

Jugend, Körper und Emotion. Eine Schnittmenge aus neurobiologischer Sicht

Anne-Katharina Wietasch



Anne-Katharina
Wietasch

Zusammenfassung

Riskantes und normabweichendes Verhalten kommt neben ausgeprägten Stimmungsschwankungen in der Jugendzeit bei relativ mehr Menschen vor, als in anderen Lebensphasen. Diese Beobachtungen werden mit neueren Befunden zur Reifung des Gehirns in der Jugendzeit in Beziehung gesetzt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf Hirnarealen, die mit der Verarbeitung und Regulation von Emotionen in Zusammenhang gebracht werden. Die Suche nach Sensation und Risiko kann in diesem Zusammenhang als Möglichkeit zu lernen interpretiert werden. Subjektive und objektive Normgrenzen selbst bestimmen und einhalten zu können, ist ein wichtiger Schritt im Übergang in ein Leben als selbstbestimmter Erwachsener.

Schlagwörter: Hirnreifung, Adoleszenz, Synaptogenese, Emotion, Risikoverhalten

Abstract

Risk-taking and deviant behaviours are next to intense mood shiftings a common feature of adolescence, but not other periods of life. These observations are related to recent findings of the maturing brain during these years. The main focus is thereby put on the neural substrate of emotion and the regulation of emotional processes. In this context, risk-taking behaviour and sensation-seeking can be taken as opportunity to learn. While becoming a self-governed grown-up, it is an important step to realize and respect common standards of behaviour and to develop own standards.

Keywords: Brain maturing, adolescence, synaptogenesis, emotion, risk-taking behaviour

Der Augenblick der Pubertät ist
für beide Geschlechter der Augenblick,
in welchem die Gestalt der höchsten
Schönheit fähig ist; aber man darf
wohl sagen: Es ist nur ein Augenblick.
Johann Wolfgang von Goethe

Zumindest Goethe gewann seinerzeit der Pubertät etwas Positives ab, und das ausgerechnet den Körper betreffend. Betroffene Pubertierende einerseits und ih-

re Angehörigen andererseits scheinen dagegen im heutigen Alltagsverständnis des Begriffes vorwiegend negative, oder zumindest doch verwirrende Assoziationen zu haben, eben gerade auch im Hinblick auf den pubertierenden Körper. Der bringt plötzlich Pickel, Brüste und Haare hervor, wo sie zuvor noch nicht waren und – wie wir seit einigen Jahren auch wissen – macht es den Jugendlichen schwer, emotional sortiert auf diese Vorgänge zu reagieren.

Der folgende Artikel setzt sich mit der Schnittmenge von Jugend, Körper und Emotion auseinander, die nach den neurobiologischen Befunden der letzten Jahre u.a. im Gehirn zu suchen ist.

1. Jugendliche und Pubertierende testen die Grenzen der Norm aus

Schon Sokrates im antiken Griechenland klagte: „Die Jugend von heute liebt den Luxus, hat schlechte Manieren und verachtet die Autorität. Sie widersprechen ihren Eltern, legen die Beine übereinander und tyrannisieren ihre Lehrer“. Auch im 19. Jahrhundert war die Jugend unbeliebt: Z.B. beschrieb die Jugendhilfe 1880 unter dem Jugend-Begriff eine männliche Person im Alter von 13 bis 18 Jahren, die als verwahrlost und kriminell eingestuft wurde (Roth 1983). Betrachtet man aktuellere Studien, die die Rate krimineller Handlungen mit dem Lebensalter in Beziehung setzen, so kann tatsächlich ein massiver Anstieg antisozialen Verhaltens ab dem siebenten Lebensjahr mit einem deutlichen Höhepunkt zum 17. Lebensjahr beobachtet werden (Moffitt 1993). In einer Stichprobe junger Männer aus Neuseeland fand sich dabei ein Anteil von nur 7%, die in der kritischen Altersspanne um das 17. Lebensjahr *nicht* in irgendwelche illegalen Aktivitäten involviert waren. In diese Statistiken gehen allerdings auch Kleinstvergehen, wie Alkoholgenuß in zu jungen Jahren ein. Im jungen Erwachsenenalter lassen die meisten Personen aber wieder von illegalen Handlungen ab (Blumstein/Cohen 1987). Es wäre jedoch unfair, die Jugend im Schwerpunkt anhand des Kriteriums des kriminellen Verhaltens zu definieren, auch wenn diese etwas pointierte Aufzählung verdeutlicht, dass Verhalten, das die Norm ein wenig oder deutlich überschreitet, offensichtlich in dieser Phase von anteilig mehr Menschen gezeigt wird, als in anderen Lebensphasen. Weiter unten werden wir sehen, warum ein solches „Austesten der über die Lebensspanne gültigen Normgrenzen“ wichtig sein kann.

Der Begriff der *Jugend* ist heute weit positiver besetzt als früher und beschreibt zeitlich abgrenzend grob die Phase zwischen körperlicher Geschlechtsreife und emotionaler und finanzieller Autonomie etwa zwischen dem 15. und dem 25. Lebensjahr. Der Begriff *Pubertät* konzentriert sich im engeren Sinne auf die sexuelle Reifung des Körpers. Ihr Beginn ist eindeutig definiert über die Ausschüttung von Geschlechtshormonen im Gehirn, die zur Ausprägung sekundärer Geschlechtsmerkmale und der Geschlechtsreife führt (Berk 2004). Die Definitionen zeigen, dass die heutige Sicht der Dinge Sokrates Ärger nicht mehr zu teilen scheint, was wohl auch durch ein besseres Verständnis dafür begründet ist, welche zentralen Prozesse das Verhalten von Jugendlichen bei den verschie-

denen Entwicklungsschritten mit beeinflussen. Im folgenden sollen zunächst relevante Abläufe im Gehirn generell und in der Jugendzeit beschrieben werden, bevor auf zentrale Lernprozesse eingegangen wird, die einen wichtigen Einfluss auf das Verhalten Jugendlicher haben.

