schneiden die kleinen Probanden schlechter ab als Altersgenossen, die keine DVDs vorgesetzt bekommen³. Alleine, dass die Babys sich von den Filmen angezogen fühlen, sei kein Indiz dafür, dass auch Lernen angeregt wird, argumentieren Bavelier und ihre Kollegen. Gerade kleine Kinder unter zwei Jahren seien oftmals nicht in der Lage, Inhalte von Videoszenen auf das echte Leben zu übertragen, weshalb ein Lerneffekt durch solche Medien vor dem Vorschulalter nicht zu erwarten sei². Ab dem Vorschulalter können die Kinder jedoch durchaus von digitalen Lernmedien sowie pädagogisch ausgerichteten Sendungen à la Sesamstraße profitieren².

Ist der Entwicklungsschritt vollzogen, der Kinder befähigt, das, was sie im Film sehen, auf das reale Leben zu übertragen, so lässt sich zumindest bei bestimmten, so genannten regelbasierten Vorgängen kaum noch ein Unterschied ausmachen, ob die Kinder von Videoszenen lernen oder echte Personen beobachten, wie eine japanische Studie aus dem Jahr 2013 nahelegt⁴. Die Forscher ließen fünf- bis sechsjährige Probanden zusehen, wie Karten mit Symbolen nach einem Schema sortiert wurden, das den Kindern nicht bekannt war. Eine Gruppe sah den Vorgang per Videoaufzeichnung, für die andere

ordnete eine Person die Karten live. Anschließend sollten die Kinder selbst die Karten sortieren, während die Wissenschaftler deren Hirnaktivität beobachteten. Tatsächlich war in beiden Gruppen der sensomotorische Cortex aktiv, in dem Handlungen, die man beobachtet, im Geiste nachvollzogen werden. Zwar war die Aktivität in der Videogruppe etwas reduziert, doch die Unterschiede waren marginal. Interessanterweise war bei dieser Gruppe jedoch – im Gegensatz zu den Probanden mit der Live-Vorführung – das Spiegelneuronensystem nicht aktiviert. Dafür rekrutierten sie den lateralen okzipitalen Cortex, eine Hirnregion, die zum visuellen Cortex, zählt, in dem optische Reize verarbeitet werden. Auf der Verhaltensebene, also im Ergebnis der Sortieraufgabe, unterschieden sich beide Gruppen nicht.

Schreibenlernen besser von Hand

Ob digitale Medien zum Lernerfolg beitragen können oder nicht, hängt jedoch stark davon ab, welche Fähigkeiten vermittelt und gefördert werden sollen. Markus Kiefer, Professor am Institut für Psychologie und Pädagogik der Universität Ulm, forscht im Bereich des Lesen- und Schreibenlernens. Er ist überzeugt: „Lesen- und Schreibenlernen ist ein Bereich, bei dem es momentan keine Hinweise dafür gibt, dass Tippen auf dem Computer eine Unterstützung bietet.“

Kiefer hat 2015 in einer Untersuchung beobachtet, dass Kindergartenkinder, die des Lesens und Schreibens noch nicht mächtig sind, sich Buchstaben und kurze Kunstwörter besser einprägen, wenn sie diese – ganz klassisch mit Stift und Papier ausgerüstet – in spielerischen Schreiblernübungen von Hand malen, statt sie per Tastatur und Computer zu reproduzieren⁵.

Einen Erklärungsansatz dafür haben französische Wissenschaftler der Universität Aix-Marseille bereits 2013 gefunden. Sie hatten in einer Metaanalyse die

³ Zimmerman FJ, Christakis DA, Meltzoff AN. Associations between media viewing and language development in children under age 2 years. J Pediatr. 2007;151(4):364-368

⁴ Moriguchi Y, Hiraki K. Neural basis of learning from television in young children. Trends Neurosci Educ. 2014;3(3-4):122-127

⁵ Kiefer M, Schuler S, Mayer C, Trumpp NM, Hille K, Sachse S. Handwriting or Typewriting? The Influence of Pen- or Keyboard-Based Writing Training on Reading and Writing Performance in Preschool Children. Adv Cogn Psychol. 2015;11(4):136-146

Daten aus 18 Studien miteinander verglichen, die mit Hilfe bildgebender Verfahren die Hirnaktivität beim Schreiben mit der Hand untersucht hatten. Demnach treten ganze 12 Hirnareale beim Handschreiben in Aktion – darunter Bereiche für motorische Prozesse und für die Sprachverarbeitung⁶. Wie sich gezeigt hat, sind die motorischen Areale, die beim Schreiben aktiv werden, auch für das Wiedererkennen von Zeichen, Buchstaben und Wörtern und damit fürs Lesen von Bedeutung^{7,8}. Beim Schreiben mit der Hand legt das Gehirn eine motorische Gedächtnisspur an. Das ist auch der Grund dafür, dass es helfen kann, sich die korrekte Schreibweise eines Wortes ins Gedächtnis zu rufen, indem man das Wort mit dem Zeigefinger in die Luft malt.

Von diesem Effekt profitiert allerdings nur, wer frei und von Hand schreibt, wie die US-Psychologinnen Karin James und Laura Engelhardt von der Indiana University in Bloomington 2012 erkannten. Sie zeigten fünfjährigen Vorschulkindern Bilder von Buchstaben, die die kleinen Probanden anschließend entweder freihändig oder auf vorgegebenen Linien abmalen oder auf einer Computertastatur eingeben sollten. Nur bei den frei malenden Kindern wurden auch motorische Regionen im Frontalhirn aktiv. Bei Vorschülern, die auf vorgegebenen Linien nachmalten oder gar tippten, erfolgte diese motorische Verknüpfung nicht⁹.

„Tippen ist eine sinnentleerte Bewegung, und es macht keinen Unterschied, ob ein A, ein E oder ein X getippt wird“, erklärt der Ulmer Kognitionspsychologe Kiefer. Für ihn ist es daher ein unsinniges Unterfangen, Lesen und Schreiben per Computer vermitteln zu wollen.

Doch es gibt Ausnahmen: Wie ein internationales Forscherteam 2015 herausfand, ist das finnische Computerlernspiel „GraphoGame“ durchaus geeignet, um Kinder mit Legasthenie beim Lesenlernen zu unterstützen. Außerdem testeten die Wissenschaftler das Spiel erfolgreich bei afrikanischen Schulkindern, die damit besser Lesen lernten¹⁰. Studien, die den Effekt des Lernspiels unter die Lupe genommen haben, haben ergeben, dass „GraphoGame“ die Verknüpfung von Laut und Buchstaben symbol fördert, wodurch die Gehirnregionen aktiviert werden, in denen die visuelle Verarbeitung der Schriftsprache erfolgt¹¹. Demnach ist das digitale Lerntool in der Lage, zumindest bestimmte grundlegende Fähigkeiten, die zum Erwerb der Schriftsprache benötigt werden, zu unterstützen.

Verblüffendes haben Hirnforscher in den letzten Jahren in Sachen Computerspiele herausgefunden. Während Wissenschaftler wie Spitzer Horrorszenerien zeichnen von Jugendlichen, die ihre Konzentrationsfähigkeit einbüßen, ADHS entwickeln und aggressiv werden, behauptet Daphne Bavelier, Expertin auf dem Gebiet Computerspiele und Gehirn: Daddeln steigert die visuelle Aufmerksamkeit¹² sowie die selektive Aufmerksamkeit, also die Fähigkeit sich auf Relevantes zu fokussieren und störende Reize auszublenden¹³.

Daddeln für mehr Aufmerksamkeit

Bereits in früheren Studien hatte Bavelier erkannt, dass Probanden, die regelmäßig am Computer spielen, eine größere Anzahl beweglicher Objekte im Auge behalten können als Nichtspieler. Doch die Zocker bewältigen auch Suchaufgaben schneller – ein Effekt, der noch deutlicher wird, wenn bewegliche Objekte von der eigentlichen Aufgabe ablenken. Der

⁶ Planton S, Judla M, Roux F-E, Démonet J-F. The “handwriting brain”: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*. 2013;49(10):2772-2787

⁷ Longcamp M, Lagarrigue A, Nazarian B, et al. Functional specificity in the motor system: Evidence from coupled fMRI and kinematic recordings during letter and digit writing. *Hum Brain Mapp*. 2014;35(12):6077-6087

⁸ Pattamadilok C, Ponz A, Planton S, Bonnard M. Contribution of writing to reading: Dissociation between cognitive and motor process in the left dorsal premotor cortex. *Hum Brain Mapp*. 2016;37(4):1531-1543

⁹ James KH, Engelhardt L. The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends Neurosci Educ*. 2012;1(1):32-42

¹⁰ Ojanen E, Ronimus M, Ahonen T, et al. GraphoGame - a catalyst for multi-level promotion of literacy in diverse contexts. *Front Psychol*. 2015;6:671

¹¹ Richardson U, Lyytinen H. The GraphoGame Method: The Theoretical and Methodological Background of the Technology-Enhanced Learning Environment for Learning to Read. *Hum Technol An Interdiscip J Humans ICT Environ*. 2014;10(1):39-60

¹² Bavelier D, Achtman RL, Mani M, Föcker J. Neural bases of selective attention in action video game players. *Vision Res*. 2012;61:132-143

¹³ Stevens C, Bavelier D. The role of selective attention on academic foundations: a cognitive neuroscience perspective. *Dev Cogn Neurosci*. 2012;2 Suppl 1:S30-S48

Unterschied machte sich nicht nur in der Reaktionszeit bemerkbar. Im neuronalen Netzwerk für die Aufmerksamkeit, das sich im Gehirn über den Frontal- und den Parietallappen erstreckt, zeigte sich, dass die Gamer ihre visuelle Konzentrationsfähigkeit trainiert hatten. Insbesondere der Bereich, der für bewegungssensitive, visuelle Wahrnehmung zuständig ist, war bei den geübten Computerspielern weniger aktiviert. Demnach ziehen die beweglichen Störobjekte bei ihnen weniger Aufmerksamkeit auf sich. Oder anders gesagt: Die Gruppe der Spieler konnten zusätzliche visuelle Informationen, die von der Aufgabe ablenken sollten, besser ausblenden.

Zudem zeigt eine andere Studie, dass sich die exekutive Aufmerksamkeit per Computerspiel trainieren lässt – auch bei jüngeren Kindern¹⁴. Die exekutive Aufmerksamkeit bezeichnet die Fähigkeit, Informationen willentlich zu verarbeiten – ohne sich dabei durch Irrelevantes ablenken zu lassen. Die Forscher ließen Kinder im Alter von vier beziehungsweise sechs Jahren ihre Aufmerksamkeit mit einem einfachen Computerspiel trainieren, bei dem es darum ging, per Tastendruck anzuzeigen, ob benachbarte Fische in dieselbe Richtung „schwimmen“ oder nicht. Tatsächlich verbesserten sich die Fähigkeiten der kleinen Probanden zunehmend. Außerdem zeigte sich in der Elektroenzephalografie, dass die elektrische Gehirnaktivität im Bereich des neuronalen Netzwerks für die exekutive Aufmerksamkeit erhöht war.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam ein chinesisch-deutsches Forscherteam, das 2015 den Effekt eines Tablet-Spiels auf vier- bis fünfjährige Kinder untersuchte¹⁵. Demnach kann ein Computerspiel, bei dem es darum geht, schnell zu entscheiden, ob auf ein bestimmtes visuelles Signal – eine Frucht oder eine Bombe – reagiert werden soll oder nicht, die inhibitorische Kontrolle verbessern. Das Forscherteam beobachtete diesen Effekt auch per EEG. Die

inhibitorische Kontrolle ist ein zentraler Bestandteil der exekutiven Aufmerksamkeit und dient dazu, automatische, aber falsche Antworten auf einen Reiz zu verhindern. Sie spielt eine wichtige Rolle in der kognitiven Entwicklung und ihre Ausprägung ist ein entscheidendes Indiz dafür, ob ein Kind schulreif ist oder nicht.

Ein weiterer interessanter Befund: Regelmäßiges Computerspiel führt zu einer Zunahme an grauer Masse im präfrontalen Cortex¹⁶. Ein internationales Forscherteam hatte 152 Jugendliche zu ihren Spielgewohnheiten befragt und die Dicke ihrer Hirnrinde vermessen. Dabei stellte sich heraus, dass die graue Masse im präfrontalen Cortex umso voluminöser war, je öfter die Probanden nach eigenen Angaben spielten. Der präfrontale Cortex steht im Zusammenhang mit der exekutiven Kontrolle, weshalb der Befund kognitive Verbesserungen durch das Daddeln erklären kann. Eine Verringerung der Hirnmasse in diesem Bereich beobachteten die Forscher in keinem Fall.

Bei all den positiven Befunden muss allerdings eingeräumt werden: Spielen hat ganz allgemein betrachtet einen positiven Effekt auf das Lernen und die kognitive Entwicklung, und kann – gezielt eingesetzt – sogar Lernstörungen entgegenwirken¹⁷. Bei Kindern mit ADHS kann unstrukturiertes Spielen jedoch auch negative Effekte haben¹⁷. Welche spezielle Rolle Computerspielen im Wechselspiel zwischen Spielen und Lernen zukommt, muss noch geklärt werden – ebenso wie die möglichen Gefahren des übermäßigen Daddelns.

Dazu kommt: Digitale Medien sind sicher nicht die Lösung aller Lern- und Konzentrationsprobleme. So zeigte eine aktuelle finnische Studie, dass mediales Multitasking – also etwa Chatten bei gleichzeitiger Berieselung durch Musikvideos – der Aufmerksamkeit eher schadet als nutzt¹⁸. Jugendliche, die nach eigenen Angaben regelmäßig mehrere Medien

¹⁴ Rueda MR, Rothbart MK, McCandliss BD, Saccomanno L, Posner MI. Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2005;102(41):14931-14936

¹⁵ Liu Q, Zhu X, Ziegler A, Shi J. The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Sci Rep*. 2015;5:14200

¹⁶ Kühn S, Lorenz R, Banaschewski T, et al. Positive association of video

game playing with left frontal cortical thickness in adolescents. *PLoS One*. 2014;9(3):e91506

¹⁷ Hedges JH, Adolph KE, Amso D, et al. Play, attention, and learning: how do play and timing shape the development of attention and influence classroom learning? *Ann N Y Acad Sci*. 2013;1292:1-20

¹⁸ Moisa M, Salmela V, Hietajärvi L, et al. Media multitasking is associated with distractibility and increased prefrontal activity in adolescents and young adults. *Neuroimage*. 2016;134:113-121

gleichzeitig nutzten, scheiterten häufiger bei einem Aufmerksamkeitstest, bei dem es galt, sinnvolle geschriebene Sätze der Art „Ich habe eine Schüssel Cerealien gefrühstückt“ von unsinnigen wie „Ich habe eine Schüssel Schuhe gefrühstückt“ zu unterscheiden. Außerdem brachte die funktionelle Magnetresonanztomografie ans Licht, dass bei den Multimedia-Kids die Aktivität im Aufmerksamkeitsnetzwerk erhöht war – und zwar umso stärker, je mehr Schwierigkeiten sie bei der Aufgabe hatten und je mehr Medien sie im Alltag parallel konsumierten.

Zudem ist eine gewisse Skepsis angezeigt, denn ein Gutteil der Studien zum Thema neue Medien und Gehirn wird in der einen oder anderen Weise von der Computerindustrie finanziert, wie Markus Kiefer zu bedenken gibt: „Da stecken ein großer Markt und ein enormes wirtschaftliches Interesse dahinter.“ Das muss nicht heißen, dass Studien schlecht oder gar unseriös sind. Doch allein die Art der Fragestellung kann dazu führen, dass die Ergebnisse eher zum positiven denn zum negativen Effekt tendieren. Und: Noch mangelt es an allgemeinen Methoden um die Effekte von Computerspielen – egal welcher Ausrichtung – auf das Gehirn vergleichbar zu untersuchen¹⁹.

Gewaltbereitschaft, Suchtpotential und Co: Negative Auswirkungen ernst nehmen

Doch der Einfluss neuer Medien auf das Gehirn ist hoch komplex und betrifft weit mehr als nur die Aufmerksamkeit. So ist der negative Effekt von Gewaltspielen auf das Verhalten nicht von der Hand zu weisen: Sie lassen das Empfinden für Gewalt abstumpfen²⁰. So ergaben fMRT-Untersuchungen von 13 männlichen Probanden im Alter von 18 bis 26 Jahren, dass die Gehirnaktivität in Arealen, die für

Emotionsverarbeitung zuständig sind, reduziert ist, während sie gewalttätige Computerspiele zockten²¹.

Ein zentrales Thema im aktuellen Drogen- und Suchtbericht der Bundesregierung ist die Online-Sucht²². Laut einer DAK-Studie aus dem Jahr 2015 besteht bei 4,7 Prozent der 12- bis 17-jährigen das Risiko, eine Internetsucht zu entwickeln. Ganze 22 Prozent fühlten sich beim Versuch, ihre Nutzung zu reduzieren, „ruhelos, launisch, niedergeschlagen oder gereizt.“²³ Schon seit einigen Jahren wird immer deutlicher, dass sich das Gehirn bei einer Online-Sucht in ähnlicher Weise verändert wie bei Drogenabhängigen^{24,25,26}.

Zumindest ein Teil der Probleme, die nach Ansicht des Ulmer Psychiaters Manfred Spitzer hinter den modernen Medien lauern, sind also nicht von der Hand zu weisen. Dazu kommt, dass gerade Social Media wie Facebook sich stark auf das soziale Miteinander auswirken: Von der Angst etwas zu verpassen über das Gefühl von den Unternehmungen der Clique ausgeschlossen zu sein bis hin zum Mobbing durch die Klassenkameraden. Der soziale Schmerz hinterlässt Spuren im Denkorgan – ähnlich denen physischer Schmerzen, wie Wissenschaftler bereits 2003 belegten²⁷. Und eine aktuelle italienische Studie zeigt: Die ständige Angst, etwas zu verpassen geht mit einer erhöhten Aktivität im temporoparietalen Übergang einher, dem Bereich im Gehirn, der in Aktion tritt, wenn Menschen ernsthaft darüber nachgrübeln, was andere in einer bestimmten Situation empfinden²⁸ – also was sie zum Beispiel denken, wenn sie einen Post nicht „liken“ oder versäumen, die betroffene Person zu einer Party einzuladen. Wer in ständiger Angst lebt, etwas zu verpassen und den Anschluss zu verlieren, wird sich daher

¹⁹ Ninaus M, Kober SE, Friedrich EVC, Dunwell I, de Freitas S, Arnab S, Ott M, Kravcik M, Lim T, Louchart A, Thin AG, Berta R, Wood G NC. Neurophysiological methods for monitoring brain activity in serious games and virtual environments: A review. *Int J Technol Enhanc Learn*. 2014;6(1):78-103

²⁰ Brockmyer JF. Playing violent video games and desensitization to violence. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am*. 2015;24(1):65-77

²¹ Weber R, Ritterfeld U, Mathiak K. Does Playing Violent Video Games Induce Aggression? Empirical Evidence of a Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Media Psychol*. 2006;8(1):39-60

²² Mortier M. Drogen- und Suchtbericht der Drogenbeauftragten; 2016

²³ forsa Politik- und Sozialforschung GmbH, Berlin. Internet- und Computergebrauch bei Kindern und Jugendlichen. DAK-Studie; 2015

²⁴ Kuss DJ, Griffiths MD. Internet and gaming addiction: a systematic literature review of neuroimaging studies. *Brain Sci*. 2012;2(3):347-374

²⁵ Ding W, Sun J, Sun Y, et al. Altered default network resting-state functional connectivity in adolescents with Internet gaming addiction. *PLoS One*. 2013;8(3):e59902

²⁶ Weng C-B, Qian R-B, Fu X-M, et al. Gray matter and white matter abnormalities in online game addiction. *Eur J Radiol*. 2013;82(8):1308-1312

²⁷ Eisenberger NI, Lieberman MD, Williams KD. Does rejection hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*. 2003;302(5643):290-292

²⁸ Lai C, Altavilla D, Ronconi A, Aceto P. Fear of missing out (FOMO) is associated with activation of the right middle temporal gyrus during inclusion social cue. *Comput Human Behav*. 2016;61:516-521

sehr wahrscheinlich stärker in sozialen Medien engagieren und im schlimmsten Fall den Anschluss an die reale Welt versäumen.

Die Frage kann also letztlich nicht lauten, ob digitalen Medien der Zutritt zum Klassenzimmer gewährt werden sollte oder nicht. Vielmehr gilt es zu diskutieren, in welchen Bereichen sie sich für bestimmte Lernziele nutzen lassen, wo mögliche Gefahren lauern und wie sich diesen – auch durch das gezielte Vermitteln von Medienkompetenz – begegnen lässt. Auch das richtige Maß zu finden muss Bestandteil der Forschung und der Debatte sein. Denn wie ein spanisch-australisches Forscherteam erst in diesem Jahr in einer fMRT-Studie belegte, reichen bereits eine Stunde Computerspiel pro Woche aus, um einen positiven Effekt auf die visomotorischen Fähigkeiten von Schulkindern auszuüben²⁹. Häufigeres Spielen könne jedoch negative Auswirkungen haben. Nach Ansicht der Wissenschaftler gelte es daher herauszufinden, wie viel Computerspiel gut, wie viel eher schädlich ist, und ob möglicherweise bestimmte Gruppen vom Daddeln eher profitieren oder Schaden nehmen. Und um das herauszufinden wird in den kommenden Jahren noch eine Menge gezielter Forschung notwendig sein.