2. Das reife Gehirn bietet die „hardware“ für komplexe Lernprozesse

2.1 Die Interaktion von Gehirn und Umwelt über die Lebensspanne

Was wissen wir heute über die Interaktion des Gehirns mit der Umwelt? Für ein besseres Verständnis sollen die wichtigsten Aspekte dieser Wechselwirkung kurz beschrieben werden: Die Neuronenverbände des Gehirns stellen die Basis für *Repräsentationen* von Umständen unterschiedlichster Art dar: z.B. die Repräsentation bestimmter Bewegungsabläufe oder von einzelnen Fakten. Wenn ein Neuron immer dann aktiv wird, wenn ein bestimmter Input z.B. über das visuelle System eintrifft, dann „repräsentiert“ es diesen Input. Werden zwei benachbarte Neurone zeitgleich aktiv, wird ihre Verbindung gestärkt und dies ist eine grundlegende Voraussetzung von Lernprozessen. Dabei kann sich das zentrale Nervensystem an die Lebenserfahrung eines Individuums anpassen, denn Neurone können abhängig von der Funktion wachsen, selektiert werden oder Verbindungen untereinander ausdifferenzieren. Diese Flexibilität des neuronalen Systems wird als *Neuroplastizität* bezeichnet. Sie ist v.a. in der Kindheit groß, variiert über die Lebensspanne in ihrem Ausmaß und nimmt mit steigendem Alter zunehmend ab. Das ist durchaus sinnvoll, denn ältere Menschen haben im Allgemeinen aus der Vielzahl von Erfahrungen schon viel Relevantes optimal gelernt („Weisheit des Alters“). Für neuronale Anpassungsprozesse sind v.a. solche Situationen wichtig, die zum ersten Mal erfahren werden. In jüngeren Jahren treffen Individuen entsprechend ihrer geringeren Lebenserfahrung häufiger auf neue Situationen, z.B. wenn gelernt werden soll, sich unabhängig von den nächsten Bezugspersonen zurecht zu finden. Längerfristige Erfahrungen (z.B. Mutter-Kind-Interaktionen oder die Erfahrung der eigenen Rolle im sozialen System) führen dazu, dass neuronale Netzwerke über die Zeit nicht mehr umgebaut werden, sondern sich stabilisieren. Dabei repräsentieren sie schließlich die Quintessenz dessen, was die individuelle Erfahrung wiederholt erbracht hat (Schore, 2000) – es muss nichts Neues mehr dazugelernt werden¹. *Emotionen* üben dabei einen wichtigen Einfluss auf Lernprozesse aus, denn emotionales Erleben kann die Effizienz des Lernens verbessern (z.B. Cahil u.a., 1994). Das sogenannte *Belohnungssystem* im Gehirn wird beispielsweise immer dann aktiv, wenn etwas Neues passiert, also auch etwas, das außerhalb der eigenen subjektiven oder objektiven Norm geschieht. Das System signalisiert hier die Möglichkeit, etwas zu lernen und dies ist angesichts der Fülle an Informationen, denen das Gehirn permanent ausgesetzt ist eine wichtige Strukturierungshilfe: Was ist wichtig und was unwichtig? Was sollte gelernt werden und

Die Neuronenverbände des Gehirns stellen die Basis für Repräsentationen von Umständen unterschiedlichster Art dar

Neuroplastizität

emotionales Erleben verbessert die Effizienz des Lernens

was ist schon bekannt? Diese Zusammenhänge werden z.B. in der Psychotherapie genutzt, denn hier geht es häufig um ein Umlernen bezüglich ungünstiger Verhaltensstrategien (z.B. vermeidet ein Patient, der gern eine Fernreise unternehmen möchte das Fliegen, weil er Angst im Flugzeug empfindet). Reines Argumentieren nützt hier meist wenig (die Patienten wissen im Allgemeinen um das objektive Risiko zu Fliegen). Sehr viel effektiver ist das Lernen über die Erfahrung (obwohl die Angst groß ist, in ein Flugzeug steigen – und eine neue Erfahrung machen). Verschiedene Studien konnten die Effekte derartiger psychotherapeutischer Verfahren entsprechend schon auf neuronaler Ebene nachweisen (z.B. Brody et al., 1998; Brody et al. 2001). Eine anschauliche Übersicht über die experimentelle Befundlage zu diesen komplexen Vorgängen, die hier nur kurz angerissen werden können, findet sich bei Spitzer (2002).

2.2 Das reifende Gehirn in der Jugendzeit

Die Reifung des menschlichen Gehirns setzt schon früh im Mutterleib ein und bis zum Ende der Schwangerschaft sind die grundlegenden Hirnstrukturen fertig ausgebildet. Beim sechsjährigen Kind hat das Gehirn bereits 90% der Größe erwachsener Gehirne erreicht (Giedd 2004). Was passiert in der Jugendzeit? Die Wissenschaft beschäftigte sich hier in den letzten Jahren zunächst einmal mit der *Struktur* des Gehirns im Entwicklungsverlauf. Bildgebende Verfahren, wie die Magnetresonanztomographie (MRT) können z.B. weiße von grauer Masse im Gehirn abbilden. Beide Substanzen erfüllen dabei eine wichtige Funktion zur Anpassung der „hardware“:

Ist *weiße Masse* auf den strukturellen Bildern zu sehen, so verweist dies auf die Substanz Myelin, die eine lipidreiche Hülle um die Axone der Nervenzellen bildet und sie damit elektrisch isoliert. Kleine Einschnürungen in dieser Hülle erlauben eine *sehr schnelle Erregungsleitung entlang des Axons* und damit eine weit schnellere Weitergabe der Information von Nervenzelle zu Nervenzelle, als dies ohne die Myelinschicht möglich wäre. Dies hilft, Information aus multiplen Quellen schnell zu integrieren und komplexe Sachverhalte kognitiv effizient einzuordnen (Giedd 2004). Die Menge weißer Masse, d.h. der Anteil schnell leitender Faserverbindungen, erhöht sich über Kindheit und Adoleszenz stetig. (Giedd 2004; Pfefferbaum u.a. 1994). Giedd u.a. (1999) untersuchten dies z.B. an einer Personengruppe in der Altersspanne von vier bis 21 Jahren. Sie fanden, dass motorische und sensorische Areale des Gehirns schon in den ersten Lebensjahren voll myelinisiert sind, während Axone in frontalen und parietalen Regionen dagegen erst in der Adoleszenz vollständig von Myelin umhüllt werden.

Die zunehmende Isolierung der Axone hat auch Auswirkungen auf die Funktion des Gehirns. Dies wird z.B. anhand des dicken Faserbündels, das die linke mit der rechten Hirnhälfte verbindet, deutlich: Das Corpus Callosum sorgt für die Integration verschiedener Funktionen über beide Hirnhälften, wie z.B. die Integration sensorischer Felder. Erfasst man solche Fähigkeiten über den Verlauf von Kindheit und Jugend, so ist erwartungsgemäß eine stetige und an-

Die Menge weißer
Masse, d.h. der
Anteil schnell
leitender
Faserverbindungen,
erhöht sich über
Kindheit und
Adoleszenz stetig.

haltende Verbesserung der Leistungen zu beobachten, die mit einer Zunahme der Myelinisierung der Fasern im Corpus Callosum einhergeht (Paus 2005).

Von weißer Masse ist die *graue Masse* im Gehirn auf strukturellen MRT-Bildern gut zu unterscheiden. Sie zeigt eine Mischung von neuronalen Zellkörpern, Axonen, Dendriten, Gliazellen und Blutgefäßen an. Das Gehirn fängt relativ früh in der postnatalen Entwicklung an, neue Synapsen, also Verbindungen von einer Nervenzelle zur anderen, zu bilden (*Synaptogenese*). Dabei übersteigt die Anzahl der Synapsen bei Kindern weit die Anzahl, die im erwachsenen Hirn zu finden ist (Huttenlocher u.a. 1983). Die endgültige Anzahl und Art der Verbindungen der Zellen untereinander ist dabei bis in die Jugendzeit und darüber hinaus nicht abschließend festgelegt und gerade die Pubertät scheint eine Zeit besonders starker „Umbauaktivitäten“ im Gehirn zu sein. Dies wurde schon früh mittels erster post-mortem Studien belegt (z.B. Yakovlev/Lecours 1967) und wird heute durch bildgebende Verfahren, die das Hirn in vivo bei der Reifung begleiten können, bestätigt (Giedd u.a. 1996; Pfefferbaum u.a. 1994; Reiss u.a. 1996; Sowell u.a. 1999). Z.B. beobachteten Giedd u.a. (1999) bei ihren 10 bis 12-jährigen Probanden einen deutlichen Anstieg des Volumens grauer Masse im Frontal- und Parietallappen, dem ein subtiler aber signifikanter Abfall des Volumens in eben diesen Regionen folgte. Besonders bemerkenswert war, dass in bestimmten Bereichen des präfrontalen Kortex (PFC) der Abfall grauer Masse stetig weiter voranschritt und erst im Erwachsenenalter zum Abschluss kam. Ähnliche Ergebnisse fanden Gogtay u.a. (2004): Auch hier war eine späten Reifung im PFC² zu beobachten. Dabei scheint die zeitliche Neuorganisation kortikaler Strukturen sowohl der ontogenetischen, als auch der evolutionär angelegten Ordnung bei der Entwicklung einzelner Funktionen zu entsprechen: Teile des Gehirns, die mit basalen sensorischen und motorischen Funktionen assoziiert sind, reifen früh. Später folgen parietale Areale, die in räumliche Orientierung, Sprache und Aufmerksamkeitsfunktionen involviert sind und schließlich frontale Bereiche, die an integrierenden Funktionen wie Planung, Handlungskontrolle und Emotionsregulation beteiligt sind.

Der Prozess der Neuorganisation grauer Masse verläuft nicht linear und stetig über das gesamte Gehirn, wie die Umhüllung der Axone mit Myelin. Vielmehr scheinen in unterschiedlichen Hirnregionen Synaptogenese und Ausdünnung simultan, im Wechselspiel mit weiteren Einflussfaktoren und mit unterschiedlichen Zeitverläufen aufzutreten (Durstun/Casey 2006)³.

Wozu dient dieses Muster von Synaptogenese einerseits und Ausdünnen andererseits? Es konnte beobachtet werden, dass großflächig verknüpfte Areale zugunsten fokaler Regionen ausgedünnt werden, in denen sich zeitgleich verstärkt synaptische Verbindungen bilden. Sowell u.a. (2004) zeigten in einer Längsschnittuntersuchung, dass bei Kindern die synaptische Dichte in den Spracharealen zunahm und zugleich von einem ausgedehnten Ausdünnen von Verbindungen in anderen Regionen des Kortex begleitet war. Dabei bestand ein Zusammenhang zwischen den Verbesserungen der sprachlichen Leistung und der Veränderung der Synapsendichte in den untersuchten Arealen.

Heute stehen eine Reihe von Einflussfaktoren im Verdacht, das Ausdünnen und Aussprossen synaptischer Verbindungen zu beeinflussen: Gene, Ernährung, Toxine, Bakterien, Viren, Hormone u.a. spielen hier sicher eine Rolle (Giedd

graue Masse eine Mischung von neuronalen Zellkörpern, Axonen, Dendriten, Gliazellen und Blutgefäßen

die Anzahl der Synapsen bei Kindern übersteigt weit die Anzahl, die im erwachsenen Hirn zu finden ist

2004). Besonders entscheidend könnten jedoch *Lernprozesse* auf die Organisation synaptischer Verbindungen im Gehirn einwirken: Nach dem „use it or lose it“ Prinzip werden dann diejenigen Verbindungen gestärkt, die häufig Informationen verarbeiten. Verbindungen, die kaum genutzt werden, verschwinden wieder (*Spitzer* 2002). Gemeinsam mit einer zunehmenden Myelinisierung bestehender Axone, kann Informationsverarbeitung so schneller und effizienter geschehen und zunehmend komplexeren Sachverhalten gerecht werden. Wenn die Hypothese der Modulation von Hirnsubstanz durch Lernprozesse richtig ist, dann haben die alltäglichen Aktivitäten eines Jugendlichen einen enormen Einfluss auf die physikalische Struktur des Gehirns (*Giedd* 2004; *Durstun/Casey* 2006).

die kognitive
Entwicklung wird
durch die
„Hardware“ Gehirn
optimal unterstützt

Zusammenfassend scheinen Befunde aus der strukturellen Bildgebung des Gehirns darauf zu verweisen, dass die kognitive Entwicklung durch die „Hardware“ Gehirn optimal unterstützt wird: Axone werden zunehmend in die Lage versetzt, Information schnell weiterzuleiten und die einzelnen Nervenzellen bieten ein breites Netzwerk an Verknüpfungen für mögliche Lernrouten an, die – je nach Gebrauch – einer Art Feinabstimmung unterzogen werden, indem ungenutzte Verknüpfungen wieder verschwinden. *Giedd* (2004) verweist allerdings richtig auf Vorsicht bezüglich dieser Interpretation in Bezug auf die beobachteten Umbauten im Gehirn bei Jugendlichen. Weitere Forschung ist notwendig, um die angenommenen Prozesse für das Jugendalter empirisch weiter zu untermauern.

Neben strukturellen Veränderungen des Gehirns rückten in den letzten Jahren auch funktionelle Veränderungen in den Vordergrund des Interesses. Vor der Beschreibung dieser Studien, soll jedoch auf die Funktionsbereiche eingegangen werden, die im Zusammenhang mit stimmungslabilen, pubertierenden Jugendlichen häufig besonders ins Auge stechen: Emotionen und ihre Regulation.