²⁹ Pujol J, Fenoll R, Fornis J, et al. Video gaming in school children- how

much is enough? *Ann Neurol.* 2016;Aug 22. doi:10.1002/ana.24745

Literaturempfehlungen

Wie beeinflussen die Nutzung und der Konsum digitaler Medien das Gehirn von Kindern und Jugendlichen?

Wir haben drei Experten, die verschiedene Forschungsschwerpunkte zum Thema digitale Medien haben, gefragt, welche 30 neurowissenschaftlichen Publikationen sie für die wichtigsten halten, um obige Frage beantworten zu können.

Unter Neurowissenschaften verstehen wir die naturwissenschaftliche Erforschung des Gehirns unter Einsatz technischer Methoden, die den Aufbau oder die Funktionsweise von Nervenzellen, Nervenzellverbänden oder des gesamten Organs erfassen.

Dr. Julia Föcker, Prof. Dr. Markus Kiefer, Prof. emer. Heikki Lyytinen haben uns bei unserem Projekt unterstützt und ihre Literaturempfehlungen zum Thema zusammengestellt.

1.

*Dr. rer. nat. **Julia Föcker** ist als Akademische Rätin auf Zeit am Lehrstuhl für klinische Neuropsychologie der Ludwig-Maximilians-Universität München tätig. Ausgestattet mit einem DFG-Stipendium begann sie 2010 ihre Forschung zur Plastizität des Gehirns insbesondere bei Computerspielen im Labor von Prof. Daphne Bavelier, University of Rochester, USA, der sie 2012 als PostDoc an die Universität Genf, CH, folgte, bevor sie 2015 in die Abteilung von Prof. Schenk wechselte.*

Bavelier D, Green CS, Dye MWG. Children, wired: for better and for worse. *Neuron*. 2010;67(5):692-701.

Brockmyer JF. Playing violent video games and desensitization to violence. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am*. 2015;24(1):65-77.

Denworth L. Brain-Changing Games. *Sci Am Mind*. 2012;23(6):28-35.

Ding W, Sun J, Sun Y, et al. Altered default network resting-state functional connectivity in adolescents with Internet gaming addiction. *PLoS One*. 2013;8(3):e59902.

Drummond A, Sauer JD. Video-games do not negatively impact adolescent academic performance in science, mathematics or reading. *PLoS One*. 2014;9(4):e87943.

Gershenfeld A. Mind Games. *Sci Am*. 2014;310(2):54-59.

Hedges JH, Adolph KE, Amso D, et al. Play, attention, and learning: how do play and timing shape the development of attention and influence classroom learning? *Ann N Y Acad Sci*. 2013;1292:1-20.

Hurley D. The For-Real Science of Brain Training. *Sci Am Mind*. 2016;27(3):58-65.

Jackson LA, Witt EA, Games AI, Fitzgerald HE, von Eye A, Zhao Y. Information technology use and creativity: Findings from the Children and Technology Project. *Comput Human Behav*. 2012;28(2):370-376.

Kühn S, Lorenz R, Banaschewski T, et al. Positive association of video game playing with left frontal cortical thickness in adolescents. *PLoS One*. 2014;9(3):e91506.

Kuss DJ, Griffiths MD. Internet and gaming addiction: a systematic literature review of neuroimaging studies. *Brain Sci*. 2012;2(3):347-374.

Liu Q, Zhu X, Ziegler A, Shi J. The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Sci Rep*. 2015;5:14200.

Moyer MW. The Serious Need for Play. *Sci Am*. 2016;25:50-57.

Pujol J, Fenoll R, Forns J, et al. Video gaming in school children- how much is enough? *Ann Neurol*. July 2016. doi:10.1002/ana.24745.

Stevens C, Bavelier D. The role of selective attention on academic foundations: a cognitive neuroscience perspective. *Dev Cogn Neurosci*. 2012;2 Suppl 1:S30-S48.

Stix G. How to Build a Better Learner. *Sci Am.* 2016;25:26-33.

Weng C-B, Qian R-B, Fu X-M, et al. Gray matter and white matter abnormalities in online game addiction. *Eur J Radiol.* 2013;82(8):1308-1312.

2.

*Prof. Dr. **Markus Kiefer** ist Psychologe und Hirnforscher. Er leitet an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie III der Universität Ulm die Sektion für kognitive Elektrophysiologie und lehrt am Institut für Psychologie und Pädagogik der Universität Kognitionspsychologie und kognitive Neurowissenschaft. Markus Kiefer forscht über Gedächtnis, Sprache und Bewusstsein und veröffentlichte zahlreiche Artikel zu diesen Themen. Ein Schwerpunkt seiner Forschung ist das Gebiet der verkörperten Kognition, die Verankerung von Denken und Sprache in Wahrnehmung und Handlung.*

Anguera JA, Boccanfuso J, Rintoul JL, et al. Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature.* 2013;501(7465):97-101.

Bavelier D, Achtman RL, Mani M, Föcker J. Neural bases of selective attention in action video game players. *Vision Res.* 2012;61:132-143.

Bavelier D, Green CS, Han DH, Renshaw PF, Merzenich MM, Gentile DA. Brains on video games. *Nat Rev Neurosci.* 2011;12(12):763-768.

Brem S, Bach S, Kucian K, et al. Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010;107(17):7939-7944.

Fisher M, Goddu MK, Keil FC. Searching for explanations: How the Internet inflates estimates of internal knowledge. *J Exp Psychol Gen.* 2015;144(3):674-687.

Gindrat A-D, Chytiris M, Balerna M, Rouiller EM, Ghosh A. Use-dependent cortical processing from

fingertips in touchscreen phone users. *Curr Biol.* 2015;25(1):109-116.

Green CS, Bavelier D. Learning, attentional control, and action video games. *Curr Biol.* 2012;22(6):R197-R206.

Greenfield PM. Technology and informal education: what is taught, what is learned. *Sci.* 2009;323(5910):69-71.

James KH, Atwood TP. The role of sensorimotor learning in the perception of letter-like forms: tracking the causes of neural specialization for letters. *Cogn Neuropsychol.* 2009;26(1):91-110.

James KH, Engelhardt L. The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends Neurosci Educ.* 2012;1(1):32-42.

Kiefer M, Trumpp NM. Embodiment theory and education: The foundations of cognition in perception and action. *Trends Neurosci Educ.* 2012;1(1):15-20.

Kiefer M, Velay J-L. Writing in the digital age. *Trends Neurosci Educ.* July 2016.

Klasen M, Weber R, Kircher TT, Mathiak KA MK. Neural contributions to flow experience during video game playing. *SCAN.* 2012;7:485-495.

Klingberg T. Training and plasticity of working memory. *Trends Cogn Sci.* 2010;14(7):317-324.

Longcamp M, Lagarrigue A, Nazarian B, et al. Functional specificity in the motor system: Evidence from coupled fMRI and kinematic recordings during letter and digit writing. *Hum Brain Mapp.* 2014;35(12):6077-6087.

Mathiak K, Weber R. Toward brain correlates of natural behavior: fMRI during violent video games. *Hum Brain Mapp.* 2006;27(12):948-956.

Moisala M, Salmela V, Hietajärvi L, et al. Media multitasking is associated with distractibility and increased prefrontal activity in adolescents and young adults. *Neuroimage.* 2016;134:113-121.

Owen AM, Hampshire A, Grahn JA, et al. Putting brain training to the test. *Nature*. 2010;465(7299):775-778.

Pattamadilok C, Ponz A, Planton S, Bonnard M. Contribution of writing to reading: Dissociation between cognitive and motor process in the left dorsal pre-motor cortex. *Hum Brain Mapp*. 2016;37(4):1531-1543.

Rueda MR, Rothbart MK, McCandliss BD, Saccomanno L, Posner MI. Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2005;102(41):14931-14936.

Wang Y, Zou Z, Song H, et al. Altered Gray Matter Volume and White Matter Integrity in College Students with Mobile Phone Dependence. *Front Psychol*. 2016;7:597.

3.

Heikki Lyytinen ist als Professor emeritus für Entwicklungsneuropsychologie am Niilo Mäki Institut der Universität Jyväskylä, FIN, tätig. Er ist UNESCO Lehrstuhlinhaber für „Inclusive Literacy Learning for All“ und leitet die Jyväskylä longitudinal study of Dyslexia (seit 1996) und die GraphoWorld Projekte (www.graphogame.info). Professor Lyytinen ist Autor von mehr als 300 wissenschaftlichen Publikationen. Sein aktueller Forschungsschwerpunkt betrifft die Entwicklung wissenschaftlich validierter E-learning Anwendungen für die grundlegenden schulischen Fähigkeiten.

Bach S, Richardson U, Brandeis D, Martin E, Brem S. Print-specific multimodal brain activation in kindergarten improves prediction of reading skills in second grade. *Neuroimage*. 2013;82:605-615.

Bavelier D, Davidson RJ. Brain training: Games to do you good. *Nature*. 2013;494(7438):425-426.

Berninger VW, Dunn M. Brain and Behavioral Response to Intervention for Specific Reading, Writing,

and Math Disabilities: What Works for Whom? Elsevier; 2012.

Brem, S., Bach, S., Kujala, J., Maurer, U., Lyytinen, H., Richardson, U., & Brandeis D. An Electrophysiological Study of Print Processing in Kindergarten: The Contribution of the Visual N1 as a Predictor of Reading Outcome. *Dev Neuropsychol*. 2013;38(8):567-594.

Brem S, Bach S, Kucian K, et al. Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2010;107(17):7939-7944.

Guttorm, T., Alho-Näveri, L., Richardson, U., & Lyytinen H. Brain activation measures in predicting reading skills and evaluating intervention effects in children at risk for dyslexia. In: *Dyslexia Across Languages: Orthography and the Brain-Gene-Behavior Link*. ; 2011:133-140.

Lovio R, Halttunen A, Lyytinen H, Näätänen R, Kujala T. Reading skill and neural processing accuracy improvement after a 3-hour intervention in preschoolers with difficulties in reading-related skills. *Brain Res*. 2012;1448:42-55.

Ojanen E, Ronimus M, Ahonen T, et al. GraphoGame - a catalyst for multi-level promotion of literacy in diverse contexts. *Front Psychol*. 2015;6:671.

Richardson U, Lyytinen H. The GraphoGame Method: The Theoretical and Methodological Background of the Technology-Enhanced Learning Environment for Learning to Read. *Hum Technol An Interdiscip J Humans ICT Environ*. 2014;10(1):39-60.

Neurophysiological methods for monitoring brain activity in serious games and virtual environments: A review. *Int J Technol Enhanc Learn*. 2014;6(1):78-103.

Prävention/Früherkennung

Legasthenie und Dyskalkulie – Königsweg Neurowissenschaft?

von Stefanie Reinberger

Probleme mit Lesen, Schreiben und Rechnen spiegeln sich auch im Gehirn wieder. Doch können Erkenntnisse aus der Neurowissenschaft hier wirklich helfen?

Im Lesen und Schreiben schlecht – Mathe ist eine Katastrophe. Schüler mit einer Legasthenie, einer Lese- und/oder Rechtschreibstörung, oder einer Dyskalkulie, einer Rechenstörung¹, können kaum lernen, was ihren Klassenkameraden meist mehr oder minder leichtfällt. Dabei mangelt es ihnen nicht an Intelligenz oder regelmäßigem Schulbesuch, wie man heute weiß. Umfassende Studien haben ergeben: Auch Kinder mit normalem oder sogar überdurchschnittlichem IQ sind betroffen und schaffen es nicht, grundlegende Leistungen im Lesen² und Rechnen³ zu erzielen. Spezifische Lernstörungen sind daher klar von den Lernbehinderungen abzugrenzen, wie der britische Neurokognitionsforscher Brian Butterworth, University College London in einem Übersichtsartikel schreibt⁴. Und doch gibt es bislang kaum Mittel und Wege, Betroffene in diesen schulischen Kernfächern nachhaltig zu unterstützen.

Dabei wäre Hilfe dringend notwendig. Denn spezifische Lernstörungen sind weit verbreitet⁵. Laut einer deutschen Studie sind 10-25 % der Dritt- und Viertklässler von einer oder sogar von mehreren solcher Lernstörungen betroffen. Die Zahl der Betroffenen

bei den einzelnen Störungen schwanken je nach Diagnosekriterien beträchtlich⁶. Bei ca. 2,6–5 Prozent liegen eine Lese-, bei 2,6–5,6 Prozent eine Rechtschreib- und bei 1,3–3,8 Prozent eine Rechenstörung vor. Seit den Erstbeschreibungen findet sich ein häufigeres Auftreten der Lese- und Rechtschreibstörungen bei den Jungen, hingegen treten Rechenstörungen häufiger bei den Mädchen auf. Inwieweit genetische, neurobiologische oder hormonelle Faktoren die unterschiedlichen Prävalenzen erklären, ist bislang ungeklärt. Nicht selten leiden die Betroffenen unter mehreren Lernstörungen gleichzeitig – am häufigsten beobachtet man eine Kombination aus Lese- und Rechtschreibstörung sowie Rechtschreib- und Rechenstörung⁶. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Förderung dar, da die betroffenen Kinder eine umfassendere und intensivere Förderung benötigen.

Das gemeinsame Auftreten von Lese-, Rechtschreib- und Rechenstörung ist zu häufig, um allein dem Zufall geschuldet zu sein⁷. Auffällig ist außerdem die familiäre Häufung dieser Störungen, die für Leseschwäche bereits im Jahr 1896 erstmals beobachtet und publiziert wurde⁸. Genetische Studien mit betroffenen Familien und eineiigen Zwillingen belegen, dass Lese-, Rechtschreib- und Rechenstörung familiär gehäuft auftreten und zu 50 bis 60 Prozent genetisch bedingt sind^{9,10}. Bislang haben Wissenschaftler einzelne Kandidatengenregionen auf den Chromosomen 2, 3, 6, 15 und 18 identifiziert¹⁰. Involvierte Gene nehmen häufig Schlüssel-funktionen für das Wachstum von Nervenzellen und Nervenzellfortsätzen ein^{10,11}. Allerdings sollte man nicht annehmen, dass einzelne Genveränderungen die Ursache für die spezifischen Lernstörungen darstellen. Vielmehr handelt es sich um so genannte polygenetische Effekte: Eine Vielzahl von Genen mit

¹ Schulte-Körne G. The prevention, diagnosis, and treatment of dyslexia. Dtsch Arzteblatt Int. 2010;107(41):718-726

² Tanaka H, Black JM, Hulme C, et al. The brain basis of the phonological deficit in dyslexia is independent of IQ. Psychol Sci. 2011;22(11):1442-1451

³ Landerl K, Bevan A, Butterworth B. Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: a study of 8-9-year-old students. Cognition. 2004;93(2):99-125

⁴ Butterworth B, Kovas Y. Understanding neurocognitive developmental disorders can improve education for all. Science. 2013;340(6130):300-305

⁵ Gabrieli JDE. Dyslexia: a new synergy between education and cognitive neuroscience. Science. 2009;325(5938):280-283

⁶ Moll K, Kunze S, Neuhoﬀ N, Bruder J, Schulte-Körne G. Specific learning

disorder: prevalence and gender differences. PLoS One. 2014;9(7):e103537

⁷ Landerl K, Moll K. Comorbidity of learning disorders: prevalence and familial transmission. J Child Psychol Psychiatry. 2010;51(3):287-294

⁸ Morgan WP. A Case of Congenital Word Blindness. Br Med J. 1896;2(1871):1378

⁹ Davis OSP, Band G, Pirinen M, et al. The correlation between reading and mathematics ability at age twelve has a substantial genetic component. Nat Commun. 2014;5:4204

¹⁰ Scerri TS, Schulte-Körne G. Genetics of developmental dyslexia. Eur Child Adolesc Psychiatry. 2010;19(3):179-197

¹¹ Schulte-Körne G, Bruder J. Clinical neurophysiology of visual and auditory processing in dyslexia: a review. Clin Neurophysiol. 2010;121(11):1794-1809

unterschiedlicher Bedeutung, die einzeln nur eine geringe Auswirkung haben, summiert sich auf¹⁰. Dazu gesellen sich Umweltfaktoren, wie die Umgebung, in der die Kinder aufwachsen¹¹. Liegt eine genetische Prädisposition vor, können Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel ein geringeres Geburtsgewicht, ein geringer sozioökonomischer Status sowie geringe sprachliche Förderung das Erkrankungsrisiko erhöhen^{11,12}.

Spurensuche im Gehirn

Sicher ist allerdings: Lernstörungen wie Lese-, Rechtschreib- und Rechenschwäche machen sich als Auffälligkeiten im Gehirn bemerkbar, die sich beispielsweise mithilfe bildgebender Verfahren wie der Magnetresonanztomografie (MRT) nachweisen lassen. Allerdings widmet sich ein Gutteil der MRT-Studien, die bislang publiziert wurden, Gehirnen von älteren Schulkindern oder sogar von Erwachsenen, also von Probanden, bei denen sich eine Lernstörung bereits manifestiert hat. Das schränkt die Aussagekraft dieser Ergebnisse in Bezug auf die neurobiologischen Wurzeln der Störung ein, kritisiert ein internationales Wissenschaftlerteam um Elizabeth Norton von der Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, in einem aktuellen Übersichtartikel¹³. So weiß man, dass Lesenlernen massive Veränderungen in verschiedenen Bereichen des Gehirns nach sich zieht, die mit dieser Fähigkeit im Zusammenhang stehen¹⁴. Vergleicht man nun etwa Schüler oder Erwachsene, die lesen können, mit Individuen, die eine Lesestörung haben, ist unklar, welche neuroanatomischen Unterschiede des Gehirns ursächlich sind, und welche überwiegend von mangelnder Lesepraxis herrühren^{14,15}.

Vor diesem Hintergrund hat Vandermosten von der Universität Leuven in einer Meta-Analyse 16 MRT-

Studien unter die Lupe genommen, die sich explizit dem Gehirn von Vorschulkindern widmen¹³. Kinder, in deren Familie bereits eine Lesestörung bei nahen Verwandten festgestellt wurde, haben selbst ein erhöhtes Risiko für die Lernstörung. Daher ist es möglich, gefährdete Kinder mit Kontrollgruppen ohne familiäre Vorbelastung zu vergleichen. Tatsächlich haben solche Vergleichsstudien mit Kindergartenkindern Hinweise auf strukturelle und funktionelle Unterschiede aufgezeigt¹³.

Bereits vor einigen Jahren erkannten Wissenschaftler um Nadine Gaab, Kognitionswissenschaftlerin an der Harvard Medical School, dass Gehirne von Kindern, die später eine Dyslexie entwickeln, strukturelle Besonderheiten im Denkorgan aufweisen^{16,17}. In einer neueren Studie beschrieb das Team zudem große Unterschiede in der Entwicklung der grauen Substanz in weiten Teilen des Gehirns, die sich bereits bei Fünfjährigen nachweisen lassen¹⁸. Solche frühen Abweichungen vom regulären Reifungsprozess des Gehirns sind ein Beweis dafür, dass das Lesedefizit nicht auf mangelnde Übung, sondern auf eine Entwicklungsstörung des Gehirns zurückzuführen ist.

Eine Gruppe von Wissenschaftlern der University of Oregon in Eugene, Oregon, USA, mithilfe funktioneller MRT (fMRT) die Gehirne von insgesamt 18 Vorschulkindern – darunter 7 mit Risiko für eine Lesestörung –, während diese Buchstaben und buchstabenähnliche Zeichen im Scanner präsentiert bekamen¹⁹. Bei Kindern ohne ein Risiko fand sich im Bereich des linken und rechten seitlichen Schläfenlappen eine deutliche Aktivierung, die nach Teilnahme am üblichen Vorschulprogramm des Kindergartens in der linken Hemisphäre noch signifikant zunahm. Bei Kindern mit Risiko für eine Lesestörung war diese Region in beiden Hirnhälften deutlich geringer

¹² Mascheretti S, Bureau A, Trezzi V, Giorda R, Marino C. An assessment of gene-by-gene interactions as a tool to unfold missing heritability in dyslexia. *Hum Genet.* 2015;134(7):749-760

¹³ Vandermosten M, Hoeft F, Norton ES. Integrating MRI brain imaging studies of pre-reading children with current theories of developmental dyslexia: A review and quantitative meta-analysis. *Curr Opin Behav Sci.* 2016;10:155-161

¹⁴ Dehaene S, Cohen L, Morais J, Kolinsky R. Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nat Rev Neurosci.* 2015;16(4):234-244

¹⁵ Hoeft F, Meyler A, Hernandez A, et al. Functional and morphometric brain dissociation between dyslexia and reading ability. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2007;104(10):4234-4239

¹⁶ Raschle NM, Chang M, Gaab N. Structural brain alterations associated with dyslexia predate reading onset. *Neuroimage.* 2011;57(3):742-749.

¹⁷ Raschle NM, Zuk J, Gaab N. Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012;109(6):2156-2161.

¹⁸ Raschle NM, Becker BLC, Smith S, Fehlbauer LV, Wang Y, Gaab N. Investigating the Influences of Language Delay and/or Familial Risk for Dyslexia on Brain Structure in 5-Year-Olds. *Cereb Cortex.* November 2015.

¹⁹ Yamada Y, Stevens C, Dow M, Harn BA, Chard DJ, Neville HJ. Emergence of the neural network for reading in five-year-old beginning readers of different levels of pre-literacy abilities: an fMRI study. *Neuroimage.* 2011;57(3):704-713

aktiviert. Und selbst nachdem die Kinder ein zusätzliches spezielles Erstlese-Training absolviert hatten, ließ sich keine Aktivitätszunahme im linken Parietalbereich beobachten. Vermutlich geht die Lesefähigkeit – ähnlich wie man es auch von der Sprachfähigkeit kennt – mit einer Lateralisierung einher. Diese ist bei Kindern mit einer Lesestörung geringer ausgeprägt. Stattdessen versuchen die Gehirne der Betroffenen möglicherweise vorhandene Defizite durch Aktivieren zusätzlicher Regionen zu kompensieren. So zeigte sich in der Studie eine deutliche Aktivierung im Bereich des Frontalhirns, die bei gesunden Kindern so nicht beobachtet wurde. Diese Abweichung lässt sich als Ausdruck eines gestörten Entwicklungsprozesses interpretieren.

Auch aktuelle Ergebnisse eines Teams um Gaab²⁰ weisen in diese Richtung. Die Forscher hatten die Entwicklung der weißen Substanz im Gehirn von Kindern über einen längeren Zeitraum beobachtet – von einem Zeitpunkt, zu dem noch keiner der kleinen Probanden lesen konnte, bis zu einem Alter, in dem die meisten bereits flüssige Leser waren. Dabei entdeckten sie bei Kindern mit Lesestörung eine atypische Lateralisierung des Fasciculus arcuatus, der Nervenverbindung zwischen dem Wernicke-Areal und dem Broca-Areals, zwei wichtigen Sprachzentren des Gehirns – und zwar bereits vor dem typischen Lesesalter. Bereits in einer vorhergehenden Studie hatten Forscher um Gaab festgestellt, dass diese Verbindung bei Individuen mit Lesestörung bereits im Kindergarten eine geringere Linksasymmetrie aufweist als bei normalen Lesern²¹. Während des Lesenlernens entwickelte sich die weiße Substanz von Kindern ohne Störung in diesem Bereich schneller als bei Kindern mit Leseschwäche. Eine weitere Auffälligkeit entdeckten die Wissenschaftler im Gehirn der Kinder, die trotz Störung später in Sachen Lesefähigkeiten etwa aufholen konnten:

Statt einer typischen linksseitigen Asymmetrie beobachteten die Wissenschaftler bei diesen Probanden eine starke rechtsseitige Zunahme an weißer Masse, was einen Kompensationsmechanismus nahelegt.

Insgesamt, so folgern Norton und ihre Kollegen, unterstützen die Ergebnisse der Meta-Analyse zwei gängige und anerkannte Hypothesen zum Entstehen einer Lesestörung. Demnach kann sie zum einen durch phonologische Defizite, also Schwierigkeiten bei der Wahrnehmung und Unterscheidung von Lauten und bei der Buchstaben-Laut-Zuordnung entstehen. Zum anderen spielen Probleme bei der Verarbeitung der Schriftsprache eine Rolle. Gemeint ist damit, dass beispielsweise Buchstaben zwar als einzelne erkannt werden. Die Buchstaben beim Lesen zu einem sinnvollen Wort zusammenzufügen und als solches zu verarbeiten, bereitet den Betroffenen jedoch immense Schwierigkeiten.

Für die Theorie der phonologischen Defizite sprechen zusätzlich zu den vielen Studien, die auf Verhaltensebene große Unterschiede von Vorschul- bis ins Erwachsenenalter bei Menschen mit einer Lesestörung beschrieben haben, eine Reihe neurobiologischer Befunde^{22,23}, die funktionelle Auffälligkeiten betreffen. So ist bei Kindern mit einem Risiko für eine Lesestörung die linke Temporoparietalregion weniger aktiv¹⁹. Außerdem haben Wissenschaftler auch Abweichungen im Volumen der grauen²⁴ und in der Zusammensetzung der Nervenverbindungen der weißen²⁵ Masse in diesem Gehirnareal beobachtet. Die linke Temporoparietalregion ist sowohl für die allgemeine Sprachverarbeitung zuständig ist, als auch dafür, visuelle Reize, also Buchstaben, in Laute umzuwandeln – eine Fähigkeit die für das Lesenlernen unabdingbar ist. Daher liegt es nahe, dass diese Befunde bei den betroffenen Kindern in ursächlichem Zusammenhang mit der Lesestörung

²⁰ Wang Y, Mauer M V, Raney T, et al. Development of Tract-Specific White Matter Pathways During Early Reading Development in At-Risk Children and Typical Controls. *Cereb Cortex*. April 2016. doi:10.1093/cercor/bhw095.

²¹ Langer N, Peysakhovich B, Zuk J, et al. White Matter Alterations in Infants at Risk for Developmental Dyslexia. *Cereb Cortex*. December 2015. doi:10.1093/cercor/bhw281.

²² Ramus F. Neuroimaging sheds new light on the phonological deficit in dyslexia. *Trends Cogn Sci*. 2014;18(6):274-275

²³ Raschle NM, Stering PL, Meissner SN, Gaab N. Altered neuronal

response during rapid auditory processing and its relation to phonological processing in prereading children at familial risk for dyslexia. *Cereb Cortex*. 2014;24(9):2489-2501.

²⁴ Richlan F, Kronbichler M, Wimmer H. Structural abnormalities in the dyslexic brain: a meta-analysis of voxel-based morphometry studies. *Hum Brain Mapp*. 2013;34(11):3055-3065

²⁵ Vandermosten M, Boets B, Wouters J, Ghesquière P. A qualitative and quantitative review of diffusion tensor imaging studies in reading and dyslexia. *Neurosci Biobehav Rev*. 2012;36(6):1532-1552

stehen. Allerdings bestätigen nicht alle Studien derartige Auffälligkeiten in der Temporoparietalregion. Möglicherweise, so folgern Norton und ihre Kollegen, muss dieses Gehirnnareal nicht zwingend selbst verändert sein. Auch eine anormale strukturelle und funktionelle Verknüpfung der Temporoparietalregion mit anderen Gehirnnarealen, die für das Lesen eine Rolle spielen, könnten phonologischen Schwierigkeiten und damit Lese- und Rechtschreibstörungen nach sich ziehen¹³.

Für die Theorie der orthographischen Defizite, also der Schwierigkeiten beim Erkennen und Verarbeiten von Buchstaben, Buchstabenkombinationen und sinnvoller Wörter sprechen laut Norton und Kollegen insbesondere Auffälligkeiten in einer Region des okzipito-temporalen Lappens der linken Hemisphäre, der sogenannten visuellen Wortform-Areal, die zum Gyrus fusiformis gehört, die beim Erkennen von Objekten und Objektkategorien eine wichtige Rolle innehat.

Auch bei Kindern mit einer Rechenstörung haben Wissenschaftler neuroanatomische und funktionelle Auffälligkeiten ausgemacht. Der britische Neurowissenschaftler Butterworth beschreibt in einem Übersichtsartikel, dass bei Kindern mit einer Rechenstörung der intraparietale Sulcus, der im oberen Teil des Gehirns liegt und mit der Größen- und Mengenrepräsentation in Verbindung gebracht wird, weniger aktiv ist und eine reduzierte graue Masse aufweist²⁶. Außerdem ist die Verknüpfung zwischen dieser Hirnregion und anderen Arealen, die für das Rechnen und Verarbeiten von Zahlen wichtig sind, bei Kindern mit Dyskalkulie beeinträchtigt²⁶.

Eine aktuelle Studie eines internationalen Forscherteams aus dem Jahr 2016 zeigt außerdem, dass unterschiedliche mathematische Fähigkeiten mit Akti-

vierungen im linken perisylvischen Cortex einhergehen, einer Hirnregion, die unter anderem für das Benennen von Ziffern und mathematischen Symbolen von Bedeutung ist. Demnach wirkt sich bei Schulkindern ein spezielles Mathetraining auf die Nervenzellverknüpfungen in diesem Bereich aus – in Abhängigkeit davon, wie stark sie ihre Fähigkeiten verbessern konnten²⁷.

Früherkennung: Chancen und Grenzen

Entscheidend ist nach Ansicht von Norton und Kollegen, dass die Auffälligkeiten im Gehirn von Kindern mit einer Lernstörung vorhanden sind, lange bevor sich beispielsweise eine Lesestörung bemerkbar macht. Es sei daher sinnlos abzuwarten, bis in der Schule Schwierigkeiten auftreten und zu hoffen, dass sich diese wieder von selbst auflösen¹³. Ganz in diesem Sinne hat eine Metaanalyse aus dem Jahr 2007 ergeben, dass Interventionsprogramme, die die Lesefertigkeiten betroffener Kinder verbessern sollen, den größten Erfolg versprechen, wenn sie möglichst intensiv und bereits im ersten Schuljahr zur Anwendung kommen – auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch keine eindeutige Diagnose einer Lernstörung möglich ist^{28,29}.

Tatsächlich legen einige Studien nahe, dass eine Vorhersage von Lesestörung auf der Grundlage von bildgebenden Verfahren denkbar ist^{29,30,31,32}. Eine Gruppe US-Wissenschaftler um die Harvard-Forscherin Nadine Gaab gibt in einem aktuellen Übersichtsartikel jedoch zu bedenken, dass Abweichungen, die sich im MRT zeigen, derzeit nicht als Biomarker zur Frühdiagnose von Lesestörung gelten können²⁹. Auch das Team um Norton bekräftigt, dass weitere Studien notwendig sein werden, um für die Zukunft geeignete Biomarker zu finden und Methoden zu entwickeln, die eine zuverlässige und gleichzeitig kosteneffiziente Frühdiagnose erlauben.

²⁶ Butterworth B, Varma S, Laurillard D. Dyscalculia: from brain to education. *Science*. 2011;332(6033):1049-1053

²⁷ Jolles D, Wassermann D, Chokhani R, et al. Plasticity of left perisylvian white-matter tracts is associated with individual differences in math learning. *Brain Struct Funct*. 2016;221(3):1337-1351

²⁸ Wanzek J, Vaughn S. Research-Based Implications from Extensive Early Reading Interventions. *School Psych Rev*. 2006;36(4):541-561

²⁹ Ozernov-Palchik O, Yu X, Wang Y, Gaab N. Lessons to be learned: how a comprehensive neurobiological framework of atypical reading development can inform educational practice. *Curr Opin Behav Sci*. 2016;10:45-58

³⁰ Ozernov-Palchik O, Gaab N. Tackling the "dyslexia paradox": reading brain and behavior for early markers of developmental dyslexia. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*. 7(2):156-176

³¹ Hoeft F, McCandliss BD, Black JM, et al. Neural systems predicting long-term outcome in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2011;108(1):361-366

³² Bach S, Richardson U, Brandeis D, Martin E, Brem S. Print-specific multimodal brain activation in kindergarten improves prediction of reading skills in second grade. *Bach, S., Richardson, U., Brandeis, D., Martin, E., & Brem, S. (2013). Print-specific multimodal brain activation in kindergarten improves pre. Neuroimage*. 2013;82:605-615

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Studie der Kognitionswissenschaftlerinnen Jessica Cantlon und Rosa Li von der University of Rochester in New York^{33,34}. Die Forscherinnen kritisieren, dass ein Großteil der neurowissenschaftlichen Studien zur Hirnanatomie und -aktivität bei Lese- und Rechenprozessen in eher artifiziellen Situationen durchgeführt werden. Die Probanden reagieren nur auf einzelne Stimuli, die keineswegs den komplexen Rechen- und Leseprozessen entsprechen und auch wenig mit den Alltagsanforderungen der Kinder gemein haben. In ihrer Studie verglichen sie per fMRT die Gehirnaktivität von 27 Kindern im Alter von vier bis elf sowie von 20 Erwachsenen, während diese 20-minütige Episoden aus der Kindersendung *Sesamestraße* mit spezifischen Lerninhalten unter anderem zum Zahlenverständnis, Mengen und Buchstaben anschauten. Cantlon und Li erkannten: Je mehr die Gehirnaktivität der Kinder während des Filmschauens der von erwachsenen Probanden ähnelte, desto besser schnitten sie in Intelligenztests ab. Insbesondere lieferte die Reife des intraparietalen Sulcus einen deutlichen Hinweis auf die mathematischen Fähigkeiten der Kinder. Die Entwicklung des Broca-Areals, eines der wichtigsten Sprachzentren des Gehirns, ließ auf ihre sprachlichen Kompetenzen schließen. Vor dem Hintergrund ihrer Untersuchung fordern die Forscherinnen, dass Hirnforschungsstudien zu kognitiven Fähigkeiten aber auch zu Lernstörungen künftig viel stärker in einem natürlichen Kontext durchgeführt werden müssen.

Neurowissenschaft als Wegweiser für den Förderunterricht der Zukunft?

Sicher ist: Kinder mit spezifischen Lernstörungen haben bereits früh erhebliche Schwierigkeiten beim Lesen-, Rechtschreiben- und Rechnenlernen, und

ohne geeignete Fördermaßnahmen wird diese Lücke mit der Zeit immer größer^{35,36,37}. Doch welche Konsequenzen lassen sich nun für die künftige Förderung betroffener Kinder mit diesen Lernstörungen ziehen? Bergen neurowissenschaftliche Erkenntnisse hier tatsächlich den Schlüssel zum Erfolg³⁶? Tatsächlich widmete sich in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Studien dieser Frage – mit unterschiedlichen Ergebnissen²⁹.

So zeigte sich auf der Verhaltensebene, dass betroffene Kinder durchaus von Trainingsprogrammen profitieren können – allerdings längst nicht alle^{35,36}. Manche Kinder steigern ihre Fähigkeiten durch gezielte Förderung, andere nicht. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in neurokognitiven Untersuchungen wieder. In einer ganzen Reihe von Studien beobachteten Wissenschaftler, dass sich die Aktivität in Gehirnregionen, deren Funktion bei Kindern und Erwachsenen mit einer Lesestörung typischerweise vermindert ist, verbessert^{38,39,40,41}. Allerdings gab es auch Hinweise auf veränderte Hirnaktivitäten in anderen Arealen, die vermutlich dazu dienten, vorhandene Defizite zu kompensieren und daher keine ursächliche Verbesserung der Problematik bedeuteten^{38,39}. Zumindest eine Studie deutet darauf hin, dass diese kompensatorischen Veränderungen im Gehirn damit einhergingen, dass die betroffenen Probanden keine Verbesserung in ihren Lesefähigkeiten erzielen konnten³⁹.

Untersuchungen im Bereich der Rechenstörung zeigen ein ähnliches Bild: Zwar gehen gezielte Trainingsmaßnahmen bei einigen Probanden mit einer Zunahme der Gehirnaktivität in den Regionen einher, die typischerweise betroffen sind, etwa dem intraparietalen Sulcus⁴². Allerdings ist auch hier der

³³ Cantlon JF, Li R. Neural activity during natural viewing of Sesame Street statistically predicts test scores in early childhood. *PLoS Biol.* 2013;11(1):e1001462

³⁴ Weaver J. Sesame street provides lessons about natural brain development in children. *PLoS Biol.* 2013;11(1):e1001463

³⁵ Ise E, Dollé K, Pixner S, Schulte-Körne G. Effektive Förderung rechenschwacher Kinder. *Kindheit und Entwicklung.* 2012;21(3):181-192

³⁶ Galuschka K, Ise E, Krick K, Schulte-Körne G. Effectiveness of treatment approaches for children and adolescents with reading disabilities: a meta-analysis of randomized controlled trials. *PLoS One.* 2014;9(2):e89900

³⁷ Barquero LA, Davis N, Cutting LE. Neuroimaging of reading intervention: a systematic review and activation likelihood estimate meta-analysis. *PLoS One.* 2014;9(1):e83668

³⁸ Eden GF, Jones KM, Cappell K, et al. Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. *Neuron.* 2004;44(3):411-422

³⁹ Meyler A, Keller TA, Cherkassky VL, Gabrieli JDE, Just MA. Modifying the brain activation of poor readers during sentence comprehension with extended remedial instruction: a longitudinal study of neuroplasticity. *Neuropsychologia.* 2008;46(10):2580-2592

⁴⁰ Temple E, Deutsch GK, Poldrack RA, et al. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2003;100(5):2860-2865

⁴¹ Shaywitz BA, Shaywitz SE, Blachman BA, et al. Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biol Psychiatry.* 2004;55(9):926-933

⁴² Iuculano T, Rosenberg-Lee M, Richardson J, et al. Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in

Fördereffekt bei einzelnen Kindern sehr unterschiedlich⁴³. Mehr noch: Eine Gruppe von US-Wissenschaftlern fand heraus, dass nicht unbedingt die Gehirnnareale, die direkt mit mathematischen Fähigkeiten im Zusammenhang stehen, über den Erfolg einer Fördermaßnahme entscheiden. Eine wichtige Rolle spielten dabei vielmehr Regionen, die für das Lernen und das Arbeitsgedächtnis im Allgemeinen relevant sind⁴³.

Interessant sind Studien, in denen Wissenschaftler versuchen, Kinder mit Rechenstörung per transkranieller Gleichstromstimulation beim Rechnen zu unterstützen. Dabei handelt es sich um ein nichtinvasives, unspezifisches Verfahren, bei dem über Elektroden an der Kopfhaut Gleichstrom in das Gehirn fließt und so die neuronale Aktivität anregen kann. Tatsächlich ließ sich bei behandelten Probanden – sowohl bei Personen mit Rechenstörung als auch bei solchen, die aufgrund eines Schlaganfalls ihre mathematischen Fähigkeiten eingebüßt hatten – auf diese Weise die Leistung in diesem Bereich verbessern^{44,45,46}. Die Verbesserung war nachhaltig und noch sechs Monate nach der Stimulation nachweisbar⁴³.

Butterworth merkt jedoch an, dass noch lange nicht geklärt ist, ob Fördermaßnahmen – welcher Art auch immer und auch wenn sie früh angesetzt werden – betroffene Kinder zu normalen mathematischen Fähigkeiten heranführen können. Vielmehr geht er davon aus, dass sich bei der Rechenstörung, ähnlich wie bei der Lese- und Rechtschreibstörung, zwar eine gewisse Verbesserung erzielen lässt. Das Niveau nicht betroffener Klassenkameraden werden Kinder mit einer Rechenstörung jedoch sehr wahrscheinlich nicht erreichen²⁶. Zudem merkt er an, dass sich eventuelle Lernerfolge eher auf das vermehrte Üben bestimmter Aufgaben zurückführen lässt, denn auf eine Verbesserung der grundlegenden Fähigkeiten.

Ganz in diesem Sinne warnen Harvard-Forscherin Nadine Gaab und ihre Kollegen davor, neurowissenschaftliche Erkenntnisse im Hinblick auf die Praxis überzubewerten²⁹. Nicht alles, was Wissenschaftler in bildgebenden Verfahren sehen und nicht jede Interpretation von Momentaufnahmen im Gehirn lässt sich direkt auf die Funktion und insbesondere das Verhalten übertragen.

Das Forscherteam betont außerdem, dass Interventionen von sehr unterschiedlichem Erfolg gekrönt sind, und dass insbesondere Kinder mit veränderten Hirnfunktionen, die häufig bei einer Lesestörung gefunden werden, am ehesten von Fördermaßnahmen profitieren^{29,37}. Gehirne sind individuell sehr verschieden und daher auch die neuroanatomischen und funktionalen Besonderheiten des Einzelnen, die zu einer der spezifischen Lernstörungen führen. Auch Brian Butterworth warnt in diesem Zusammenhang davor, Lernstörungen nach dem Prinzip „One fits all“ zu begegnen⁴⁷.

Noch ist es zu früh, um von den neurowissenschaftlichen Erkenntnissen im Bereich der Lese-, Rechtschreib- und Rechenstörung den Königsweg für die Förderung betroffener Kinder abzuleiten. Dennoch sind sie von großer Bedeutung, denn die nachgewiesenen Veränderungen im Gehirn zeigen deutlich, dass es sich bei diesen Lernstörungen um eine ernstzunehmende Problematik handelt, die im Gehirn der Betroffenen verankert ist. Und sie stellen klar, dass Kinder mit Lese-, Rechtschreib- und Rechenstörung keine Chance haben, adäquate Fähigkeiten im Lesen und Schreiben beziehungsweise in Mathematik zu erlangen, wenn sie in diesen Fächern nicht frühzeitig speziell gefördert werden. Es besteht Hoffnung, dass weiterführende Studien aufzeigen werden, wie spezifische und wirksame Förderung in Zukunft aussehen kann.

children with mathematical learning disabilities. *Nat Commun.* 2015;6:8453

⁴³ Supekar K, Swigart AG, Tenison C, et al. Neural predictors of individual differences in response to math tutoring in primary-grade school children. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(20):8230-8235

⁴⁴ Cohen Kadosh R, Soskic S, Iuculano T, Kanai R, Walsh V. Modulating neuronal activity produces specific and long-lasting changes in numerical competence. *Curr Biol.* 2010;20(22):2016-2020

⁴⁵ Cohen Kadosh R, Dowker A, Heine A, Kaufmann L, Kucian K. Interventions for improving numerical abilities: Present and future. *Trends Neurosci Educ.* 2013;2(2):85-93

⁴⁶ Hauser TU, Rotzer S, Grabner RH, Mérellat S, Jäncke L. Enhancing performance in numerical magnitude processing and mental arithmetic using transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Front Hum Neurosci.* 2013;7:244

⁴⁷ Pers. Kommunikation

Literaturempfehlungen

Wie kann die Entstehung von Legasthenie und Dyskalkulie verhindert bzw. verringert werden?