3. Emotionen sind sinnvoll, sie zeigen z.B. an, wann wir die Norm überschritten haben

Levenson (2003) bezeichnet Emotionen als „evolutionär getestete Lösungen auf zeitlose Probleme und Herausforderungen“. Im Bezug auf das Lernen bedeutet dies, dass Emotionen über Generationen gelerntes Wissen repräsentieren können. *LeDoux* (1996) unterstützt das Modell einer solchen *evolutionäre Anpassung* in seinen Arbeiten zur Angst: Er beschreibt, dass der Anblick eines gefährlichen Reizes –z.B. einer Schlange – zu einer zweigleisigen Weiterverarbeitung im Gehirn führt: Der als „quick and dirty“ bezeichnete Weg führt zur *Amygdala*, die u.a. für die Vorbereitung der Fluchtreaktion maßgeblich ist. Zu diesem Zeitpunkt ist der Stimulus noch nicht komplett analysiert und die betreffende Person kann den Eindruck gewinnen, sie reagiert schneller, als ihr tatsächlich bewusst ist – und in Ausnahmefällen tut sie das auch fälschlich z.B. angesichts eines Gartenschlauchs, denn hier geht es nicht um die Genauigkeit der Informationsvermittlung, sondern um die möglichst schnelle Reaktion angesichts möglicher

Gefahr. Der zweite Weg erlaubt jedoch auch eine genaue Analyse des Stimulus und führt über den sensorischen Kortex ebenfalls zur Amygdala zurück. Auf diesem Weg ist die Unterscheidung nach Schlange oder Gartenschlauch gut möglich und das betreffende Individuum kann für die Zukunft z.B. lernen, wo sich der Gartenschlauch gewöhnlich befindet.

Menschen reagieren jedoch nicht nur auf evolutionär bedeutsame Stimuli, wie Schlangen oder einfache visuelle Muster. Sie reagieren meist auf weit komplexere Stimuli emotional. *Rolls* (1999) betont in seiner Theorie, dass Menschen in der Interaktion mit ihrer Umwelt erfahren, dass die Umstände, unter denen bestimmtes Verhalten angenehme oder unangenehme Folgen hat, sich häufig ändern können. Zuvor positive Folgen eines Stimulus (mein Freund erzählt mir auf einer Party einen Witz und ich lache laut) können plötzlich in negative Folgen umschlagen (mein Freund erzählt mir einen Witz beim Besuch eines Symphoniekonzertes und ich lache laut). Die jeweilig resultierende Emotion zeigt an, ob Assoziationen korrigiert werden müssen. Im Beispiel wird Scham anzeigen, dass es in einem Konzert nicht „der Norm entspricht“, laut zu lachen. *Rolls* (1999) postuliert eine Reihe neuronaler Strukturen, die für diese Verarbeitungsschritte notwendig sind. Der *orbitale Teil des frontalen Cortex* übernimmt dabei eine Schlüsselfunktion in der *flexiblen Reaktion auf veränderte Verstärkerkontingenzen*.

Menschen reagieren
auf komplexere
Stimuli emotional

4. Wenn Emotionen sinnvoll sind, warum müssen sie dann reguliert werden?

Emotionen müssen reguliert werden, weil sie evolutionär sinnvolle Lösungen anbieten, die im heutigen Alltag aber nicht immer die optimale Lösung darstellen. Es ist z.B. nicht sinnvoll, sich während einer Prüfung entsprechend möglicher Ängste schnell aus dem Raum zu flüchten. Die Regulation von Emotionen hat das Einsetzen variabler Prozesse zur adaptiven Anpassung an die Erfordernisse der aktuellen Situation zum Ziel (*Gross* 1998) und ist also v.a. dann erforderlich, *wenn Emotionen* ein langfristiges Erreichen des aktuellen übergeordneten Ziels *stören*. Neurobiologisches Substrat emotionaler Prozesse, die unter Umständen zu Interferenzen zielgerichteten Verhaltens führen, ist u.a. die oben schon erwähnte Amygdala. Das neurobiologische Substrat regulatorischer Prozesse scheinen unter anderem *laterale und mediale Bereiche des präfrontalen Kortex (PFC)* zu sein, die miteinander interagieren, um das Ausmaß der Aktivierung subkortikaler und posteriorer Kortexbereiche zu steuern. Anhand der Verarbeitung ärgerlicher und ängstlicher Gesichtsausdrücke konnte bereits gezeigt werden, dass hier eine Zunahme der Aktivierung frontaler Hirnregionen mit einer Abnahme der Aktivität in der Amygdala einhergeht (*Hariri* u.a. 2003).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Emotionen im alltäglichen Leben helfen, mit der Fülle von Informationen umzugehen. Gehirnstrukturen wie die Amygdala helfen uns, bei Gefahr schnell zu reagieren, und bestimmte Bereiche im frontalen Kortex sind das neuronale Substrat der Verwertung emotionaler Erfahrungen in alltäglichen Entscheidungsprozessen. Patienten mit Schädigun-

gen dieser frontalen Kortextbereiche fallen erwartungsgemäß durch sozial unangemessenes Verhalten auf, denn sie haben die Fähigkeit verloren, ihr Verhalten aufgrund emotionaler Konsequenzen zu regulieren (z.B. *Wenz*, 1997). Will man es überspitzt formulieren, zeigen diese Patienten in weit stärkerer Ausprägung ein Verhalten, dass auch irritierte Teenager im Kampf mit der Pubertät und den nächsten Bezugspersonen hin und wieder an den Tag legen.