Wir haben drei Experten, die die verschiedenen Lernstörungen untersuchen, gefragt, welche 30 neurowissenschaftlichen Publikationen sie für die wichtigsten halten, um obige Frage beantworten zu können.

Unter Neurowissenschaften verstehen wir die naturwissenschaftliche Erforschung des Gehirns unter Einsatz technischer Methoden, die den Aufbau oder die Funktionsweise von Nervenzellen, Nervenzellverbänden oder des gesamten Organs erfassen.

Prof. emer. Brian Butterworth, Ass. Prof. Dr. Nadine Gaab und Prof. Dr. Gerd Schulte-Körne haben uns bei unserem Projekt unterstützt und ihre Literaturempfehlungen zum Thema zusammengestellt.

1.

Brian Butterworth ist Professor emeritus für kognitive Neuropsychologie am Institut für Kognitive Neurowissenschaften des University College London, UK, Adjunct Professor an der National Cheng Chi Universität, Taiwan, Professorial Fellow an der Melbourne Universität, AUS, und seit 2002 Fellow der British Academy. Als Initiator und Gründungsdirektor hat er das London Centre for Educational Neuroscience ins Leben gerufen. Schwerpunkt seiner Arbeit sind neurowissenschaftliche und genetische Aspekte mathematischer Fähigkeiten und Unzulänglichkeiten. (www.mathematical-brain.com).

Butterworth B, Varma S, Laurillard D. Dyscalculia: from brain to education. Science. 2011;332(6033):1049-1053.

Cohen Kadosh R, Soskic S, Iuculano T, Kanai R, Walsh V. Modulating neuronal activity produces specific and long-lasting changes in numerical competence. Curr Biol. 2010;20(22):2016-2020.

Eden GF, Jones KM, Cappell K, et al. Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. Neuron. 2004;44(3):411-422.

Gabrieli JDE. Dyslexia: a new synergy between education and cognitive neuroscience. Science. 2009;325(5938):280-283.

Hoeft F, McCandliss BD, Black JM, et al. Neural systems predicting long-term outcome in dyslexia. Proc Natl Acad Sci U S A. 2011;108(1):361-366.

Iuculano T, Rosenberg-Lee M, Richardson J, et al. Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities. Nat Commun. 2015;6:8453.

Supekar K, Swigart AG, Tenison C, et al. Neural predictors of individual differences in response to math tutoring in primary-grade school children. Proc Natl Acad Sci U S A. 2013;110(20):8230-8235.

2.

Nadine Gaab ist seit 2007 Associate Professor für Kinderheilkunde am Boston Children's Hospital und der Harvard Medical School und Fakultätsmitglied an der Harvard Graduate School of Education. Das Gaablab arbeitet u.a. an der Identifizierung möglicher neuronaler Pre-Marker von Lernstörungen wie Legasthenie bereits vor Lesebeginn, aber auch schon im Säuglingsalter, und an der Identifizierung des zugrunde liegenden neuronalen Mechanismus der Komorbidität von Entwicklungsstörungen wie Legasthenie und ADHS. Dabei kommen vor allem strukturelle und funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) in pädiatrischen Populationen von Geburt bis zum Jugendalter zum Einsatz (www.gaablab.com).

- Bach S, Richardson U, Brandeis D, Martin E, Brem S. Print-specific multimodal brain activation in kindergarten improves prediction of reading skills in second grade. *Bach, S., Richardson, U., Brandeis, D., Martin, E., & Brem, S. (2013). Print-specific multimodal brain activation in kindergarten improves pre. Neuroimage. 2013;82:605-615.*
- Butterworth B, Varma S, Laurillard D. Dyscalculia: from brain to education. *Science. 2011;332(6033):1049-1053.*
- Clark KA, Helland T, Specht K, et al. Neuroanatomical precursors of dyslexia identified from pre-reading through to age 11. *Brain. 2014;137(Pt 12):3136-3141.*
- Guttorm TK, Leppänen PHT, Hämäläinen JA, Eklund KM, Lyytinen HJ. Newborn event-related potentials predict poorer pre-reading skills in children at risk for dyslexia. *J Learn Disabil. 43(5):391-401.*
- Hornickel J, Kraus N. Unstable representation of sound: a biological marker of dyslexia. *J Neurosci. 2013;33(8):3500-3504.*
- Houdé O, Rossi S, Lubin A, Joliot M. Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: an fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children. *Dev Sci. 2010;13(6):876-885.*
- Im K, Raschle NM, Smith SA, Ellen Grant P, Gaab N. Atypical Sulcal Pattern in Children with Developmental Dyslexia and At-Risk Kindergarten. *Cereb Cortex. 2016;26(3):1138-1148.*
- Jolles D, Ashkenazi S, Kochalka J, et al. Parietal hyper-connectivity, aberrant brain organization, and circuit-based biomarkers in children with mathematical disabilities. *Dev Sci. 2016;19(4):613-631.*
- Langer N, Peysakhovich B, Zuk J, et al. White Matter Alterations in Infants at Risk for Developmental Dyslexia. *Cereb Cortex. December 2015. doi: 10.1093/cercor/bhv281.*
- Linkersdörfer J, Jurcoane A, Lindberg S, et al. The association between gray matter volume and reading proficiency: a longitudinal study of beginning readers. *J Cogn Neurosci. 2015;27(2):308-318.*
- Lyytinen H, Guttorm TK, Huttunen T, Hämäläinen J, Leppänen PHT, Vesterinen M. Psychophysiology of developmental dyslexia: a review of findings including studies of children at risk for dyslexia. *J Neurolinguistics. 2005;18(2):167-195.*
- Matejko AA, Ansari D. Trajectories of Symbolic and Nonsymbolic Magnitude Processing in the First Year of Formal Schooling. *PLoS One. 2016;11(3):e0149863.*
- Maurer U, Bucher K, Brem S, et al. Neurophysiology in preschool improves behavioral prediction of reading ability throughout primary school. *Biol Psychiatry. 2009;66(4):341-348.*
- Maurer U, Schulz E, Brem S, et al. The development of print tuning in children with dyslexia: evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI. *Neuroimage. 2011;57(3):714-722.*
- Molfese DL. Predicting dyslexia at 8 years of age using neonatal brain responses. *Brain Lang. 2000;72(3):238-245.*
- Molfese DL, Molfese VJ, Key S, Modglin A, Kelley S, Terrell S. Reading and cognitive abilities: longitudinal studies of brain and behavior changes in young children. *Ann Dyslexia 2002;52:99-119.*
- Molfese VJ, Molfese DL, Modgline AA. Newborn and preschool predictors of second-grade reading scores: an evaluation of categorical and continuous scores. *J Learn Disabil. 2001;34(6):545-554.*
- Price GR, Mazzocco MMM, Ansari D. Why mental arithmetic counts: brain activation during single digit arithmetic predicts high school math scores. *J Neurosci. 2013;33(1):156-163.*
- Raschle NM, Stering PL, Meissner SN, Gaab N. Altered neuronal response during rapid auditory processing and its relation to phonological processing in prereading children at familial risk for dyslexia. *Cereb Cortex. 2014;24(9):2489-2501.*

Raschle NM, Becker BLC, Smith S, Fehlbaum LV, Wang Y, Gaab N. Investigating the Influences of Language Delay and/or Familial Risk for Dyslexia on Brain Structure in 5-Year-Olds. *Cereb Cortex*. November 2015. doi: 10.1093/cercor/bhv267

Raschle NM, Chang M, Gaab N. Structural brain alterations associated with dyslexia predate reading onset. *Neuroimage*. 2011;57(3):742-749.

Raschle NM, Zuk J, Gaab N. Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2012;109(6):2156-2161.

Rosenberg-Lee M, Barth M, Menon V. What difference does a year of schooling make? Maturation of brain response and connectivity between 2nd and 3rd grades during arithmetic problem solving. *Neuroimage*. 2011;57(3):796-808.

Saygin ZM, Norton ES, Osher DE, et al. Tracking the roots of reading ability: white matter volume and integrity correlate with phonological awareness in prereading and early-reading kindergarten children. *J Neurosci*. 2013;33(33):13251-13258.

Specht K, Hugdahl K, Ofte S, et al. Brain activation on pre-reading tasks reveals at-risk status for dyslexia in 6-year-old children. *Scand J Psychol*. 2009;50(1):79-91.

van der Leij A, van Bergen E, van Zuijlen T, de Jong P, Maurits N, Maassen B. Precursors of developmental dyslexia: an overview of the longitudinal Dutch Dyslexia Programme study. *Dyslexia*. 2013;19(4):191-213.

van Zuijlen TL, Plakas A, Maassen BAM, et al. Temporal auditory processing at 17 months of age is associated with preliterate language comprehension and later word reading fluency: an ERP study. *Neurosci Lett*. 2012;528(1):31-35.

Vandermosten M, Vanderauwera J, Theys C, et al. A DTI tractography study in pre-readers at risk for dyslexia. *Dev Cogn Neurosci*. 2015;14:8-15.

Wang Y, Mauer M V, Raney T, et al. Development of Tract-Specific White Matter Pathways During Early

Reading Development in At-Risk Children and Typical Controls. *Cereb Cortex*. April 2016.

Yamada Y, Stevens C, Dow M, Harn BA, Chard DJ, Neville HJ. Emergence of the neural network for reading in five-year-old beginning readers of different levels of pre-literacy abilities: an fMRI study. *Neuroimage*. 2011;57(3):704-713.

3.

*Prof. Gerd **Schulte-Körne** ist Facharzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie und -psychotherapie und er vertritt dieses Fach in Lehre, Forschung und Krankenversorgung als Lehrstuhlinhaber und Direktor der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie der LMU München. Seine wissenschaftlichen Schwerpunkte sind Ursachenforschung, Prävention und Therapieentwicklung und -evaluation bei schulischen Entwicklungsstörungen und depressive Störungen bei Kindern und Jugendlichen, seine Forschung zur Legasthenie wurde mit dem August Homburger Preis 2007 und dem Hermann-Emminghaus Preis 2009 ausgezeichnet.*

Butterworth B, Kovas Y. Understanding neurocognitive developmental disorders can improve education for all. *Science*. 2013;340(6130):300-305.

Butterworth B, Varma S, Laurillard D. Dyscalculia: from brain to education. *Science*. 2011;332(6033):1049-1053.

Cohen Kadosh R, Dowker A, Heine A, Kaufmann L, Kucian K. Interventions for improving numerical abilities: Present and future. *Trends Neurosci Educ*. 2013;2(2):85-93.

Hasko S, Groth K, Bruder J, Bartling J, Schulte-Körne G. What does the brain of children with developmental dyslexia tell us about reading improvement? ERP evidence from an intervention study. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:441.

- Hauser TU, Rotzer S, Grabner RH, Mérillat S, Jäncke L. Enhancing performance in numerical magnitude processing and mental arithmetic using transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Front Hum Neurosci.* 2013;7:244.
- Heim S, Pape-Neumann J, van Ermingen-Marbach M, Brinkhaus M, Grande M. Shared vs. specific brain activation changes in dyslexia after training of phonology, attention, or reading. *Brain Struct Funct.* 2015;220(4):2191-2207.
- Horowitz-Kraus T, DiFrancesco M, Kay B, Wang Y, Holland SK. Increased resting-state functional connectivity of visual- and cognitive-control brain networks after training in children with reading difficulties. *NeuroImage Clin.* 2015;8:619-630.
- Iuculano T, Rosenberg-Lee M, Richardson J, et al. Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities. *Nat Commun.* 2015;6:8453.
- Jolles D, Wassermann D, Chokhani R, et al. Plasticity of left perisylvian white-matter tracts is associated with individual differences in math learning. *Brain Struct Funct.* 2016;221(3):1337-1351.
- Koyama MS, Di Martino A, Kelly C, et al. Cortical signatures of dyslexia and remediation: an intrinsic functional connectivity approach. *PLoS One.* 2013;8(2):e55454.
- Krafnick AJ, Flowers DL, Napoliello EM, Eden GF. Gray matter volume changes following reading intervention in dyslexic children. *Neuroimage.* 2011;57(3):733-741.
- Lohvansuu K, Hämäläinen JA, Tanskanen A, et al. Enhancement of brain event-related potentials to speech sounds is associated with compensated reading skills in dyslexic children with familial risk for dyslexia. *Int J Psychophysiol.* 2014;94(3):298-310.
- Lovio R, Halttunen A, Lyytinen H, Näätänen R, Kujala T. Reading skill and neural processing accuracy improvement after a 3-hour intervention in preschoolers with difficulties in reading-related skills. *Brain Res.* 2012;1448:42-55.
- Mayseless N. Can intervention programs influence how the dyslexic brain processes low-level visual stimuli? *Dev Neuropsychol.* 2011;36(7):949-954.
- McArthur GM, Atkinson CM, Ellis D. Can training normalize atypical passive auditory ERPs in children with SRD or SLI? *Dev Neuropsychol.* 2010;35(6):656-678.
- Rezaie R, Simos PG, Fletcher JM, Cirino PT, Vaughn S, Papanicolaou AC. Temporo-parietal brain activity as a longitudinal predictor of response to educational interventions among middle school struggling readers. *J Int Neuropsychol Soc.* 2011;17(5):875-885.
- Schulte-Körne G, Bruder J. Clinical neurophysiology of visual and auditory processing in dyslexia: a review. *Clin Neurophysiol.* 2010;121(11):1794-1809.
- Spironelli C, Penolazzi B, Vio C, Angrilli A. Cortical reorganization in dyslexic children after phonological training: evidence from early evoked potentials. *Brain.* 2010;133(11):3385-3395.
- Stevens C, Harn B, Chard DJ, Currin J, Parisi D, Neville H. Examining the role of attention and instruction in at-risk kindergarteners: electrophysiological measures of selective auditory attention before and after an early literacy intervention. *J Learn Disabil.* 46(1):73-86.
- Vandermosten M, Hoeft F, Norton ES. Integrating MRI brain imaging studies of pre-reading children with current theories of developmental dyslexia: A review and quantitative meta-analysis. *Curr Opin Behav Sci.* 2016;10:155-161.

Pubertät

Das pubertierende Gehirn

von Stefanie Reinberger

Teenager spielen nicht plötzlich verrückt – sie durchlaufen einen normalen Entwicklungsprozess. Den können Eltern und Lehrer unterstützen und dabei die Besonderheiten des pubertierenden Gehirns für besseren Lernerfolg nutzen.

Teenager gelten als schwierig, und Erwachsene – egal ob es sich um Erziehungsberechtigte, Lehrer oder sogar Außenstehende handelt – können das Verhalten Pubertierender oft nur schlecht nachvollziehen. „Warum sie so seltsam sind“, lautet daher der Titel eines Buchs über das Teenagergehirn aus dem Jahr 2003¹. Neu darin war die wissenschaftliche Erkenntnis, dass die Gehirnentwicklung nicht nach den ersten Lebensjahren abgeschlossen ist. Die Autorin, eine amerikanische Wissenschaftsjournalistin namens Barbara Strauch, folgerte daraus, dass massive Umbauten im Denkorgan der Jugendlichen dazu führen, dass sie gar nicht normal ticken können.

„Diese Darstellungsweise ist zu stark vereinfacht und wird den Pubertierenden nicht gerecht“, sagt Kerstin Konrad, die an der RWTH Aachen im Bereich kognitive Entwicklung forscht. Dass Teenager und ihre Gehirne „nicht normal“ seien, möchte sie keineswegs stehen lassen. Und sie sieht durchaus Wege, dem Verhalten Heranwachsender so zu begegnen, dass ein produktives Miteinander im Unterricht möglich ist.

Richtig ist jedoch: Das Gehirn befindet sich weit über die frühe Kindheit hinaus in einer stetigen Ent-

wicklung. Noch vor einigen Jahren gingen Entwicklungspsychologen und Neurowissenschaftler davon aus, dass wesentliche Veränderungen in der Architektur und Funktionsweise des Gehirns auf die ersten fünf bis sechs Lebensjahre beschränkt sind³. Heute weiß man, dass das Denkorgan seine Plastizität bis ins hohe Lebensalter behält. Daher können Menschen zeitlebens lernen und beispielsweise ihr Verhalten sich verändernden Situationen anpassen. Und: Vom neugeborenen bis zum erwachsenen Gehirn ist es ein langer Entwicklungsweg, der sich bis nach der Pubertät erstreckt. Die verschiedenen Hirnareale reifen dabei nicht im Gleichtakt. Vielmehr prescht mal das eine, mal ein anderes voran. Bei Jugendlichen dominieren daher die Suche nach Belohnung, nach dem Kick und der Bestätigung von Gleichaltrigen weit über Impulskontrolle und vernunftgesteuertem Handeln. So kommt es zu einem verstärkten Risikoverhalten², etwa ungeschütztem Geschlechtsverkehr oder Substanzmissbrauch. Die Pubertät ist eine Lebensphase, die geprägt ist von der Suche nach Abwechslung, neuen Erlebnissen, starken Gefühlen und einem hohen Gesundheitsrisiko, schreibt Konrad dazu³. Männliche Jugendliche zeigen meist eine stärkere Risikobereitschaft als weibliche, was sich vermutlich auf den hormonellen Einfluss des Testosterons auf das Gehirn zurückführen lässt⁴. Die Heranwachsenden vollziehen zudem eine soziale Neuorientierung – weg von der Ursprungsfamilie und hin zu Gleichaltrigen^{2,5}.

Das pubertierende Gehirn

Im Verlauf der Pubertät durchläuft das Denkorgan massive neuroanatomische Umstrukturierungen. So kommt es zu einer massiven Zunahme an weißer Gehirnschubstanz, die aus Leitungsbahnen, also Nervenfasern besteht^{6,7}. Hingegen nimmt der relative Anteil grauer Substanz nach einer Zunahme in der

¹ Strauch B. Warum sie so seltsam sind. Gehirnentwicklung bei Teenagern. Berlin Verlag, Berlin 2003.

² Berenbaum SA, Beltz AM, Corley R. The importance of puberty for adolescent development: conceptualization and measurement. *Adv Child Dev Behav.* 2015;48:53-92.

³ Konrad K, Firk C, Uhlhaas PJ: Hirnentwicklung in der Adoleszenz. Neurowissenschaftliche Befunde zum Verständnis dieser Entwicklungsphase. *Deutsches Ärzteblatt* 2013; 110(25):425-431

⁴ Peters S, Jolles DJ, Van Duijvenvoorde ACK, Crone EA, Peper JS. The link between testosterone and amygdala-orbitofrontal cortex connectivity in adolescent alcohol use. *Psychoneuroendocrinology.* 2015;53:117-126.

⁵ Nelson EE, Leibenluft E, McClure EB, Pine DS. The social re-orientation of adolescence: a neuroscience perspective on the process and its relation to psychopathology. *Psychol Med.* 2005;35(2):163-174. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15841674>. Accessed July 12, 2016.

⁶ Lenroot RK, Giedd JN. Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neurosci Biobehav Rev.* 2006;30(6):718-729.

⁷ Giedd JN, Blumenthal J, Jeffries NO, et al. Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nat Neurosci.* 1999;2(10):861-863.

Kindheit ab der Pubertät wieder ab. Diese Veränderungen erstrecken sich jedoch nicht gleichmäßig über das Gehirn, sondern differieren zwischen verschiedenen Cortexarealen. Der Frontallappen, insbesondere der darin befindliche präfrontale Cortex, spielt unter anderem eine große Rolle für Handlungs- und Emotionskontrolle, letztlich also für vernünftiges Handeln. Allerdings braucht es bis zu 25 Jahre, bis er vollständig ausgereift ist. Mithilfe der Diffusions-Tensor-Bildgebung haben US-Wissenschaftler im Jahr 2013 nachgewiesen, dass die Faserdichte im Frontallappen während der Pubertät ab-, im Temporallappen dagegen zunimmt⁸.

Eine wichtige Rolle für die Umstrukturierung im Gehirn, die Zunahme an weißer Substanz sowie, im Verhältnis dazu, die Abnahme an grauer Substanz, spielen Steroidhormone – Östrogen bei Mädchen und Testosteron bei Jungen –, die im Zuge der Pubertät vermehrt ausgeschüttet werden⁹. Diese verstärken geschlechtsspezifische Unterschiede im Verhalten und beeinflussen möglicherweise auch geschlechterspezifische Pubertätsprobleme und die Entwicklung von psychopathologischen Symptomen^{4,8,10,11,12,13}. So könnten testosteronspezifische Veränderungen im Gehirn dazu beitragen, dass männliche Pubertierende häufiger zu Aggression¹³, Alkoholmissbrauch¹⁴ und allgemein einer erhöhten Risikobereitschaft neigen, während weibliche Teenager durch den Einfluss des Östrogens eher zu Depressionen oder Angststörungen tendieren¹⁴.