5. Funktionelle Veränderungen im Gehirn und kognitive Entwicklung: Implikationen für die Emotionsregulation bei Jugendlichen

Der für die Regulation von Emotionen so wichtige PFC entwickelt sich während der Altersspanne von Kindheit bis in das junge Erwachsenenalter hinein und dabei offensichtlich langsamer als andere Regionen des Gehirns. Eher ventral gelegene Bereiche des PFC sind in die *Regulation von Emotionen* eingebunden und sie übernehmen im Verlauf schrittweise Kontrolle über subkortikale Strukturen, wie die Amygdala (*Rubia* u.a. 2000). *Steinberg* (2005) vergleicht das Zusammenspiel der früher ausgereiften und voll funktionsfähigen subkortikalen Strukturen mit dem langsam und scheinbar behäbig reifenden PFC mit einem Auto, dessen starker Motor gestartet ist, an dessen Steuer aber ein höchst unerfahrener Fahrer sitzt. In experimentellen Untersuchungen konnte die Dramatik, die sich aus diesem Bild ergibt und die im Alltag von Jugendlichen hin und wieder eine Rolle zu spielen scheint, so natürlich nicht abgebildet werden. Es konnte aber gezeigt werden, dass erwachsene Personen stärkere Aktivierungen im PFC aufweisen, als jugendliche Personen, wenn beide Gruppen ihre Aufmerksamkeit zielgerichtet einem emotionalen Stimulus zuwenden (*Monk* u.a. 2003; *Yurgelun-Todd/Killgore* 2006). Emotionsregulierende Bereiche des Gehirns sind bei Jugendlichen also zunächst weniger aktiv als bei Erwachsenen und unterliegen offensichtlich einer umfassenden Neustrukturierung⁴. Wenn wir von Lernprozessen im Sinne des „use it or loose it“ auch in frontalen Bereichen des Kortex ausgehen, dann sind v.a. Studien interessant, die versuchen, den Prozess des Lernens im Zeitverlauf einzufangen. Folgende Beobachtung ist hier relevant: Gibt man gesunden Personen in einem Experiment immer wieder Entscheidungsalternativen vor, so können sie implizit lernen, welche der Entscheidungsalternativen langfristig für sie günstiger ist und sie werden im Verlauf zunehmend die Alternative wählen, deren Ausgang der bessere ist. Dazu sind Menschen gerade auch dann in der Lage, wenn sie die Wahl haben zwischen 1. der Option eines kurzfristigen Gewinns bei langfristigem Verlust und 2. der Option eines kurzfristigen Verlusts bei langfristigem Gewinn (*Bechara/Tranel/Damasio* 2000). Fällt die Entscheidung auf die zweite Option, spricht man auch von der Fähigkeit zum „Belohnungsaufschub“. Kleinkinder, die ungeduldig brüllen, weil sie *sofort* den heruntergefallenen Schnuller wieder haben möchten, sind dazu offensichtlich noch nicht in der Lage. Auch erwachsene Personen mit Schädigungen des Gehirns in ventralen Bereichen des PFC, haben Schwierigkeiten auf eine kurzfristig günstige zugunsten einer langfristig günstigen Kon-

Emotionsregulierende Bereiche des Gehirns sind bei Jugendlichen zunächst weniger aktiv als bei Erwachsenen

sequenz zu verzichten und sie entscheiden folglich auch über den längeren Verlauf eher ungünstig (*Bechara/Tranel/Damasio* 2000). Auch Jugendliche scheinen in alltäglichen Entscheidungsprozessen nicht immer die günstigste Alternative zu wählen, manchmal fahren sie rasant Auto, testen Drogen aus, haben ungeschützten Sex mit neuen Partnern oder schreien ihre Lehrer an. Einige Autoren vermuteten, dass Jugendliche sich der Konsequenzen ihres Verhaltens schlicht nicht so bewusst sind, wie erwachsene Personen (z.B. *Tobler* 1986). *Crone und van der Molen* (2004) ließen Jugendliche unterschiedlicher Altersstufen eine Aufgabe zur Entscheidungsfindung lösen. Kinder in der Altersgruppe von 6 bis 9 Jahren entschieden sich über den gesamten Aufgabenverlauf etwa gleich häufig für die günstigere und die ungünstigere Alternative. 10- bis 12-jährige Jugendliche lernten über den Verlauf der Untersuchung schon in gewissem Ausmaß, sich richtig zu entscheiden und wählten im letzten Aufgabenblock nur noch zu 45% die ungünstige Alternative. 13- bis 15-jährige entschieden sich nur noch in 40% der Fälle ungünstig und junge Erwachsene im Alter von 18 bis 25 in 25% der Fälle. Es scheint, als würden Menschen in der Jugend regelrecht lernen, sich optimal zu entscheiden.

Neben der Regulation von Emotionen spielt im sozialen Kontext aber auch die *Dekodierung emotionaler Reize* eine wichtige Rolle, um die Intentionen und Handlungsabsichten anderer zu erkennen und einzuordnen. Rund um die Adoleszenz wird die stetige Verbesserung dieser Fähigkeiten seit der Geburt allerdings jäh unterbrochen und es fällt den Betroffenen vergleichsweise schwerer soziale Reize zu entschlüsseln. *McGivern* u.a. (2002) untersuchten 10- bis 22-jährige Personen und fanden, dass die Dauer, einen emotionalen Ausdruck aus einem Gesicht zu deuten bei 11-jährigen im Vergleich zu Erwachsenen und auch jüngeren Kindern bis zu 20% anstieg. Über die folgenden Lebensjahre fiel die Reaktionszeit wieder ab und erreichte den Level erwachsener Personen um das 18. Lebensjahr. Auch *Yurgelun-Todd und Killgore* (2006) fanden einen Zusammenhang des Alters bei ihren acht bis 15-jährigen Probanden mit der Aktivierung im PFC: Je jünger die Probanden waren, desto weniger wurde diese Struktur beim Anblick ängstlicher Gesichter aktiviert. Und auch hier gelang es den jüngeren Teilnehmern sehr viel schlechter, die Emotion richtig als Angst zu erkennen. Die Amydala selbst war dabei in beiden Gruppen gleichermaßen aktiv. Wir wissen nicht, in wie weit dieses Phänomen Alltagsrelevanz hat. Möglicherweise ist es aber empfehlenswert, die erzieherische Bemühung angesichts des trotzens Sprösslings nicht auf einen strengen Gesichtsausdruck zu beschränken, sondern auch verbal einzuschreiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Entwicklung Adoleszenter mit einer funktionellen Reorganisation frontaler und subkorticaler Regionen des Gehirns einhergeht, die unter anderem die neuronale Basis für den Ausdruck, die Dekodierung und die Regulation von Emotion liefern. Entsprechend diesen Veränderungen beobachten wir während der Adoleszenz, dass soziale Beziehungen wichtiger werden – manchmal auch als der scheinbar trockene Stoff, der im Schulunterricht vermittelt wird – und dass die jungen Menschen an Fähigkeit gewinnen, soziale und emotionale Reize zu lesen und angemessen darauf zu reagieren (*Steinberg* 2005). Jetzt lernen sie auch die Verarbeitung komplexer

Dekodierung
emotionaler Reize

sozialer Information, wie die Perspektive anderer einzunehmen und toleranter gegenüber alternativen Sichtweisen zu sein (*Wainryb* u.a. 2001).

Abbildung 1 gibt noch einmal einen zusammenfassenden Überblick über die beschriebenen Prozesse.

Abbildung 1 (modifiziert aus *Steinberg* 2005). Heute vermuteter Zusammenhang und Ablauf zwischen Reifungsprozessen des Gehirns und Ausprägungen im Erleben und Verhalten über die Zeitspanne der Adoleszenz

Frühe Adoleszenz/ Einsetzen der Pubertät	Mittlere Adoleszenz	Späte Adoleszenz
Einfluss Geschlechtshormone auf subkortikale Strukturen	Riskantes Verhalten wird weiterhin wahrscheinlicher	Reifung frontaler Bereiche des Gehirns erhöhen die Kompetenz zur Regulation von Emotion und Kognition
Intensität emotionalen Erlebens steigt	Häufig Probleme in der Regulation von Affekt und Verhalten	Die Wahrscheinlichkeit risikanten Verhaltens sinkt
Riskantes Verhalten wird wahrscheinlicher		
Lernen von Verstärkungskon- tingenzen		

6. Sind Pubertierende Sklaven ihrer Hormone?

Es ist heute noch weitgehend unklar, wie diese Veränderungen des Gehirns mit endokrinologischen Veränderungen im Rahmen der pubertären Reifung zusammenhängen. Zusammenhänge des pubertären Status fanden sich aber mit bestimmten Verhaltensweisen, wie der Häufigkeit und Intensität der Konflikte, die pubertierende Jugendliche mit ihren nächsten Bezugspersonen häufig austragen (*Steinberg* 1987) und dem sogenannten „sensation-seeking“ und „risk-taking-behavior“, also Verhalten, in dem Jugendliche sich nahe der normativen Grenzen und rund um sie herum bewegen (*Martin* u.a. 2002). Diese Suche nach „Sensation“ und „Risiko“ kann übersetzt werden in die Suche nach emotionaler Erfahrung, die zum Lernen über soziale Situationen beiträgt. Wir wissen bereits, dass Jugendliche möglicherweise erst noch lernen, sich in langfristig günstiger Weise zu entscheiden, und deshalb auch in Situationen geraten können, die negative Konsequenzen für sie nach sich ziehen können. Andererseits zeigen Studien, dass Adoleszente sich in risikobehaftete Situationen begeben, obwohl sie sehr wohl wissen, dass es gefährlich ist, sich so zu verhalten (*Martin* u.a. 2002). Welchen Einfluss hier emotionale Mechanismen haben, die hormonell angestoßen, das Verhalten steuern, ist noch völlig unklar.

Geschlechtshormone wirken dagegen sicher über die körperliche Veränderung auf das Verhalten und emotionale Erleben der Jugendlichen. Pubertierende Mädchen scheinen dabei stärker als Jungen den Körper eher kritisch zu be-

Die Suche nach „Sensation“ und „Risiko“ kann übersetzt werden in die Suche nach emotionaler Erfahrung

trachten und als verbesserungswürdiges Objekt einstufen (*Martin 1996*). Was für Auswirkungen hat es dann, wenn z.B. der Modedesigner Karl Lagerfeld zur Eröffnung seiner Ausstellung in Berlin behauptet, er habe „noch nie ein mager-süchtiges Mannequin gesehen“ (dpa-Meldung vom 24.11.2006)? Ausgeprägtes Diätverhalten ist in dieser Altersgruppe ein recht häufiges Phänomen und in den letzten Jahren bekommen Schönheitschirurgen auch unter den jungen Mädchen immer mehr Patientinnen auf der Suche nach dem kontrollierbaren Körper auf den Operationstisch (*Martin 1996*). Der vorliegende Artikel konzentriert sich im Wesentlichen auf die speziellen neuronalen Grundlagen des Erlebens und Verhaltens im Jugendalter. Weil diese die Option zu lernen bieten, ist das Umfeld, in dem gelernt wird, jedoch von immenser Relevanz, auch wenn dieser Aspekt hier nur angerissen werden kann.

7. Schlussfolgerungen

Die Adoleszenz ist ein spannender Prozess, sowohl aus wissenschaftlicher Perspektive, als auch für das Individuum selbst. Der Mensch lernt jetzt über den Umgang mit anderen soziales Verhalten und hier auch seine Position im Kontext anderer zu definieren. Er wählt Sexualpartner, Freunde und eine berufliche Laufbahn auf dem Weg zu einer autonomen Identität. Dies kann er umso besser, je flexibler die Kontrolle emotionaler und kognitiver Prozesse an die Erfordernisse angepasst werden und emotionale Stimuli dekodiert werden können. Hier dienen Aktivitäten, die die gesellschaftliche Norm überschreiten möglicherweise Lernprozessen, die helfen diese Norm für das eigenverantwortlichen Handeln überhaupt zu definieren und in späteres Verhalten mit einzubeziehen – schließlich kann und soll diese Aufgabe jetzt nicht mehr von erwachsenen Bezugspersonen übernommen werden. Auch die Jugendlichen, die die gesellschaftliche Normen nicht überschreiten, lernen selbstverständlich. Sie agieren im eigenen subjektiv definierten Normkontext und auch hier unterstützen neuronale Mechanismen, wie das „Belohnungssystem“ die Strukturierung einlaufender Umweltinformationen nach „neu und lernenswert“ und „bereits bekannt“. Das neuronale Substrat bietet dabei die nötige Flexibilität, sich auf die gegebene Umwelt einzustellen und angemessenes Verhalten zu lernen, bevor entsprechende neuronale Netze über den Altersverlauf weiter gefestigt werden, die neuronale Plastizität also abnimmt. Präpotent angelegte emotionale Handlungsmuster, die gegebenenfalls noch durch spezielle hormonelle Gegebenheiten in der Pubertät getriggert werden, können sich bei einer weniger deutlich ausgeprägten Möglichkeit zur Regulation allerdings durchsetzen. Und dies nicht immer im günstigsten Kontext – was aber im günstigsten Falle die richtigen Lernprozesse nach sich zieht. *Steinberg (2005)* bezeichnet die Phase der Adoleszenz, die viele Chancen zu lernen bietet, aber auch als *Periode erhöhter Vulnerabilität*, denn gerade hier besteht auch die Gefahr, das Falsche zu lernen, v.a. dann, wenn das neuronale Substrat dies durch seine Beschaffenheit unterstützt und die zeitliche Abfolge der Reifung oder das Ergebnis der Reifungsprozesse gestört sind (z.B. zur ADHD vgl. *Schweitzer u.a. 2000*). Eine aktuelle epidemiologische Studie