Risikobereitschaft steckt im Gehirn

Zu den Gehirnstrukturen, in denen Forscher bei Pubertierenden immer wieder Besonderheiten beschreiben, zählt insbesondere das Striatum¹⁵, der

Streifenkörper, in dem unter anderem der Nucleus accumbens, ein wichtiger Teil des Belohnungssystems, liegt. Studien belegen, dass sich diese Hirnregion schneller entwickelt als der präfrontale Cortex¹⁶. Wissenschaftler des Sackler Institute for Developmental Psychobiology an der Cornell University New York haben 2006 festgestellt, dass der Nucleus accumbens von Pubertierenden in seiner Aktivität bereits dem von erwachsenen Gehirnen entspricht. Dagegen ähnelt der orbitofrontale Cortex, der unter anderem wichtig ist für die Emotionskontrolle, in seiner Aktivität eher dem von Kindern¹⁷.

Anderen Untersuchungen zufolge, läuft der Nucleus accumbens während der Pubertät sogar zu seiner Höchstform auf. In einer Langzeitstudie, die im Jahr 2015 veröffentlicht wurde, hatten niederländische Wissenschaftler knapp 300 Probanden im Alter von 8 bis 27 Jahren über einen Zeitraum von zwei Jahren beobachtet¹⁷. Dabei entdeckten sie, dass die Aktivität des Nucleus accumbens etwa in der Mitte der Pubertät ihren Höhepunkt erreicht, um sich dann zu einem erwachsenen Level zu „normalisieren“. Zudem sehen die Forscher bei ihren Probanden einen direkten Zusammenhang zwischen der Aktivität des Nucleus accumbens und einem stark belohnungsorientierten Verhalten.

Entscheidend ist jedoch auch die neuronale Verbindung zwischen Striatum und präfrontalem Cortex, die eine wichtige Rolle für die Impulskontrolle spielt. Dieses Netzwerk verfestigt sich im Laufe der Pubertät bis zum Erwachsenenalter und geht mit einer verbesserten Kontrolle über das eigene Handeln einher¹⁵. Außerdem gewinnt mit fortschreitender Pubertät die Aktivität im präfrontalen Cortex die

⁸ Dennis EL, Jahanshad N, McMahon KL, et al. Development of brain structural connectivity between ages 12 and 30: a 4-Tesla diffusion imaging study in 439 adolescents and adults. *Neuroimage*. 2013;64:671-684.

⁹ Peper JS, Hulshoff Pol HE, Crone EA, van Honk J. Sex steroids and brain structure in pubertal boys and girls: A mini-review of neuroimaging studies. *Neuroscience*. 2011.

¹⁰ Neufang S, Specht K, Hausmann M, et al. Sex differences and the impact of steroid hormones on the developing human brain. *Cereb Cortex*. 2009.

¹¹ Perrin JS, Leonard G, Perron M, et al. Sex differences in the growth of white matter during adolescence. *Neuroimage*. 2009;45(4):1055-1066.

¹² Cservinka A, Stroup ML, Etkin A, Nagel BJ. The effects of age, sex, and hormones on emotional conflict-related brain response during adolescence. *Brain Cogn*. 2015;99:135-150.

¹³ Peper JS, de Reus MA, van den Heuvel MP, Schutter DJLG. Short fused? associations between white matter connections, sex steroids, and

aggression across adolescence. *Hum Brain Mapp*. 2015;36(3):1043-1052.

¹⁴ Yuan J, Ju E, Yang J, Chen X, Li H. Different patterns of puberty effect in neural oscillation to negative stimuli: sex differences. *Cogn Neurodyn*. 2014;8(6):517-524.

¹⁵ Crone EA, Van Duijvenvoorde ACK, Peper JS. Annual Research Review: Neural contributions to risk-taking in adolescence - Developmental changes and individual differences. *J Child Psychol Psychiatry Allied Discip*. 2016.

¹⁶ Galvan A, Hare TA, Parra CE, et al. Earlier development of the accumbens relative to orbitofrontal cortex might underlie risk-taking behavior in adolescents. *J Neurosci*. 2006;26(25):6885-6892.

¹⁷ Braams BR, van Duijvenvoorde ACK, Peper JS, Crone EA. Longitudinal changes in adolescent risk-taking: a comprehensive study of neural responses to rewards, pubertal development, and risk-taking behavior. *J Neurosci*. 2015;35(18):7226-7238.

Oberhand über die des Streifenkörpers¹⁸ - vereinfacht gesagt, siegt mit zunehmender Reife also die Vernunft über die Suche nach dem Kick, beziehungsweise beide Pole werden besser ausbalanciert. Janet Metcalfe und Walter Mischel von der Columbia University in New York stellten im Zusammenhang mit Vernunft- und Risikoverhalten bereits 1999 ein Modell auf, nachdem Willenskraft und Selbstkontrolle das Ergebnis der Balance zwischen „kalt“ und „heiß“ ist. „Kalt“ steht in diesem Zusammenhang für ein unemotionales und strategisches kognitives System – „heiß“ bezeichnet emotionsgesteuertes Verhalten, das durch Ängste und Begehren gesteuert wird^{19,20}.

Die Vorstellung, Pubertierende seien per se unfähig, rationale Entscheidungen zu treffen, ist jedoch falsch. So hat eine Studie auf der Grundlage von Fragebögen gezeigt, dass Jugendliche Risiken ebenso gut einschätzen können wie Erwachsene²¹. Vielmehr nimmt in emotionalen Situationen – etwa bei Anwesenheit von Gleichaltrigen oder Aussicht auf Belohnung – die Wahrscheinlichkeit zu, dass Belohnung und Emotionen stärker die Handlung beeinflussen als rationale Entscheidungsprozesse^{3,23}.

Tatsächlich hängt das Risikoverhalten von Jugendlichen sehr stark davon ab, ob Gleichaltrige anwesend sind – und welches Ansehen diese genießen. So erkannten US-Wissenschaftler der Temple University in Philadelphia in einer fMRT-Studie, dass Risikoverhalten eine stärkere Aktivität im Belohnungssystem hervorrief, wenn die Jugendlichen dabei von Peers beobachtet wurden²². Niederländische Wissenschaftler der Universität Leiden belegten 2014 zudem, dass es für das Belohnungssystem und das Verhalten der Jugendlichen eine entscheidende Rolle spielt, ob die anwesenden Gleichaltrigen als

„Freund“ oder „Feind“ angesehen werden²³. Die Forscher ließen 249 Probanden im Alter von 8 bis 25 Jahren ein Spiel spielen, bei dem sie Geld gewinnen konnten – entweder für sich selbst, für ihren besten Freund oder für eine gleichaltrige Person, die sie nicht mochten. Gleichzeitig beobachteten die Wissenschaftler die Gehirnaktivität ihrer Probanden mittels fMRT. Pubertierende, die für sich selbst oder für einen Freund „zockten“, zeigten dabei die typische Aktivitätssteigerung im Striatum. Sollten sie dagegen für eine ungeliebte Person gewinnen, ließ die Aufgabe das Belohnungssystem kalt. Vielmehr wurde nun der präfrontale Cortex aktiv. Das zeigt, dass das Risiko- und Belohnungsverhalten von Pubertierenden stark vom sozialen Kontext abhängt.

Sozialverhalten wird umgekrempelt – auch im Denkorgan

Tatsächlich spielt das soziale Miteinander mit Peers in der Pubertät eine zunehmende Rolle. Teenager orientieren sich sukzessive weg von ihrer Ursprungsfamilie und hin zu Gleichaltrigen. Dabei ist es für den Einzelnen entscheidend, wie er oder sie von den anderen gesehen wird. So wird das Selbst und der eigene soziale Status permanent evaluiert. Vor allem zu Beginn der Pubertät ist das Striatum hoch aktiv, wenn die Pubertierenden eine Rückmeldung von guten Freunden bekommen²⁴. Der Weg zum Selbstkonzept ist demnach sehr stark vom Belohnungsverhalten geprägt. Dabei sind Pubertierende weit sensibler dafür, ob sie von anderen akzeptiert oder abgelehnt werden als jüngere Kinder²⁵. Im Experiment zeigte sich, dass das Striatum bei Pubertierenden, die Bilder von freundlichen, wohlwollenden Gesichtern sehen, viel stärker in Aktion tritt als bei jüngeren Kindern und Erwachsenen, die dieselben Fotos betrachten.

¹⁸ Forbes EE, Ryan ND, Phillips ML, et al. Healthy Adolescents' Neural Response to Reward: Associations With Puberty, Positive Affect, and Depressive Symptoms. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*. 2010;49(2):162-172.e5.

¹⁹ Metcalfe J, Mischel W. A hot/cool-system analysis of delay of gratification: dynamics of willpower. *Psychol Rev*. 1999;106(1):3-19.

²⁰ Casey BJ. Beyond simple models of self-control to circuit-based accounts of adolescent behavior. *Annu Rev Psychol*. 2015;66:295-319.

²¹ Gardner M, Steinberg L: Peer influence on risk taking, risk preference, and risky decision making in adolescence and adulthood: an experimental study. *Developmental Psychology* 2005; 41: 625-35.

²² Chein J, Albert D, O'Brien L, Uckert K, Steinberg L. Peers increase

adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Dev Sci*. 2011;14(2):F1-F10.

²³ Braams BR, Peters S, Peper JS, Güroğlu B, Crone EA. Gambling for self, friends, and antagonists: differential contributions of affective and social brain regions on adolescent reward processing. *Neuroimage*. 2014;100:281-289.

²⁴ Jankowski KF, Moore WE, Merchant JS, Kahn LE, Pfeifer JH. But do you think I'm cool? Developmental differences in striatal recruitment during direct and reflected social self-evaluations. *Dev Cogn Neurosci*. 2014;8:40-54.

²⁵ Blakemore S-J. The social brain in adolescence. *Nat Rev Neurosci*. 2008;9(4):267-277.

Interessanterweise spielt beim Prozess der Selbstevaluierung – durch den Jugendlichen selbst oder durch Freunde – der temporoparietale Übergang (temporo-parietal junction, TPJ) keine Rolle²⁶. Insbesondere dem rechten TPJ schreiben Neurowissenschaftler jedoch eine wichtige Bedeutung zu, wenn es darum geht, sich in andere hineinzuversetzen. Sollten Pubertierende tatsächlich unfähig sein, die Emotionen anderer zu erkennen?

Die Fähigkeit, Gefühle, Bedürfnisse, Absichten, Erwartungen oder Meinungen bei unserem Mitmenschen zu vermuten, bezeichnen Wissenschaftler als Theory of Mind. Zwar haben Kinder schon ab einem Alter von drei oder vier Jahren eine Theory of Mind. Doch das zugrundeliegende neuronale Netzwerk, an dem der mediale präfrontale Cortex, der orbitofrontale Cortex, der temporoparietale Übergang sowie der Sulcus temporalis superior beteiligt sind, durchläuft auch noch während der Pubertät weitere Reifungsprozesse. Es gibt Hinweise darauf, dass – obwohl nach wie vor das selbe neuronale Netzwerk herangezogen wird – Erwachsene andere Strategien nutzen, um sich in andere hineinzuversetzen als Heranwachsende²⁷, und dies mit anderen Aktivierungsmustern in diesem Netzwerk einhergeht. So rekrutieren Pubertierende viel stärker den medialen präfrontalen Cortex, wenn sie sich in andere hineinversetzen sollen, als es bei Erwachsenen der Fall ist²⁶.

Ähnliches gilt auch für die Emotionsverarbeitung per se. Auch hier kommt es zu massiven Umstrukturierungen. Letztlich scheint sich beim Übergang vom pubertierenden zum erwachsenen Gehirn die Aktivität vom Limbischen System, vielfach als Gefühlszentrum bezeichnet, vermehrt zum Frontallappen zu verlagern²⁷. Letztlich funktioniert die Verarbeitung von Gefühlen – sowohl der eigenen als auch die Einschätzung der Emotionen anderer – nicht

zwingend schlechter als bei Erwachsenen. Die Gehirne Pubertierender nutzen dafür vielmehr andere Strategien als reife Denkgorgane.

Das pubertierende Gehirn auf der Schulbank

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Teenager und ihre Gehirne nicht plötzlich verrücktspielen, wenn sie in die Pubertät kommen. Vielmehr läuft ein normaler Entwicklungs- und Reifungsprozess weiter. Allerdings treten emotionales und impulsives Verhalten sowie eine erhöhte Risikobereitschaft in den Vordergrund, da sich die involvierten Gehirnregionen schneller entwickeln als die kontrollierenden Instanzen im Frontallappen. Dass manche Jugendliche während ihrer Pubertät mehr Schwierigkeiten haben und verhaltensauffälliger sind als andere, schreibt Eveline Crone von der Universität Leiden vor allem individuellen Unterschieden in Sachen Temperament und hormoneller Veränderung zu, die sie sensibler machen für soziale Einflüsse von außen²⁸.

Aus evolutionsbiologischer Sicht ist die Adoleszenz eine Entwicklungsperiode, in der Jugendliche zur Unabhängigkeit gelangen³. Risikoreiches Verhalten in der Adoleszenz, lässt sich als Produkt eines biologischen Ungleichgewichts zwischen der Suche nach Abwechslung und neuen Erlebnissen und unreifen, selbstregulatorischen Fähigkeiten interpretieren. Möglicherweise hat beides zum Ziel, dass Jugendliche sich aus ihrer familiären Sicherheitsnische lösen, um zum Beispiel einen Partner außerhalb der Primärfamilie zu suchen³.

Dazu kommt, dass der noch unreife präfrontale Cortex bestimmte Lernformen und geistige Flexibilität begünstigt. Die Gehirne von Jugendlichen durchlaufen eine plastische Phase, in der sich Umwelteinflüsse in besonderer Weise prägend auf kortikale Schaltkreise auswirken. Dies eröffnet Chancen für Bildung und Erziehung³. Die ständige Suche nach neuen Erfahrungen und Belohnungsanreizen

²⁶ Blakemore S-J. The developing social brain: implications for education. *Neuron*. 2010;65(6):744-747.

²⁷ Vink M, Derks JM, Hoogendam JM, Hillegers M, Kahn RS. Functional differences in emotion processing during adolescence and early adulthood. *Neuroimage*. 2014;91:70-76.

²⁸ Crone EA, Elzinga BM. Changing brains: how longitudinal functional magnetic resonance imaging studies can inform us about cognitive and social-affective growth trajectories. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*. 6(1):53-63.

lässt sich durch geschickte Didaktik für den Unterricht und das Lernverhalten nutzen.

Entscheidend ist aber auch, dass es vor dem Hintergrund der neurowissenschaftlichen Erkenntnisse über das pubertierende Gehirn wenig sinnvoll ist, das Risikoverhalten Adoleszenter völlig unterbinden zu wollen. Vielmehr könnte eine geeignete Strategie darin liegen, positive Belohnungsanreize zu schaffen, etwa durch geeignete Vorbilder, denen es nachzueifern lohnt³.

Und: Wenn sich aber das Gehirn und insbesondere die sozial-kognitiven Fähigkeiten während der Pubertät stark weiterentwickeln und sich die beteiligten Gehirnregionen neuroanatomisch und funktionell stark umstrukturieren, ist es umso wichtiger, Teenager zu unterrichten²⁸. Es wäre daher wünschenswert, wenn sich der Unterricht in der Pubertät gerade auch den Bereichen der Emotionsverarbeitung und Impulskontrolle sowie der Selbstwahrnehmung widmen würde, um diesen wichtigen Entwicklungsprozess zu unterstützen, wie die britische Neurowissenschaftlerin Sarah-Jayne Blakemore, University College London, schreibt²⁸.

Literaturempfehlungen

Wie beeinflusst die Pubertät die (schulrelevanten) Funktionen des Gehirns von Jugendlichen?

Wir haben drei Experten für die Erforschung von Pubertät und Adoleszenz gefragt, welche 30 neurowissenschaftlichen Publikationen sie für die wichtigsten halten, um obige Frage beantworten zu können.

Unter Neurowissenschaften verstehen wir die naturwissenschaftliche Erforschung des Gehirns unter Einsatz technischer Methoden, die den Aufbau oder die Funktionsweise von Nervenzellen, Nervenzellverbänden oder des gesamten Organs erfassen.

Dr. Anne-Lise-Goddings, Prof. Dr. Kerstin Konrad, Ass. Prof. Dr. Jiska Peper haben uns bei unserem Projekt unterstützt und ihre Literaturempfehlungen zum Thema zusammengestellt.

1.

*Dr. **Anne-Lise Goddings** forscht als Postdoc unter Prof. Dr. Sarah Jayne Blakemore am Institute of Cognitive Neuroscience und Prof. Russell Viner am Institute of Child Health des University College London, UK. Ihr Interessensschwerpunkt ist die Rolle der Pubertät in der Gehirnentwicklung Heranwachsender. Zurzeit arbeitet sie in weltweiten Kooperationen daran, auf Basis von Längsschnittstudien die mittels MRT sichtbaren strukturellen und funktionellen neuronalen Änderungen in der Gehirnentwicklung mit parallel auftretenden Verhaltensänderungen zu korrelieren. Zudem ist sie als Kinderärztin in London tätig.*

Ahmed EI, Zehr JL, Schulz KM, Lorenz BH, DonCarlos LL, Sisk CL. Pubertal hormones modulate the addition of new cells to sexually dimorphic brain regions. *Nat Neurosci.* 2008;11(9):995-997.

Bell MR, Meerts SH, Sisk CL. Adolescent brain maturation is necessary for adult-typical mesocortico-limbic responses to a rewarding social cue. *Dev Neurobiol.* 2013;73(11):856-869.

Braams BR, van Duijvenvoorde ACK, Peper JS, Crone EA. Longitudinal changes in adolescent risk-taking: a comprehensive study of neural responses to rewards, pubertal development, and risk-taking behavior. *J Neurosci.* 2015;35(18):7226-7238.

Crone EA, Dahl RE. Understanding adolescence as a period of social-affective engagement and goal flexibility. *Nat Publ Gr.* 2012;13.

Cservenka A, Stroup ML, Etkin A, Nagel BJ. The effects of age, sex, and hormones on emotional conflict-related brain response during adolescence. *Brain Cogn.* 2015;99:135-150.

De Lorme KC, Schulz KM, Salas-Ramirez KY, Sisk CL. Pubertal testosterone organizes regional volume and neuronal number within the medial amygdala of adult male Syrian hamsters. *Brain Res.* 2012;1460:33-40.

De Lorme K, Bell MR, Sisk CL. The teenage brain: social reorientation and the adolescent brain-the role of gonadal hormones in the male syrian hamster. *Curr Dir Psychol Sci.* 2013;22(2):128-133.

Ferri J, Bress JN, Eaton NR, Proudfit GH. The impact of puberty and social anxiety on amygdala activation to faces in adolescence. *Dev Neurosci.* 2014;36(3-4):239-249.

Forbes EE, Ryan ND, Phillips ML, et al. Healthy Adolescents' Neural Response to Reward: Associations With Puberty, Positive Affect, and Depressive Symptoms. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry.* 2010;49(2):162-172.e5.

Forbes EE, Phillips ML, Silk JS, Ryan ND, Dahl RE. Neural systems of threat processing in adolescents: role of pubertal maturation and relation to measures of negative affect. *Dev Neuropsychol.* 2011;36(4):429-452.

Goddings A-L, Burnett Heyes S, Bird G, Viner RM, Blakemore S-J. The relationship between puberty

and social emotion processing. *Dev Sci.* 2012;15(6):801-811.

Klapwijk ET, Goddings A-L, Burnett Heyes S, Bird G, Viner RM, Blakemore S-J. Increased functional connectivity with puberty in the mentalising network involved in social emotion processing. *Horm Behav.* 2013;64(2):314-322.

LeMoult J, Colich NL, Sherdell L, Hamilton JP, Gotlib IH. Influence of menarche on the relation between diurnal cortisol production and ventral striatum activity during reward anticipation. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2015;10(9):1244-1250.

Masten CL, Eisenberger NI, Pfeifer JH, Colich NL, Dapretto M. Associations among pubertal development, empathic ability, and neural responses while witnessing peer rejection in adolescence. *Child Dev.* 84(4):1338-1354.

Moore WE, Pfeifer JH, Masten CL, Mazziotta JC, Iacoboni M, Dapretto M. Facing puberty: associations between pubertal development and neural responses to affective facial displays. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2012;7(1):35-43.

Op de Macks ZA, Gunther Moor B, Overgaauw S, Güroğlu B, Dahl RE, Crone EA. Testosterone levels correspond with increased ventral striatum activation in response to monetary rewards in adolescents. *Dev Cogn Neurosci.* 2011;1(4):506-516.

Peper JS, Dahl RE. Surging Hormones: Brain-Behavior Interactions During Puberty. *Curr Dir Psychol Sci.* 2013;22(2):134-139.