Adoleszenz als
Periode erhöhter
Vulnerabilität

zeigt, dass die meisten psychischen Störungen in der Kindheit und Adoleszenz ihren Anfang nehmen (*Wittchen und Jacobi* 2005). Neben einer Reihe weiterer ätiologischer Faktoren spielen hier möglicherweise auch oben beschriebene Lernprozesse eine wichtige Rolle – aber nicht die einzige. Die Resilienzforschung zeigt eine Vielzahl protektiver Faktoren auf, die der Ausprägung psychischer Störungen entgegenwirken (*Opp und Fingerle*, 2007). Pubertät ist also nicht mit der Ausprägung psychischer Störungen gleichzusetzen! Die Überlegungen einer erhöhten Vulnerabilität für riskantes oder auch deutlich normabweichendes Verhalten in dieser Phase haben jedoch auch Auswirkungen auf die Rechtsprechung: Nach *Steinberg* (2005) liegt dem Obersten Gerichtshof der USA der Stand der Wissenschaft zum Thema vor und soll in die weitere Diskussion zur Todesstrafe bei jugendlichen Straftätern mit einbezogen werden.

Auch wenn alles schon recht schlüssig klingt, wissen wir jedoch noch sehr wenig. Die Untersuchungsdesigns, die Hirnreifungsprozesse untersuchen, erfassen häufig Daten über einen Altersquerschnitt aus der Bevölkerung und verfolgen seltener Individuen im Längsschnittverlauf, was aufgrund der individuell relativ verschiedenen Hirnstruktur genauere Ergebnisse bringen sollte (*Durston/Casey* 2006). *Durston u.a.* (2006) waren die ersten, die einen direkten Vergleich beider Designoptionen durchführten und sie fanden, dass die Querschnittsuntersuchung in der Tat weniger sensitiv ist, relevante Entwicklungen abzubilden. Zudem spielt natürlich nicht ausschließlich die Reifung des Gehirns, sondern auch Kultur und sozialer Kontext eine wichtige Rolle in der Entwicklung kognitiver und affektiver Fähigkeiten (*Steinberg* 2005) und auch hier sind vermutete Zusammenhänge noch nicht gut empirisch gestützt. Wir sollten bei der Interpretation der vorliegenden Daten also Vorsicht walten lassen, was uns aber nicht davon abhalten sollte, für das gesellschaftliche Zusammenleben ethisch vertretbare Lösungen zu definieren. Jugendliche sind nicht allesamt kriminell und verwerflich, sondern zeigen auch in den typischsten pubertären Konfliktsituationen ein höchst lobenswertes Verhalten – sie sind lernbereit. Und das, was Menschen hier lernen, bringt sie in den meisten Fällen dazu, sich nach den emotionalen Höhen und Tiefen der Pubertät und Jugendzeit auch irgendwann mit sich, ihrem Körper und den beteiligten Bezugspersonen zu versöhnen.

Anmerkungen

- 1 Das Ausmaß, in dem das einzelne Individuum – in der frühen Kindheit angeleitet durch Bezugspersonen, später zunehmend selbst – diese Prozesse beeinflussen kann, ist abhängig von den anlagebedingten Gegebenheiten der neuronalen Struktur einerseits und den Möglichkeiten, die gegebene Umwelt zu verändern andererseits. Die relevanten Prozesse sind noch nicht bis ins Detail geklärt und entsprechend diskutiert die Fachwelt heute mehr oder minder heftig auch philosophische Implikationen dieser Beobachtungen: Inwieweit kann der Mensch in diesem Wechselspiel noch frei entscheiden oder ist er ein „Opfer“ relevanter Strukturen und Prozesse? Beiträge zur aktuellen Debatte zum „freien Willen in der Neurowissenschaft“ finden sich z.B. bei *Bieri*, 2006 und *Cuntz u.a.*, 2005.
- 2 Videos, die diese Sequenzen aus unterschiedlicher Perspektive abbilden, sind im Internet unter <http://www.pnas.org/cgi/content/full/0402680101/DC1> zu finden.
- 3 *Paus* (2005) verweist allerdings auf eine alternative Hypothese zur Beobachtung abnehmender grauer Masse speziell in frontalen Bereichen des Gehirns. Es ist durchaus mög-

lich, dass die im strukturellen Bild sichtbare Abnahme grauer Masse schlicht mit dem parallel verlaufenden Zuwachs an weißer Masse zu erklären ist. Eine erste Studie, die hochauflösende MR-Bilder mit histologischen Analysen post mortem verband, soll diese Hypothese stützen: Bis zu 80% der Varianz des kritischen Messwertes (T1-Relaxationszeit) konnten auf Einflüsse der weißen Substanz zurück geführt werden (Zilles u.a. unveröffentlicht, nach Paus 2005).

- 4 Allerdings verweisen *Blakemore und Choudhury* (2006) auch auf widersprüchliche Ergebnisse, die bei Adoleszenten eine vergleichsweise stärkere frontaler Aktivität im PFC bei der Bearbeitung von Aufgaben zu exekutiven Funktionen zeigen. Möglicherweise ist hier die Ausbreitung der Aktivierung ausschlaggebend, die im Reifungsverlauf von diffus in Richtung fokaler Aktivierungsmuster verlaufen sollte.