Peters S, Jolles DJ, Van Duijvenvoorde ACK, Crone EA, Peper JS. The link between testosterone and amygdala-orbitofrontal cortex connectivity in adolescent alcohol use. *Psychoneuroendocrinology.* 2015;53:117-126.

Scherf KS, Behrmann M, Dahl RE. Facing changes and changing faces in adolescence: a new model for investigating adolescent-specific interactions between pubertal, brain and behavioral development. *Dev Cogn Neurosci.* 2012;2(2):199-219.

Sisk CL. Hormone-dependent adolescent organization of socio-sexual behaviors in mammals. *Curr Opin Neurobiol.* 2016;38:63-68.

Sisk CL, Foster DL. The neural basis of puberty and adolescence. *Nat Neurosci.* 2004;7(10):1040-1047.

Sisk CL, Zehr JL. Pubertal hormones organize the adolescent brain and behavior. *Front Neuroendocrinol.* 2005;26(3-4):163-174.

Smith AR, Chein J, Steinberg L. Impact of socio-emotional context, brain development, and pubertal maturation on adolescent risk-taking. *Horm Behav.* 2013;64(2):323-332.

Spielberg JM, Forbes EE, Ladouceur CD, et al. Pubertal testosterone influences threat-related amygdala-orbitofrontal cortex coupling. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2015;10(3):408-415.

Spielberg JM, Olinio TM, Forbes EE, Dahl RE. Exciting fear in adolescence: does pubertal development alter threat processing? *Dev Cogn Neurosci.* 2014;8:86-95.

Tyborowska A, Volman I, Smeekens S, Toni I, Roelofs K. Testosterone during Puberty Shifts Emotional Control from Pulvinar to Anterior Prefrontal Cortex. *J Neurosci.* 2016;36(23):6156-6164.

van Duijvenvoorde ACK, Op de Macks ZA, Overgaauw S, Gunther Moor B, Dahl RE, Crone EA. A cross-sectional and longitudinal analysis of reward-related brain activation: effects of age, pubertal stage, and reward sensitivity. *Brain Cogn.* 2014;89:3-14.

Whittle S, Simmons JG, Byrne ML, et al. Associations between early adrenarche, affective brain function and mental health in children. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2015;10(9):1282-1290.

2.

*Prof. Dr. **Kerstin Konrad**, leitet das Lehr- und Forschungsgebiet „Klinische Neuropsychologie des Kindes- und Jugendalters“ an der Klinik für Psychiatrie, Psychosomatik und Psychotherapie des Kindes- und*

Jugendalters des Universitätsklinikums der RWTH Aachen und ist Direktorin am JARA-Brain Institut II des Forschungszentrums Jülich und der RWTH Aachen. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehört die frühe strukturelle und funktionelle Hirnentwicklung und die Veränderungen in der Pubertät sowie mögliche Abweichungen bei neuropsychiatrischen Erkrankungen des Kindes- und Jugendalters.

Blakemore S-J. The developing social brain: implications for education. *Neuron*. 2010;65(6):744-747.

Blakemore S-J. The social brain in adolescence. *Nat Rev Neurosci*. 2008;9(4):267-277.

Blakemore S-J, Choudhury S. Development of the adolescent brain: implications for executive function and social cognition. *J Child Psychol Psychiatry*. 47(3-4):296-312.

Casey BJ, Duhoux S, Malter Cohen M. Adolescence: what do transmission, transition, and translation have to do with it? *Neuron*. 2010;67(5):749-760.

Casey BJ, Jones RM, Hare TA. The adolescent brain. *Ann N Y Acad Sci*. 2008;1124:111-126.

Chein J, Albert D, O'Brien L, Uckert K, Steinberg L. Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Dev Sci*. 2011;14(2):F1-F10.

Crone EA, Van Duijvenvoorde ACK, Peper JS. Annual Research Review: Neural contributions to risk-taking in adolescence - Developmental changes and individual differences. *J Child Psychol Psychiatry Allied Discip*. 2016.

Crone EA, Dahl RE. Understanding adolescence as a period of social-affective engagement and goal flexibility. *Nat Publ Gr*. 2012;13.

Dennis EL, Jahanshad N, McMahon KL, et al. Development of brain structural connectivity between ages 12 and 30: a 4-Tesla diffusion imaging study in 439 adolescents and adults. *Neuroimage*. 2013;64:671-684.

Galvan A, Hare TA, Parra CE, et al. Earlier development of the accumbens relative to orbitofrontal cortex might underlie risk-taking behavior in adolescents. *J Neurosci*. 2006;26(25):6885-6892.

Galvan A, Hare T, Voss H, Glover G, Casey BJ. Risk-taking and the adolescent brain: who is at risk? *Dev Sci*. 2007;10(2):F8-F14.

Giedd JN, Blumenthal J, Jeffries NO, et al. Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nat Neurosci*. 1999;2(10):861-863.

Giedd JN. Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Ann N Y Acad Sci*. 2004;1021:77-85.

Giedd JN. Linking adolescent sleep, brain maturation, and behavior. *J Adolesc Health*. 2009;45(4):319-320.

Giedd JN. The teen brain: insights from neuroimaging. *J Adolesc Health*. 2008;42(4):335-343.

Giedd JN. The digital revolution and adolescent brain evolution. *J Adolesc Health*. 2012;51(2):101-105.

Holm SM, Forbes EE, Ryan ND, Phillips ML, Tarr JA, Dahl RE. Reward-related brain function and sleep in pre/early pubertal and mid/late pubertal adolescents. *J Adolesc Health*. 2009;45(4):326-334.

Huttenlocher PR, Dabholkar AS. Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *J Comp Neurol*. 1997;387(2):167-178.

Konrad K, Firk C, Uhlhaas PJ. Brain development during adolescence: neuroscientific insights into this developmental period. *Dtsch Ärzteblatt Int*. 2013;110(25):425-431.

Lenroot RK, Giedd JN. Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neurosci Biobehav Rev*. 2006;30(6):718-729.

Mills KL, Lalonde F, Clasen LS, Giedd JN, Blakemore S-J. Developmental changes in the structure of the

social brain in late childhood and adolescence. *Soc Cogn Affect Neurosci*. 2014;9(1):123-131.

Nelson EE, Leibenluft E, McClure EB, Pine DS. The social re-orientation of adolescence: a neuroscience perspective on the process and its relation to psychopathology. *Psychol Med*. 2005;35(2):163-174.

Neufang S, Specht K, Hausmann M, et al. Sex differences and the impact of steroid hormones on the developing human brain. *Cereb Cortex*. 2009.

Park C-H, Chun J-W, Cho H, Jung Y-C, Choi J, Kim DJ. Is the Internet gaming - addicted brain close to be in a pathological state?

Paus T. Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends Cogn Sci*. 2005;9(2):60-68.

Paus T, Keshavan M, Giedd JN. Why do many psychiatric disorders emerge during adolescence? *Nat Rev Neurosci*. 2008;9(12):947-957.

Peper JS, Hulshoff Pol HE, Crone EA, van Honk J. Sex steroids and brain structure in pubertal boys and girls: A mini-review of neuroimaging studies. *Neuroscience*. 2011.

Perrin JS, Leonard G, Perron M, et al. Sex differences in the growth of white matter during adolescence. *Neuroimage*. 2009;45(4):1055-1066.

Perrin JS, Hervé P-Y, Leonard G, et al. Growth of white matter in the adolescent brain: role of testosterone and androgen receptor. *J Neurosci*. 2008;28(38):9519-9524.

Satterthwaite TD, Shinohara RT, Wolf DH, et al. Impact of puberty on the evolution of cerebral perfusion during adolescence. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014;111(23):8643-8648.

Silveri MM, Dager AD, Cohen-Gilbert JE, Sneider JT. Neurobiological signatures associated with alcohol and drug use in the human adolescent brain. *Neurosci Biobehav Rev*. July 2016. doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.06.042.

van Duijvenvoorde ACK, Peters S, Braams BR, Crone EA. What motivates adolescents? Neural responses to rewards and their influence on adolescents' risk taking, learning, and cognitive control. *Neurosci Biobehav Rev*. June 2016. doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.06.037.

Vink M, Derks JM, Hoogendam JM, Hillegers M, Kahn RS. Functional differences in emotion processing during adolescence and early adulthood. *Neuroimage*. 2014;91:70-76.

3.

Dr. Jiska Peper forscht als Assistant Professor unter Prof. Eveline A. Crone in der Abteilung Developmental and Educational des Institute of Psychology an der Universität Leiden, NL. Ein Forschungsschwerpunkt ist der Einfluss der Geschlechtshormone auf Hirnentwicklung und Risikobereitschaft während Kindheit und Pubertät. Zudem ist sie eine der leitenden Wissenschaftler der „Braintime study“ (<http://www.juniorhersenen.nl/braintime>), einer großangelegten Studie zur Frage des Einflusses von Gehirnentwicklung und Geschlechtshormonen auf die kognitiven, emotionalen und sozialen Fähigkeiten von Jugendlichen.

Berenbaum SA, Beltz AM, Corley R. The importance of puberty for adolescent development: conceptualization and measurement. *Adv Child Dev Behav*. 2015;48:53-92.

Braams BR, Peters S, Peper JS, Güroğlu B, Crone EA. Gambling for self, friends, and antagonists: differential contributions of affective and social brain regions on adolescent reward processing. *Neuroimage*. 2014;100:281-289.

Braams BR, van Duijvenvoorde ACK, Peper JS, Crone EA. Longitudinal changes in adolescent risk-taking: a comprehensive study of neural responses to rewards, pubertal development, and risk-taking behavior. *J Neurosci*. 2015;35(18):7226-7238.

- Casey BJ. Beyond simple models of self-control to circuit-based accounts of adolescent behavior. *Annu Rev Psychol.* 2015;66:295-319.
- Crone EA, Van Duijvenvoorde ACK, Peper JS. Annual Research Review: Neural contributions to risk-taking in adolescence - Developmental changes and individual differences. *J Child Psychol Psychiatry Allied Discip.* 2016.
- Crone EA, Elzinga BM. Changing brains: how longitudinal functional magnetic resonance imaging studies can inform us about cognitive and social-affective growth trajectories. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci.* 6(1):53-63.
- Cservenka A, Stroup ML, Etkin A, Nagel BJ. The effects of age, sex, and hormones on emotional conflict-related brain response during adolescence. *Brain Cogn.* 2015;99:135-150.
- Ferri J, Bress JN, Eaton NR, Proudfit GH. The impact of puberty and social anxiety on amygdala activation to faces in adolescence. *Dev Neurosci.* 2014;36(3-4):239-249.
- Goddings A-L, Burnett Heyes S, Bird G, Viner RM, Blakemore S-J. The relationship between puberty and social emotion processing. *Dev Sci.* 2012;15(6):801-811.
- Jankowski KF, Moore WE, Merchant JS, Kahn LE, Pfeifer JH. But do you think I'm cool? Developmental differences in striatal recruitment during direct and reflected social self-evaluations. *Dev Cogn Neurosci.* 2014;8:40-54.
- Klapwijk ET, Goddings A-L, Burnett Heyes S, Bird G, Viner RM, Blakemore S-J. Increased functional connectivity with puberty in the mentalising network involved in social emotion processing. *Horm Behav.* 2013;64(2):314-322.
- Peper JS, Dahl RE. Surging Hormones: Brain-Behavior Interactions During Puberty. *Curr Dir Psychol Sci.* 2013;22(2):134-139.
- Peper JS, de Reus MA, van den Heuvel MP, Schutter DJLG. Short fused? associations between white matter connections, sex steroids, and aggression across adolescence. *Hum Brain Mapp.* 2015;36(3):1043-1052.
- Peters S, Braams BR, Raijmakers MEJ, Koolschijn PCMP, Crone EA. The neural coding of feedback learning across child and adolescent development. *J Cogn Neurosci.* 2014;26(8):1705-1720.
- Peters S, Braams BR, Raijmakers MEJ, Koolschijn PCMP, Crone EA. The neural coding of feedback learning across child and adolescent development. *J Cogn Neurosci.* 2014;26(8):1705-1720.
- Peters S, Jolles DJ, Van Duijvenvoorde ACK, Crone EA, Peper JS. The link between testosterone and amygdala-orbitofrontal cortex connectivity in adolescent alcohol use. *Psychoneuroendocrinology.* 2015;53:117-126.
- Satterthwaite TD, Shinohara RT, Wolf DH, et al. Impact of puberty on the evolution of cerebral perfusion during adolescence. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2014;111(23):8643-8648.
- Spielberg JM, Forbes EE, Ladouceur CD, et al. Pubertal testosterone influences threat-related amygdala-orbitofrontal cortex coupling. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2015;10(3):408-415.
- Spielberg JM, Olino TM, Forbes EE, Dahl RE. Exciting fear in adolescence: does pubertal development alter threat processing? *Dev Cogn Neurosci.* 2014;8:86-95.
- Tyborowska A, Volman I, Smeekens S, Toni I, Roelofs K. Testosterone during Puberty Shifts Emotional Control from Pulvinar to Anterior Prefrontal Cortex. *J Neurosci.* 2016;36(23):6156-6164.
- van Duijvenvoorde ACK, Op de Macks ZA, Overgaauw S, Gunther Moor B, Dahl RE, Crone EA. A cross-sectional and longitudinal analysis of reward-related brain activation: effects of age, pubertal stage, and reward sensitivity. *Brain Cogn.* 2014;89:3-14.
- Whittle S, Simmons JG, Byrne ML, et al. Associations between early adrenarche, affective brain function and mental health in children. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2015;10(9):1282-1290.

Yuan J, Ju E, Yang J, Chen X, Li H. Different patterns of puberty effect in neural oscillation to negative stimuli: sex differences. *Cogn Neurodyn*. 2014;8(6):517-524.

Schlaf/Tagträume

Lernen im Schlaf

von Stefanie Reinberger

Natürlich lernt niemand alleine dadurch, dass er schläft. Aber nur durch ausreichenden Schlaf kann das Langzeitgedächtnis optimal funktionieren und Lernerfolg somit gewährleistet sein.

Schnell das Vokabelheft unters Kissen legen, dann muss der Test am nächsten Morgen doch klappen. Ganz so einfach ist die Sache natürlich nicht – doch wie meist, steckt auch hier ein Körnchen Wahrheit hinter einer eigentlich unsinnigen Empfehlung. Zwar muss man die Vokabeln zunächst pauken. Doch das Gelernte bleibt besser hängen, wenn der Lerneinheit eine ordentlich Müte Nachtschlaf folgt. Denn Schlaf, das haben Psychologen und Hirnforscher hinreichend bewiesen, ist essentiell für das Langzeitgedächtnis – und dafür, wie gut wir uns neue Informationen einprägen können.

Im Prinzip passiert während des Schlafs gleich zweierlei. Schlaf sorgt für Ordnung im Gehirn und stärkt das Langzeitgedächtnis. Im Wachzustand nimmt das Gehirn neue Informationen auf, was sich anatomisch dadurch bemerkbar macht, dass neue Nervenverbindungen geknüpft und bereits bestehende Synapsen verstärkt werden. Im Schlaf – genauer gesagt, während des Tiefschlafs oder, wissenschaftlich ausgedrückt, im tiefen non-REM-Schlaf – tritt jedoch der umgekehrte Effekt ein. Diese Schlafphasen zeichnen sich, im Gegensatz zum REM-Schlaf (REM = Rapid Eye Movement), durch langsame Hirnwellen aus, wie sich mit Hilfe des Elektroenzephalogramms zeigen lässt. Diese so genannten Delta-Wellen sind dafür verantwortlich, dass die Zahl und die Stärke der tagsüber geknüpften Synapsen wieder abnehmen. Was zunächst wie ein Nachteil klingt, hilft vielmehr das Wichtige vom Unwichtigen zu selektieren, da nur

stärker potenzierte Nervenverbindungen diesen Auswahlprozess überstehen, so die Theorie des italienischen Psychiaters und Neurowissenschaftlers Giulio Tonini. Gleichzeitig wird so auch die Kapazität des Denkorgans, neue Informationen aufzunehmen, wiederhergestellt^{1,2}.

Die Plastizität des Gehirns, also seine Fähigkeit unnütze Nervenverbindungen zu eliminieren und sinnvolle neue zu knüpfen, ist dafür verantwortlich, dass Menschen sich auf neue Situationen einstellen und neue Informationen verarbeiten, also lernen können. Wissenschaftler um den Züricher Neurowissenschaftler und Schlafforscher Reto Huber veröffentlichten 2014 eine Studie, in der sie Kinder, Jugendliche und Erwachsene verglichen und zu dem Schluss kamen, dass die höhere Plastizität und bessere Lernfähigkeit in jungen Jahren im Zusammenhang mit den längeren Schlafphasen in dieser Altersgruppe stehen könnte³.

Während des non-REM-Schlafs wird aber auch das Langzeitgedächtnis angelegt und gefestigt. Was dabei passiert, dazu haben Wissenschaftler mittlerweile eine recht gute Vorstellung. Eine entscheidende Rolle bei diesem Prozess spielen der Neocortex, der evolutionsbiologisch jüngste Teil der Hirnrinde, sowie der Hippocampus, eine evolutionsbiologisch sehr viel ältere Struktur des Cortex. Der Neocortex gilt als Sitz des Langzeitgedächtnisses, der Hippocampus kann als eine Art Zwischenspeicher angesehen werden. Während ein Individuum neue Informationen aufnimmt, sind beide Hirnregionen aktiv. Dabei werden zarte Spuren vom Hippocampus zum Neocortex angelegt, die später, im Tiefschlaf reaktiviert und verstärkt werden. Das Gehirn interagiert dann nicht aktiv mit der Umwelt, es befindet sich in einem „Offline-Modus“. Dennoch ist das Denkorgan in diesem Zustand nicht einfach ausgeknipst. Vielmehr messen Wissenschaftler ganz charakteristische Hirnwellen insbesondere im

¹ Tononi G, Cirelli C. Sleep function and synaptic homeostasis. Sleep Med Rev. 2006;10(1):49-62

² Tononi G, Cirelli C. Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. Neuron. 2014;81(1):12-34

³ Wilhelm I, et al. Sleep slow-wave activity reveals developmental changes in experience-dependent plasticity. J Neurosci 2014 Sep 10;34(37):12568-75

Hippocampus, die sogenannten *sharp wave ripples*. Diese beobachtet man verstärkt bei Ratten, nachdem sie sich tagsüber einen Weg durch ein Labyrinth eingeprägt haben, ebenso wie bei Menschen nach dem Vokabelpauken. Wenn sharp wave ripples auftreten, ruft der Hippocampus das Gelernte im Schlaf quasi nochmals ab und leitet die abgerufene Information zur Langzeitabspeicherung in Richtung Neocortex⁴. Diese Theorie wurde auch durch eine Reihe von Untersuchungen mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie bestätigt^{5,6,7}.

Interessanterweise sind die Tiefschlafphasen vor allem für das deklarative Lernen entscheidend, also wenn es gilt, neue Fakten abzuspeichern. Wie sehr das deklarative Gedächtnis auf Tiefschlaf angewiesen ist, zeigte eine Studie mit Kindern bei denen zuvor ADHS diagnostiziert worden war. Die Probanden hatten verringerte Tiefschlafphasen und Defizite im deklarativen Gedächtnis. Wurde jedoch der Tiefschlaf beziehungsweise die dafür typischen Hirnwellen im Labor mit Hilfe transkranieller Hirnstimulation gezielt angeregt, so konnten die Kinder in Sachen deklarativem Gedächtnis aufholen⁸.

Für das prozedurale Gedächtnis, das zentral ist für das Erlernen von automatisierten Handlungsabläufen wie Klavierspielen oder Fahrradfahren steht vermutlich der REM-Schlaf im Vordergrund. Außerdem zeigte sich, dass ein gutes Gedächtnis letztlich auf den Wechsel beider Schlafphasen angewiesen ist, wie der Tübinger Schlafforscher Jan Born gemeinsam mit seiner Mitarbeiterin Susanne Diekelmann folgerte⁹. Welche

Rolle der REM-Schlaf dabei spielt, ist noch nicht endgültig geklärt⁷.

Doch man darf mit Sicherheit sagen: Lernen und ein gutes Gedächtnis brauchen ausreichenden und regelmäßigen Schlaf. Wissenschaftler aus der Schweiz gehen sogar so weit zu sagen, dass sich anhand des Schlaf-EEGs Aussagen über die intellektuellen Fähigkeiten von Schulkindern treffen lassen^{10,11}. Umgekehrt kann schlechter Schlaf und insbesondere ein gestörter Tiefschlaf, unter dem viele ältere Menschen leiden, eine Ursache dafür sein, dass die Merkfähigkeit mit den Jahren abnimmt¹².

Schlaf und Lernen: Eine Frage des Alters

Allerdings funktioniert das Lernen im Schlaf nicht in jeder Lebensphase gleichermaßen. So stellte ein Forscherteam um Born im Jahr 2008 fest: Im Gegensatz zu erwachsenen Probanden hat Schlaf bei sechs- bis achtjährigen Kindern lediglich einen fördernden Effekt auf das deklarative Gedächtnis. Die Leistung des prozeduralen Gedächtnisses verbesserte sich bei den Kindern nicht. Zwar konnten sie sich vorgegebene Wortpaare besser merken, wenn sie nach dem Memorieren schlafen durften. Galt es jedoch, eine Tastenfolge auf einer Tastatur möglichst schnell und genau zu tippen, hatte Schlaf keinen positiven Einfluss auf diese prozedurale Fingerfertigkeit. Erwachsene Versuchspersonen profitierten dagegen bei beiden Aufgaben und somit bei beiden Gedächtnistypen vom Schlaf¹³.

Beim emotionalen Gedächtnis, also beim Abspeichern von Erlebnissen, die mit starken positiven oder negativen Gefühlen einhergehen, ergaben Studien einen gegenteiligen Effekt: Hier

⁴ Westermann J, Lange T, Textor J, Born J. System consolidation during sleep - a common principle underlying psychological and immunological memory formation. Trends Neurosci. 2015;38(10):585-597

⁵ Takashima A, Petersson KM, Rutters F, et al. Declarative memory consolidation in humans: a prospective functional magnetic resonance imaging study. Proc Natl Acad Sci U S A. 2006;103(3):756-761

⁶ Gais S, Albouy G, Boly M, et al. Sleep transforms the cerebral trace of declarative memories. Proc Natl Acad Sci U S A. 2007;104(47):18778-18783

⁷ Dudai Y, Karni A, Born J. The Consolidation and Transformation of Memory. Neuron. 2015;88(1):20-32

⁸ Prehn-Kristensen A, et al. Transcranial Oscillatory Direct Current Stimulation During Sleep Improves Declarative Memory Consolidation in Children With Attention-deficit/hyperactivity Disorder to a Level Comparable to Healthy Controls. Brain Stimul. 2014;7(6):793-9

⁹ Diekelmann S, Born J. The memory function of sleep. Nat Rev Neurosci. 2010;11(2):114-126

¹⁰ Geiger A, Huber R, Kurth S, Ringli M, Jenni OG, Achermann P. The sleep EEG as a marker of intellectual ability in school age children. Sleep. 2011;34(2):181-189

¹¹ Geiger A, Huber R, Kurth S, Ringli M, Achermann P, Jenni OG. Sleep electroencephalography topography and children's intellectual ability. Neuroreport. 2012;23(2):93-97

¹² Mander BA, Rao V, Lu B, et al. Prefrontal atrophy, disrupted NREM slow waves and impaired hippocampal-dependent memory in aging. Nat Neurosci. 2013;16(3):357-364

¹³ Wilhelm I, Diekelmann S, Born J. Sleep in children improves memory performance on declarative but not procedural tasks. Learn Mem. 2008;15(5):373-377

scheint sich das Erlebte bei Kindern über Nacht stärker ins Gedächtnis zu graben als bei Erwachsenen¹⁴. Das bestätigt die Hypothese, dass der Schlaf vor allem Gedächtnisinhalte festigt, die für den einzelnen von zukünftiger Bedeutung sein könnten^{14,15}.

Es scheint also gewisse Altersunterschiede zu geben beim nächtlichen Rekapitulieren neuer Informationen und wie diese sich ins Gedächtnis graben. Kein Wunder, findet Schlaf Forscher Born: „Schlaf verändert sich im Laufe der Entwicklung und mit ihm auch seine Funktion.“ Daher dürfe man nicht außer Acht lassen, wie Schlaf sich in einer bestimmten Altersgruppe zusammensetzt und welche Bedeutung er in der entsprechenden Entwicklungsstufe spielt, um schließlich zu prüfen, wie er sich möglicherweise für besseres Lernen nutzen lässt.

Gemeinsam mit Reto Huber veröffentlichte Born 2014 einen Übersichtsartikel, der sich der Entwicklung des Schlafs und seiner Bedeutung für das Lernen widmet¹⁶. Darin wird deutlich, dass sich nicht nur die Gesamtlänge des Schlafs von den ersten Lebensmonaten bis hin zum Jugend- und Erwachsenenalter gravierend verändert: Auch seine Zusammensetzung ist einer stetigen Entwicklung unterworfen. So besteht der Schlaf – er beträgt während der ersten ein bis zwei Jahre in der Regel ganze 14 Stunden pro Tag – in den ersten sechs Lebensmonaten zu etwa gleichen Teilen aus REM- und non-REM-Phasen¹⁷. Im Alter von zwei bis drei Jahren verschiebt sich das Verhältnis deutlich zugunsten des non-REM Schlafs. Er macht jetzt rund 75 Prozent des Gesamtschlafs aus. In diesem Alter beginnt auch die Gesamtschlafdauer zu sinken, bis sie sich schließlich im Alter von 12 Jahren bei durchschnittlich rund neun Stunden einpendelt. Während der ganzen Zeit intensiviert sich zudem der Tiefschlaf, der um die Pubertät herum ein

Plateau erreicht. Danach nimmt der Anteil an non-REM-Phasen deutlich ab – bis er sich im jungen Erwachsenenalter auf einem stabilen Niveau einpendelt¹⁸. Gleichzeitig durchläuft auch die Verteilung des Schlafs über den Tag einen stetigen Wandel: Während sich bei Neugeborenen Schlaf und Wachphasen ständig abwechseln, verlängern sich im Laufe der Entwicklung die Wachphasen am Tag und die Tendenz geht immer stärker zu ununterbrochenen Schlafphasen während der Nacht.

Parallel zu diesen Veränderungen beim Schlaf, entwickelt sich auch das vom Hippocampus abhängige Gedächtnis. So kann man bereits bei sechs bis 12-Monate alten Babys beobachten, dass sie sich nach einem Nickerchen besser an Dinge oder Worte erinnern, die sie vor dem Schlafen gesehen oder gehört haben. Und eine Studie von Wissenschaftler um Born und die Leipziger Kognitionswissenschaftlerin Angela Friederici beweist, dass Schlafphasen und die damit einhergehenden Gedächtnisprozesse unabdingbar sind, damit kleine Kinder überhaupt sprechen lernen¹⁹. Demnach lernen neun bis 16 Monate alte Babys im Schlaf Wortbedeutungen zu generalisieren, also zu erkennen, dass beispielsweise mit der Bezeichnung „Hund“ ganz verschiedenartig aussehende Wesen gemeint sein können, oder dass „Auto“ für rote, grüne, blaue, große und kleine motorisierte Fahrzeuge gilt.

Interessanterweise fördert Schlaf bei den Kleinsten vor allem das Generalisieren, während Vorschulkinder sich im Schlummer eher präzise Inhalte einzuprägen scheinen. Für das Herstellen und Verarbeiten genereller Zusammenhänge scheint Schlafen in dieser Altersgruppe eine geringere Rolle zu spielen²⁰. Bis zu einem Alter von rund 14 Jahren beobachten Forscher vorrangig Vorteile für das deklarative Gedächtnis durch das

¹⁴ Wilhelm I, Pohn-Kristensen A, Born J. Sleep-dependent memory consolidation – what can be learnt from children? *Neurosci Biobehav Rev.* 2012;36(7):1718-1728

¹⁵ Wilhelm I, Diekmann S, Molzow I, Ayoub A, Mölle M, Born J. Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance. *J Neurosci.* 2011;31(5):1563-1569

¹⁶ Huber R, Born J. Sleep, synaptic connectivity, and hippocampal memory during early development. *Trends Cogn Sci.* 2014;18(3):141-152

¹⁷ Roffwarg HP, Muzio JN, Dement WC. Ontogenetic development of the

human sleep-dream cycle. *Science.* 1966;152(3722):604-619

¹⁸ Ian G. Campbell IG, Grimb KJ, de Bie E, Irwin Feinberg I. Sex, puberty, and the timing of sleep EEG measured adolescent brain maturation. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012;109(15):5740-5743

¹⁹ Friedrich M, Wilhelm I, Born J, Friederici AD. Generalization of word meanings during infant sleep. *Nat Commun.* 2015;6:6004

²⁰ Gómez RL, Edgin JO. Sleep as a window into early neural development: Shifts in sleep-dependent learning effects across early childhood. *Child Dev Perspect.* 2015;9(3):183-189

Schlafen, also wenn es gilt, sich Wortpaare zu merken oder sich neue Begriffe und deren Bedeutung einzuprägen. Auch das emotionale Gedächtnis profitiert, wie bereits erwähnt, in diesem Alter besonders stark¹⁶. Erst im weiteren Verlauf der Entwicklung bis zum jungen Erwachsenenalter nutzt das Schlafen zunehmend auch dem prozeduralen Gedächtnis. Diese Beobachtungen passen gut zu den Erkenntnissen darüber, wie sich der Schlaf im Laufe der Entwicklung verändert.

Schlaf optimieren für besseren Lernerfolg?

Welche Konsequenzen lassen sich aus diesen Erkenntnissen für die Praxis ableiten? Sicher ist: Eine wichtige Voraussetzung für den Lernerfolg ist in jeder Altersgruppe ausreichender und ungestörter Schlaf. Das belegt auch eine Reihe von Studien. So zeigte sich, dass Kinder, die schnarchen und aufgrund nächtlicher Atemprobleme an Schlafmandel leiden, in der Schule schlechter abschneiden²¹. Und eine Metaanalyse von Anfang 2016, in der Wissenschaftler aus den Niederlanden insgesamt 16 Studien unter die Lupe nahmen, bestätigt, dass Schlafmangel die kognitive Leistungsfähigkeit von Zehn- bis 19-Jährigen einschränkt. Bekommen sie dagegen gezielt mehr und tieferen Schlaf ab, verbessern sich die schulischen Leistungen der Kinder und Jugendlichen. Außerdem profitiert diese Altersgruppe davon, wenn sie direkt nach einer Lerneinheit schlafen darf²².

Born warnt jedoch davor, derartige Effekte allein auf die Einschränkungen des Langzeitgedächtnisses durch den Schlafmangel zu reduzieren. „Übermüdete Schüler können sich schlechter konzentrieren, das heißt, sie bekommen auch weniger vom Unterricht mit“, so Born. Und wer

weniger Inhalte mitbekommt, hat auch weniger Stoff, den er nachts ins Langzeitgedächtnis schieben kann. Ganz in diesem Sinne bestätigt eine australische Studie, dass bereits eine schlaflose Nacht, bei Jugendlichen im Alter von 14-18 Jahren Aufmerksamkeit, Reaktionsgeschwindigkeit und kognitive Leistungsfähigkeit einschränkt²³. Bei zehn- bis 14-jährigen Schülern genügt es bereits, die Schlafdauer auf fünf statt elf Stunden wie in der Kontrollgruppe zu reduzieren, um am Folgetag vergleichbare Einbußen zu verzeichnen. Die Kinder, die in dieser Studie zu wenig Schlaf bekommen haben, waren insbesondere im abstrakten Denken sowie in ihrer verbalen Kreativität eingeschränkt.

Tatsächlich wirkt sich Schlafmangel bei Heranwachsenden nicht alleine auf das Lernen und die Konzentrationsfähigkeit aus, sondern betrifft eine ganze Bandbreite von Verhaltensebenen^{24,25}. So fördert Schlafentzug bei Pubertierenden das Risiko für Depressionen, Ängste und ADHS-ähnliches Verhalten²⁴. Mehr noch: Ausreichender Schlaf ist entscheidend für eine gesunde Entwicklung^{26,27,28} und Funktion des Gehirns. Und das gilt längst nicht nur für Kinder und Jugendliche. Eine Studie aus dem Jahr 2016 hat ergeben, dass sich Schlafmangel auch bei Erwachsenen jenseits der 55 negativ auf Gehirnstruktur und kognitive Leistungsfähigkeit auswirkt²⁹. Bei Probanden, die nach Selbstauskunft wenig Schlaf bekamen, fiel im Magnetresonanztomographen ein stärkerer Verlust an Gehirnmasse auf, als bei Versuchspersonen, die ausreichend schliefen. Auch in kognitiven Tests schnitten die Kurzschläfer schlechter ab.

Über den regelmäßigen und ungestörten Nachtschlaf hinaus, lassen sich die kognitiven Leistungen auch durch einen Mittagsschlaf optimieren – zumindest bei jüngeren Kindern. So

²¹ Brockmann PE, Schlaud M, Poets CF, Urschitz MS. Predicting poor school performance in children suspected for sleep-disordered breathing. *Sleep Med.* 2015;16(9):1077-1083

²² de Bruin EJ, van Run C, Staaks J, Meijer AM. Effects of sleep manipulation on cognitive functioning of adolescents: A systematic review. *Sleep Med Rev.* March 2016. doi:10.1016/j.smrv.2016.02.006

²³ Louca M, Short MA. The effect of one night's sleep deprivation on adolescent neurobehavioral performance. *Sleep.* 2014;37(11):1799-1807

²⁴ Dahl RE, Lewin DS. Pathways to Adolescent Health: Sleep Regulation and Behavior. *J Adolesc Health.* 2002;31(6 Suppl):175-184

²⁵ Sadeh A., Gruber R, Raviv A. Sleep, neurobehavioral functioning, and behavior problems in school-age children. *Child Dev.* 2002;73(2):405-

417

²⁶ Kayser M, Biron D. Sleep and development in genetically tractable model organisms. *Genetics.* 2016;203(1):21-33

²⁷ Telzer EH, Diane Goldenberg D, Fuligni AJ, Lieberman MD, Adriana Galvan A. Sleep Variability in Adolescence is Associated with Altered Brain Development. *Dev Cogn Neurosci.* 2015;14:16-22

²⁸ Kurth S, Olini N, Huber R, LeBourgeois M. Sleep and Early Cortical Development. *Curr Sleep Med Rep.* 2015;1(1):64-73

²⁹ Lo JC, Loh KK, Zheng H, Sim SKY, Chee MWL. Sleep Duration and Age-Related Changes in Brain Structure and Cognitive Performance. *Sleep* 2014;37(7):1171-1178

belegt eine Studie von US-Wissenschaftlern aus dem Jahr 2013, dass Vorschulkinder stark vom Mittagsschlaf profitieren – und zwar umso mehr, je regelmäßiger ihnen ein Schläfchen am Tag vergönnt ist³⁰. Im Experiment konnten sich die Mittagsschlafkinder besser an die räumliche Anordnung von Bildern erinnern, die sie am Vormittag, also vor dem Nickerchen, gesehen hatten. Möglicherweise ist der Tagschlaf bei Kindern, die regelmäßig mittags schlummern intensiver, was zu einem deutlicheren Benefit für das Gedächtnis führt. Das zeigte sich auch im Muster der Hirnwellen.

Eine andere Erklärung könnte sein, dass die Gehirne der Kinder, die ohnehin noch regelmäßig schlafen, schlicht noch nicht dieselbe Reife erreicht haben, wie die Denkgorgane der Kinder, die kein Schläfchen mehr brauchen. In dem Fall halten die Autoren dieser US-Studie es für denkbar, dass bei jüngeren Kindern das Kurzzeitgedächtnis in seiner Kapazität noch limitiert ist. Ein Mittagsschlafchen, bei dem Wissen im Langzeitgedächtnis geschoben wird, würde daher vor allem das Kurzzeitgedächtnis wieder für die nächsten Lerninhalte freischaufeln.

Interessanterweise scheinen Kinder in Sachen prozeduralem Gedächtnis, wenn überhaupt, dann eher vom Mittagsschlaf zu profitieren³¹. Diese Beobachtung lässt sich gut damit vereinbaren, dass die Muster der Hirnwellen, die sich beim mittäglichen Nickerchen erfassen lassen, auf einen weniger tiefen Schlaf hinweisen als während der non-REM-Phasen des Nachtschlafs, die für das deklarative Gedächtnis entscheidend sind. Der positive Effekt des Mittagsschlafs auf das prozedurale Gedächtnis lässt sich selbst noch bei jungen Erwachsenen beobachten – zumindest, wenn sie regelmäßig, also mindestens einmal pro

Woche, tagsüber schlummern¹⁹. Eine aktuelle Untersuchung US-amerikanischer Wissenschaftler deutet allerdings darauf hin, dass die positive Wirkung des Mittagsschlafs bei Vorschulkindern erst zeitversetzt eintritt – also etwa 24 Stunden nach der Lerneinheit³².

Auszeiten fürs Gehirn

Zwar konzentrieren sich bisherige Studien vorwiegend auf Vorschulkinder. Born hält es jedoch für sehr wahrscheinlich, dass zumindest Grundschulkinder ebenfalls vom Mittagsschlafchen profitieren, was sich positiv auf ihre schulische Leistung auswirken könnte. Doch müssen die Kinder zwingend schlafen, um besser zu lernen? Oder sind möglicherweise auch andere geistige Auszeiten, in denen die Kinder meditieren, abschalten oder ihren eigenen Gedanken nachhängen, förderlich für die kognitive Leistungsfähigkeit?

Einige Wissenschaftler gehen davon aus, dass Menschen etwa 30 bis 50 Prozent des Tages geistesabwesend sind³³. Dabei scheint das Gehirn in seiner Aufmerksamkeit permanent zu schwanken³⁴. Das legt nahe, dass das Tagträumen eine neurobiologische Rolle für das Gehirn spielen muss – welche, ist jedoch noch nicht endgültig geklärt³⁵. Zwar ist der Zustand des Tagträumens experimentell schwer zu erfassen³⁶, doch gibt es einige neurobiologische Charakteristika, die das „Tagträumen“ auszeichnen. Das legt nahe, dass das Abschweifen eine Bedeutung für das Gehirn haben muss und sich nicht alleine auf mangelnde Konzentrationsfähigkeit zurückzuführen lässt. So zeigen neurowissenschaftliche Untersuchungen, dass das Gehirn auch beim Tagträumen in einen Offline-Modus umschaltet. Außerdem ist beim Tagträumen das so genannte Default-Mode-Netzwerk des Gehirns aktiv^{37,38,35}. Es handelt sich

³⁰ Kurdziel L, Duclos K, Spencer RMC. Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2013;110(43):17267-17272

³¹ Kurth S, Lassonde JM, Pierpoint LA, et al. Development of nap neurophysiology: preliminary insights into sleep regulation in early childhood. *J Sleep Res*. June 2016. doi:10.1111/jsr.12427

³² Desrochers PC, Kurdziel LBF, Spencer RMC. Delayed benefit of naps on motor learning in preschool children. *Exp brain Res*. 2016;234(3):763-772

³³ Killingsworth MA, Gilbert DT. A wandering mind is an unhappy mind. *Science*. 2010;330(6006):932

³⁴ Kucyi A, Hove MJ, Esterman M, Hutchison RM, Valera EM. Dynamic Brain

Network Correlates of Spontaneous Fluctuations in Attention, *Cereb Cortex*. 2017;27(3):1831-1840

³⁵ Christoff K, Gordon AM, Smallwood J, Smitha R, Schooler JW. Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009;106(21):8719-8724

³⁶ Hawkins GE, Mittner M, Boekel W, Heathcote A, Forstmann BU. Toward a model-based cognitive neuroscience of mind wandering. *Neuroscience*. 2015;310:290-305

³⁷ Bonhage C, Weber F, Exner C, Kanske P. Thinking about thinking: Neural mechanisms and effects on memory. *Neuroimage*. 2016;127:203-214

³⁸ Mittner M, Boekel W, Tucker AM, Turner BM, Heathcote A, Forstmann

dabei um das Ruhezustandsnetzwerk des Gehirns, wobei dieser Begriff irreführend ist, wie der britische Psychologe Jonathan Smallwood von der University of York erklärt: „Die Funktion des 'default-mode' ist nicht Nichtstun, sondern die Gedanken schweifen zu lassen³⁹.“ Denn tatsächlich steht die Aktivität des Default-Mode-Netzwerks nicht für Ruhe, sondern für den freien Fluss von Erinnerungen, Vorstellungen, Plänen und Ideen. Oder, wie es Wissenschaftler um Jonathan Schooler, University of California, Santa Barbara, USA, formulierten: Das Default-Mode-Netzwerk ist wichtig für das von wahrnehmungsbasiertem Input unabhängige Denken⁴⁰.

Interessanterweise ist beim Tagträumen neben dem Default-Mode-Netzwerk auch das exekutive Netzwerk aktiv, das etwa für die Planung und zielgerichtete Ausführung sowie das Initiieren und die Koordination von Handlungen, aber auch für das Arbeitsgedächtnis von Bedeutung ist³⁵. Beide Netzwerke sind am aktivsten, wenn sich Versuchspersonen ihres Tagträumens nicht bewusst sind. Das legt nahe, dass in diesem Zustand zwei Netzwerke mit vermeintlich gegensätzlicher Funktion kooperieren³⁵.

Darüber hinaus ist im Temporallappen ein Netzwerk aktiv, das für das Langzeitgedächtnis wichtig ist. Laut einer Untersuchung kanadischer Wissenschaftler aus dem Jahr 2012 sind alle drei Netzwerke beim Tagträumen gleichermaßen aktiv⁴¹. Die Autoren betonen, dass diese Netzwerke eng kooperieren und das ungerichtete Denken unterstützen – insbesondere dann, wenn gerade

keine Informationen aus der Umgebung aufgenommen und verarbeitet werden müssen.

Eine Meta-Analyse aus dem Jahr 2015 macht ebenfalls deutlich, dass alleine eine Aktivität des Default-Mode-Netzwerk nicht ausreicht, um vom Zustand des Tagträumens auszugehen. Vielmehr müssen mehrere Netzwerke gleichermaßen involviert sein^{42,43} beziehungsweise verschiedene Knotenpunkte, die miteinander interagieren⁴⁴. Die beteiligten Netzwerke modulieren zudem den Zustand des Tagträumens^{45,46,47}. Das unterstreicht, dass es hier nicht um reines Abschalten oder fehlende Aufmerksamkeit geht. Vielmehr ordnen Wissenschaftler das Tagträumen dem ungerichteten spontanen Denken zu, zudem auch das kreative Denken zählt⁴⁸.

Wie das Tagträumen die kognitive Leistungsfähigkeit genau beeinflusst und welche Mechanismen dabei zum Tragen kommen, ist jedoch noch nicht ausreichend erforscht. Sicher ist: Das mentale Abschweifen geht mit hohen Kosten einher^{49,50}. So ist die exekutive Kontrolle des Gehirns und damit das fehlerfreie Handeln eingeschränkt^{50,51}. Welche Nachteile mangelnde Aufmerksamkeit und Handlungskontrolle etwa im Straßenverkehr, im Schulunterricht oder bei Prüfungen mit sich bringen, ist leicht nachvollziehbar^{50,52}.

Möglicherweise entlastet das Tagträumen aber auch das Arbeitsgedächtnis. So scheint neben mangelndem Interesse und Müdigkeit vor allem ein überlastetes Arbeitsgedächtnis dazu beizutragen,

BU. When the brain takes a break: a model-based analysis of mind wandering. *J Neurosci*. 2014;34(49):16286-16295

³⁹ Ayan S. Das Gehirn beim Tagträumen. *Gehirn & Geist*. 2016;4:12-17

⁴⁰ Smallwood J, Tipper C, Brown K, Baird B, Engen H, Michaels JR, Grafton S, Schooler JW. Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009;106(21):8719-8724

⁴¹ Christoff K. Undirected thought: Neural determinants and correlates. *Brain Res*. 2012;1428:51-59

⁴² Fox KCR, Spreng RN, Ellamil M, Andrews-Hanna JR, Christoff K. The wandering brain: Meta-analysis of functional neuroimaging studies of mind-wandering and related spontaneous thought processes. *NeuroImage*. 2015;111:611-621

⁴³ Paul Selk P, Risko EF, Smilek D, Schacter DL. Mind-wandering with and without intention. *Trends Cogn Sci*. 2016;20(8):605-617

⁴⁴ Andrews-Hanna JR. The brain's default network and its adaptive role in internal mentation. *Neuroscientist*. 2012;18(3):251-270

⁴⁵ Hasenkamp W, Wilson-Mendenhall CD, Duncan E, Barsalou LW. Mind wandering and attention during focused meditation: A fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*. 2012;59(1):750-760

⁴⁶ Esterman M, Noonan SK, Rosenberg M, DeGutis J. In the zone or zoning out? Tracking behavioral and neural fluctuations during sustained attention. *Cereb Cortex*. 2013;23(11):2712-2723

⁴⁷ Mittner M, Hawkins GE, Boekel W, Forstmann BU. A neural model of mind wandering. *Trends Cogn Sci*. 2016;20(8):570-578

⁴⁸ Christoff K, Irving ZC, C. R. Fox KCR, Nathan Spreng RN, Andrews-Hanna JR. Mind-wandering as spontaneous thought: a dynamic framework. *Nat Rev Neurosci*. 2016;17(11):718-731

⁴⁹ Smallwood J. Distinguishing how from why the mind wanders: a process-occurrence framework for self-generated mental activity. *Psychol Bull*. 2013;139(3):519-535

⁵⁰ Smallwood J, Schooler JW. The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness. *Ann Rev Psychol*. 2015;66:487-518

⁵¹ Mittner M, Boekel W, Tucker AM, Turner BM, Heathcote A, Forstmann BU. When the brain takes a break: a model-based analysis of mind wandering. *J Neurosci*. 2014;34(49):16286-16295

⁵² Smallwood J, Fishman DJ, Schooler JW. Counting the cost of an absent mind: mind wandering as an underrecognized influence on educational performance. *Psycho Bull Rev*. 2007;14(2):230-236

wenn Menschen beim Lesen mit ihren Gedanken abschweifen⁵³.

Dazu kommt, dass das spontane, kreative Denken nur möglich ist, wenn das Gehirn vom Input äußerer Reize abgeschirmt ist^{54,55}. Neben Kreativität profitiert auch das Planen künftiger Handlungen vom Tagträumen⁵⁵. Außerdem wird die Dishabituation unterstützt, was dem Gehirn die Möglichkeit gibt, sich auf neue Gegebenheiten und neue Handlungsmuster einzustellen⁵⁵.

Es liegt also nahe, Strategien zu entwickeln, das Tagträumen während des Unterrichts zu vermeiden. So ergab eine Studie, dass Online-Lektionen, die direkt mit Tests zum gelehrten Inhalt verknüpft werden, dazu beitragen, dass Studenten weniger abschweifen – und gleichzeitig besser lernen⁵⁶.

Andererseits mag es von Vorteil sein, Techniken zu erlernen, den eigenen Gedanken bewusst freien Lauf zu lassen, um sich bei Bedarf aber auch gezielt wieder zu sammeln⁵⁷. Denn interessanterweise lässt sich absichtliches und unabsichtliches Tagträumen neurobiologisch unterscheiden⁴³. Wie eine aktuelle Studie von Forschern am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig ergab, profitieren insbesondere Menschen, die ihre Gedanken bewusst freien Lauf lassen können, von den Vorteilen des Tagträumens⁵⁷.

Sollte sich dies bestätigen, ist das Bildungssystem hier gefragt, das Potenzial des Tagträumens und den gezielten Umgang damit ebenso zu berücksichtigen wie die Notwendigkeit eines ausreichenden Schlafs, der bei kleineren Kindern möglicherweise sogar einen regelmäßigen Mittagsschlaf beinhaltet. Es wäre daher sinnvoll, Unterrichtszeiten, aber auch die Organisation von Unterrichtsinhalten an diese Bedürfnisse

anzupassen. In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass auch von Seiten der Chronobiologie immer wieder der Appell laut wird, Schulzeiten an die natürlich vorgegebenen und altersbedingten Schlafrhythmen anzupassen⁵⁸. Gerade in der Pubertät verschieben sich diese weit nach hinten⁵⁹, so dass Teenager kaum die Chance bekommen, ausgeschlafen zum Unterricht zu erscheinen und ihr Gedächtnis in der Nacht auf Vordermann zu bringen. Erfolgreiches Lernen braucht eben nicht nur ausreichenden Schlaf und Raum für Ruhephasen des Gehirns, sondern auch noch alles zur rechten Zeit.

⁵³ Unsworth N, Brittany D. McMillan BD. Mind wandering and reading comprehension: examining the roles of working memory capacity, interest, motivation, and topic experience. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 2013;39(3):832-842

⁵⁴ Smallwood J, Brown KS, Tipper C, Giesbrecht B, Franklin MS, Mrazek MD, Carlson JM, Schooler JW. Pupillometric evidence for the decoupling of attention from perceptual input during offline thought. *PLoS One.* 2011;6(3):e18298

⁵⁵ Schooler JW, Smallwood J, Christoff K, Handy TC, Reichle ED, Sayette MA. Meta-awareness, perceptual decoupling and the wandering mind. *Trends Cogn Sci.* 2011 Jul;15:319-326

⁵⁶ Szpunar KK, Novall Y, Khan NY, Daniel L. Schacter DL. Interpolated

memory tests reduce mind wandering and improve learning of online lectures. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(16):6313-6317

⁵⁷ Golchert J, Smallwood J, Jefferies E, Seli P, Huntenburg JM, Liem F, Lauckner M, Oligschläger S, Bernhardt B, Villringer A, Margulies DS. Individual variation in intentionality in the mind-wandering state is reflected in the integration of the default-mode, fronto-parietal, and limbic networks. *Neuroimage.* 2017;146:226-235

⁵⁸ Reinberger S. Acht Uhr ist zu früh zum Lernen. *Gehirn & Geist.* 2015;9:16-19

⁵⁹ Crowley SJ, Acebo C, Carskadon MA. Sleep, circadian rhythms, and delayed phase in adolescence. *Sleep Med.* 2007;8(6):602-612

Literaturempfehlungen

Wie beeinflussen Schlaf oder Tagträume die Funktion des Gehirns von Kindern und Jugendlichen?

Wir haben drei Experten auf dem Gebiet der Schlaf- und Gedächtnisforschung gefragt, welche 30 neurowissenschaftlichen Publikationen sie für die wichtigsten halten, um obige Frage beantworten zu können.

Unter Neurowissenschaften verstehen wir die naturwissenschaftliche Erforschung des Gehirns unter Einsatz technischer Methoden, die den Aufbau oder die Funktionsweise von Nervenzellen, Nervenzellverbänden oder des gesamten Organs erfassen.

Prof. Dr. Jan Born, Dr. Reto Huber und Dr. Matthias Mittner haben uns bei unserem Projekt unterstützt und ihre Literaturempfehlungen zum Thema zusammengestellt.

1.

*Prof. Dr. **Jan Born** ist Direktor des Instituts für Medizinische Psychologie und Verhaltensneurobiologie an der Universität Tübingen. Sein Forschungsschwerpunkt betrifft die Dynamik der Gedächtnisbildung in biologischen Systemen. Er ist Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften sowie der Nationalen Akademie der Wissenschaften – Leopoldina. Für seine Forschung wurde er 2010 mit dem Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgezeichnet.*

Desrochers, Phillip C, Laura B F Kurdziel, and Rebecca M C Spencer. 2016. "Delayed Benefit of Naps on Motor Learning in Preschool Children." *Experimental Brain Research* 234 (3): 763–72.

Friedrich, Manuela, Ines Wilhelm, Jan Born, and Angela D Friederici. 2015. "Generalization of Word

Meanings during Infant Sleep." *Nature Communications* 6 (January): 6004.

Gomez, Rebecca L., Katharine C. Newman-Smith, Jennifer H. Breslin, and Richard R. Bootzin. 2011. "Learning, Memory, and Sleep in Children." *Sleep Medicine Clinics* 6 (1). Elsevier: 45–57.

Gómez, Rebecca L, and Jamie O Edgin. 2015. "Sleep as a Window into Early Neural Development: Shifts in Sleep-Dependent Learning Effects across Early Childhood." *Child Development Perspectives* 9 (3): 183–89.

Holz, Johannes, Hannah Piosczyk, Nina Landmann, Bernd Feige, Kai Spiegelhalder, Dieter Riemann, Christoph Nissen, and Ulrich Voderholzer. 2012. "The Timing of Learning before Night-Time Sleep Differentially Affects Declarative and Procedural Long-Term Memory Consolidation in Adolescents." *PloS One* 7 (7): e40963.

Huber, Reto, and Jan Born. 2014. "Sleep, Synaptic Connectivity, and Hippocampal Memory during Early Development." *Trends in Cognitive Sciences* 18 (3): 141–52.

Kurdziel, Laura, Kasey Duclos, and Rebecca M C Spencer. 2013. "Sleep Spindles in Midday Naps Enhance Learning in Preschool Children." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (43): 17267–72.

Kurth, Salome, Peter Achermann, Thomas Rusterholz, and Monique K Lebourgeois. 2013. "Development of Brain EEG Connectivity across Early Childhood: Does Sleep Play a Role?" *Brain Sciences* 3 (4): 1445–60.

Prehn-Kristensen, Alexander, Manuel Munz, Ina Molzow, Ines Wilhelm, Christian D Wiesner, and Lioba Baving. 2013. "Sleep Promotes Consolidation of Emotional Memory in Healthy Children but Not in Children with Attention-Deficit Hyperactivity Disorder." *PloS One* 8 (5): e65098.

Rasch, Björn, and Jan Born. 2013. "About Sleep's Role in Memory." *Physiological Reviews* 93 (2): 681–766.

Ringli, Maya, and Reto Huber. 2011. "Developmental Aspects of Sleep Slow Waves: Linking Sleep, Brain Maturation and Behavior." *Progress in Brain Research* 193 (January): 63–82.

Wilhelm, I, A Prehn-Kristensen, and J Born. 2012. "Sleep-Dependent Memory Consolidation--What Can Be Learnt from Children?" *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 36 (7): 1718–28.

Wilhelm, Ines, Susanne Diekelmann, and Jan Born. 2008. "Sleep in Children Improves Memory Performance on Declarative but Not Procedural Tasks." *Learning & Memory (Cold Spring Harbor, N.Y.)* 15 (5): 373–77.

Wilhelm, Ines, Michael Rose, Kathrin I Imhof, Björn Rasch, Christian Büchel, and Jan Born. 2013. "The Sleeping Child Outplays the Adult's Capacity to Convert Implicit into Explicit Knowledge." *Nature Neuroscience* 16 (4): 391–93.

2.

*Prof. Dr. **Reto Huber** leitet das Zentrum für Schlaf-forschung am Kinderspital der Universität Zürich und die Abteilung Entwicklungs pädiatrie an der Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie der Universität Zürich, CH. Nach seiner Promotion in Neurobiologie war er als PostDoc im Labor von Prof. Tononi, University of Wisconsin-Madison, USA, tätig, bevor er 2007 mit einer hochdotierten Förderungsprofessur des Schweizerischen Nationalfonds nach Zürich zurückkehrte und in 2016 eine Professur für Entwicklungsneurobiologie erhielt.*

Brockmann PE, Schlaud M, Poets CF, Urschitz MS. Predicting poor school performance in children suspected for sleep-disordered breathing. *Sleep Med.* 2015;16(9):1077-1083.

Campbell IG, Grimm KJ, de Bie E, Feinberg I. Sex, puberty, and the timing of sleep EEG measured adolescent brain maturation. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012;109(15):5740-5743.

Carskadon MA, Acebo C, Jenni OG. Regulation of adolescent sleep: implications for behavior. *Ann N Y Acad Sci.* 2004;1021:276-291.

Crowley SJ, Acebo C, Carskadon MA. Sleep, circadian rhythms, and delayed phase in adolescence. *Sleep Med.* 2007;8(6):602-612.

Dahl RE, Lewin DS. Pathways to adolescent health sleep regulation and behavior. *J Adolesc Heal.* 2002;31(6):175-184.

de Bruin EJ, van Run C, Staaks J, Meijer AM. Effects of sleep manipulation on cognitive functioning of adolescents: A systematic review. *Sleep Med Rev.* March 2016.

Huber R, Born J. Sleep, synaptic connectivity, and hippocampal memory during early development. *Trends Cogn Sci.* 2014;18(3):141-152.

Jenni OG, Achermann P, Carskadon MA. Homeostatic sleep regulation in adolescents. *Sleep.* 2005;28(11):1446-1454.

Kayser MS, Biron D. Sleep and Development in Genetically Tractable Model Organisms. *Genetics.* 2016;203(1):21-33.

Kurth S, Olini N, Huber R, LeBourgeois M. Sleep and Early Cortical Development. *Curr sleep Med reports.* 2015;1(1):64-73.

Prehn-Kristensen A, Munz M, Göder R, et al. Transcranial oscillatory direct current stimulation during sleep improves declarative memory consolidation in children with attention-deficit/hyperactivity disorder to a level comparable to healthy controls. *Brain Stimul.* 2014;7(6):793-799.

Roenneberg T, Kuehnle T, Pramstaller PP, et al. A marker for the end of adolescence. *Curr Biol.* 2004;14(24):R1038-R1039.

Roffwarg HP, Muzio JN, Dement WC. Ontogenetic development of the human sleep-dream cycle. *Science.* 1966;152(3722):604-619.

Sadeh A, Gruber R, Raviv A. Sleep, Neurobehavioral Functioning, and Behavior Problems in School-Age Children. *Child Dev.* 2002;73(2):405-417.

Telzer EH, Goldenberg D, Fuligni AJ, Lieberman MD, Gálvan A. Sleep variability in adolescence is associated with altered brain development. *Dev Cogn Neurosci*. 2015;14:16-22.

Wilhelm I, Kurth S, Ringli M, et al. Sleep slow-wave activity reveals developmental changes in experience-dependent plasticity. *J Neurosci*. 2014;34(37):12568-12575.

Wilhelm I, Rose M, Imhof KI, Rasch B, Büchel C, Born J. The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nat Neurosci*. 2013;16(4):391-393.

Yaffe K, Nasrallah I, Hoang TD, et al. Sleep Duration and White Matter Quality in Middle-Aged Adults. *Sleep*. 2016;39(9):1743-1747.

3.

*Dr. **Matthias Mittner** ist Associate Professor für kognitive Neurowissenschaften am Institut für Psychologie der Universität Tromsø, Norwegen. Nach seinem Studium an der Universität Göttingen hat er seinen PhD in Psychologie an der Universität Frankfurt und dem Bernstein Center for Computational Neuroscience abgeschlossen und Post-doc Stellen am Max-Planck-Institute für experimentelle Medizin und der Universität Amsterdam absolviert. Seine gegenwärtigen Forschungsschwerpunkte umfassen den kognitiven und neurowissenschaftlichen Hintergrund des Tagträumens (mind-wandering) und des ruhenden Gehirns. Zudem untersucht Dr. Mittner das Potential nicht-invasiver Gehirnstimulationsmethoden und beschäftigt sich mit Verstärkendem Lernen.*

Andrews-Hanna JR. The brain's default network and its adaptive role in internal mentation. *Neuroscientist*. 2012;18(3):251-270

Christoff K. Undirected thought: neural determinants and correlates. *Brain Res*. 2012;1428:51-59

Christoff K, Gordon AM, Smallwood J, Smith R, Schooler JW. Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009;106(21):8719-8724

Christoff K, Irving ZC, Fox KCR, Spreng RN, Andrews-Hanna JR. Mind-wandering as spontaneous thought: a dynamic framework. *Nat Rev Neurosci*. 2016;17(11):718-731

Esterman M, Noonan SK, Rosenberg M, Degutis J. In the zone or zoning out? Tracking behavioral and neural fluctuations during sustained attention. *Cereb Cortex*. 2013;23(11):2712-2723

Fox KCR, Spreng RN, Ellamil M, Andrews-Hanna JR, Christoff K. The wandering brain: meta-analysis of functional neuroimaging studies of mind-wandering and related spontaneous thought processes. *Neuroimage*. 2015;111:611-621

Hasenkamp W, Wilson-Mendenhall CD, Duncan E, Barsalou LW. Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*. 2012;59(1):750-760

Kucyi A, Hove MJ, Esterman M, Hutchison RM, Valera EM. Dynamic Brain Network Correlates of Spontaneous Fluctuations in Attention. *Cereb Cortex*. February 2016. doi:10.1093/cercor/bhw029.

Mason MF, Norton MI, Van Horn JD, Wegner DM, Grafton ST, Macrae CN. Wandering Minds: The Default Network and Stimulus-Independent Thought. *Science* (80-). 2007;315(5810):393-395

McVay JC, Kane MJ, Kwapil TR. Tracking the train of thought from the laboratory into everyday life: an experience-sampling study of mind wandering across controlled and ecological contexts. *Psychon Bull Rev*. 2009;16(5):857-863

Mittner M, Boekel W, Tucker AM, Turner BM, Heathcote A, Forstmann BU. When the brain takes a break: a model-based analysis of mind wandering. *J Neurosci*. 2014;34(49):16286-16295

- Mittner M, Hawkins GE, Boekel W, Forstmann BU. A Neural Model of Mind Wandering. *Trends Cogn Sci.* 2016;20(8):570-578
- Mittner M, Hawkins GE, Boekel W, Forstmann BU. A Neural Model of Mind Wandering. *Trends Cogn Sci.* 2016;20(8):570-578
- Schooler JW, Smallwood J, Christoff K, Handy TC, Reichle ED, Sayette MA. Meta-awareness, perceptual decoupling and the wandering mind. *Trends Cogn Sci.* 2011;15(7):319-326
- Seli P, Risko EF, Smilek D, Schacter DL. Mind-Wandering With and Without Intention. *Trends Cogn Sci.* 2016;20(8):605-617
- Smallwood J. Distinguishing how from why the mind wanders: a process-occurrence framework for self-generated mental activity. *Psychol Bull.* 2013;139(3):519-535
- Smallwood J, Brown KS, Tipper C, et al. Pupillometric evidence for the decoupling of attention from perceptual input during offline thought. *PLoS One.* 2011;6(3):e18298
- Smallwood J, Fishman DJ, Schooler JW. Counting the cost of an absent mind: Mind wandering as an underrecognized influence on educational performance. *Psychon Bull Rev.* 2007;14(2):230-236
- Smallwood J, Schooler JW. The science of mind wandering: empirically navigating the stream of consciousness. *Annu Rev Psychol.* 2015;66:487-518
- Smallwood J, Tipper C, Brown K, et al. Escaping the here and now: evidence for a role of the default mode network in perceptually decoupled thought. *Neuroimage.* 2013;69:120-125
- Szpunar KK, Khan NY, Schacter DL. Interpolated memory tests reduce mind wandering and improve learning of online lectures. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(16):6313-6317
- Unsworth N, McMillan BD. Mind wandering and reading comprehension: examining the roles of working memory capacity, interest, motivation, and topic experience. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn.* 2013;39(3):832-842