Literatur

- Bechara, A., Tranel, D., & Damasio, H.* (2000): Characterisation of the decision-making deficit of patients with ventromedial präfrontal cortex lesions. *Brain*, 123, S. 2189-2202.
- Berk, L. E.* (2004): Entwicklungspsychologie: Pearson Studium.
- Bieri, P.* (2006): Untergräbt die Regie des Gehirns die Freiheit des Willens? In M. Heinze (Ed.), *Willensfreiheit - eine Illusion? Naturalismus und Psychiatrie*. Berlin/Lengerich: Parodos/Pabst Science Publishers.
- Blakemore, S. J./Choudhury, S.* (2006): Brain development during puberty: state of the science. *Developmental Science*, 9, 1, S. 11-14.
- Blumstein, A./Cohen, J.* (1987): Characterizing criminal careers. *Science*, 237, S. 985-991.
- Brody, A. L./Saxena, S./Schwartz, J. M./Stoessel, P. W./Maidment, K./Phelps M. E.* (1998). FDG-PET predictors of response to behavioral therapy and pharmacotherapy in obsessive compulsive disorder. *Psychiatry Research*, 84,1, 1-6.
- Brody, A. L./Saxena, S./Stoessel, P./Gillies, L. A./Fairbanks, L. A./Alborzian S.* (2001). Regional brain metabolic changes in patients with major depression treated with either paroxetine or interpersonal therapy: preliminary findings.[see comment]. *Archives of General Psychiatry*, 58,7, 631-640.
- Cahill, L./Prins, B./Weber, M./McGaugh, J. L.* (1994): Beta-adrenergic activation and memory for emotional events. *Nature*, 371, 6499, S. 702-704.
- Crone, E. A./van der Molen, M. W.* (2004): Developmental changes in real life decision making: performance on a gambling task previously shown to depend on the ventromedial prefrontal cortex. *Developmental Neuropsychology*, 25, 3, S. 251-279.
- Cuntz, U./Hand, I./Wittchen, H. U.* (Hrsg.) (2005). Freier Wille und biologische Regulation: Zwischen Biologie und Psychologie. 10. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Verhaltensmedizin und Verhaltensmodifikation - DGVM. *Verhaltenstherapie*, 15, Suppl.1, Karger.
- Durston, S./Casey, B. J.* (2006): What have we learned about cognitive development from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44,11, S. 2149-2157.
- Durston, S./Davidson, M. C./Tottenham, N./Galvan, A./Spicer, J./Fossella, J. A./Casey, B.J.* (2006): A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science*, 9,1, S. 1-8.
- Giedd, J. N.* (2004): Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1021, S. 77-85.
- Giedd, J. N./, Blumenthal, J./Jeffries, N. O./Castellanos, F. X./Liu, H., Zijdenbos, A./Paus, T./Evans, A.C./Rapoport, J.L.* (1999): Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2,10, S. 861-863.
- Giedd, J. N./Vaituzis, A. C./Hamburger, S. D./Lange, N., Rajapakse, J. C./Kaysen, D./Vauss, Y.C./Rapoport, J.L.* (1996): Quantitative MRI of the temporal lobe, amygdala, and hippocampus in normal human development: ages 4-18 years. *Journal of Comparative Neurology*, 366, 2, S. 223-230.
- Gogtay, N./Giedd, J. N./Lusk, L./Hayashi, K. M./Greenstein, D./Vaituzis, A. C./Nugent III, T.F./Herman, D.A./Clasen, L.S./Toga, A.W./Rapoport, J.L./Thompson, P.M.* (2004): Dy-

- namic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 21, S. 8174-8179.
- Gross, J. J. (1998): The emerging field of emotion regulation: An integrative review. *Review of General Psychology*, 2, 3, S. 271-299.
- Hariri, A. R./Mattay, V. A./Tessitore, A./Fera, F./Weinberger, D. R. (2003): Neocortical modulation of the amygdala response to fearful stimuli. *Biological Psychiatry*, 53, S. 494-501.
- Huttenlocher, P. R./De Courten, C./Garey, L. J./Van Der Loos, H. (1983): Synaptic development in human cerebral cortex. *International Journal of Neurology*, 16-17, S. 144-154.
- LeDoux. (1996): *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life* – New York: Simon & Schuster.
- Levenson, R. W. (2003): Autonomic specificity and emotion. In: *Davidson, R.J./Goldsmith, H.H./Scherer, K.R. (Hrsg.): Handbook of affective science* – New York: Oxford University Press, S. 212-224
- Martin, C. A./Kelly, T. H./Rayens, M. K./Brogli, B. R./Brenzel, A./Smith, W. J./Omar, H.A. (2002): Sensation seeking, puberty, and nicotine, alcohol, and marijuana use in adolescence. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41,12, S. 1495-1502.
- Martin, K. (1996): *Puberty, Sexuality and the self* – Routledge.
- McGivern, R. F./Andersen, J./Byrd, D./Mutter, K. L./Reilly, J. (2002): Cognitive efficiency on a match to sample task decreases at the onset of puberty in children. *Brain and Cognition*, 50, S. 73-89.
- Moffitt, T. E. (1993): Adolescence-limited and life-course-persistent antisocial behavior: a developmental taxonomy. *Psychological Review*, 100, 4, S. 674-701.
- Monk, C. S./McClure, E. B./Nelson, E. E./Zarahn, E./Bilder, R. M./Leibenluft, E./Charney, D.S./Ernst, M./Pine, D.S. (2003): Adolescent immaturity in attention-related brain engagement to emotional facial expressions. *Neuroimage*, 20,1, S. 420-428.
- Opp, G./Fingerle, M. (2007): *Was Kinder stärkt. Erziehung zwischen Risiko und Resilienz*. Ernst Reinhardt Verlag.
- Paus, T. (2005): Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 2, S. 60-68.
- Pfefferbaum, A./Mathalon, D.H./Sullivan, E. V./Rawles, J. M./Zipursky, R. B./& Lim, K. O. (1994). A quantitative magnetic resonance imaging study of changes in brain morphology from infancy to late adulthood. *Archives of Neurology*, 51,9, S. 874-887.
- Reiss, A. L./Abrams, M. T./Singer, H. S./Ross, J. L./& Denckla, M. B. (1996): Brain development, gender and IQ in children. A volumetric imaging study. *Brain*, 119, 5, S. 1763-1774.
- Rolls, E. T. (1999): *The brain and emotion*. – Oxford: Oxford University Press.
- Roth, L. (1983): *Die Erfindung des Jugendlichen* - München: Juventa.
- Rubia, K./Overmeyer, S./Taylor, E./Brammer, M./Williams, S. C./Simmons, A./Andrew, C./Bullmore, E.T.(2000): Functional frontalisation with age: mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 24, 1, S. 13-19.
- Schore, A. N. (2000). The self-organization of the right brain and the neurobiology of emotional development. In M. D. Lewis/I. Granic (Hrsg.), *Emotion, development, and self-organisation*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 155-185.
- Schweitzer, J. B./Faber, T. L./Grafton, S. T./Tune, L. E./Hoffman, J. M./Kilts, C. D. (2000): Alterations in the functional anatomy of working memory in adult attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*, 157, 2, S. 278-280.
- Sowell, E. R./Thompson, P. M./Holmes, C. J./Batth, R./Jernigan, T. L./Toga, A. W. (1999): Localizing age-related changes in brain structure between childhood and adolescence using statistical parametric mapping. *Neuroimage*, 9, 6, S. 587-597.
- Sowell, E. R./Thompson, P. M./Leonard, C. M./Welcome, S. E./Kan, E./Toga, A. W. (2004): Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *Journal of Neuroscience*, 24, 38, S. 8223-8231.
- Spitzer, M. (2002): *Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens* – Heidelberg: Spektrum Verlag.

- Steinberg, L.* (1987): The impact of puberty on family relations: Effects of pubertal status and pubertal timing. *Developmental Psychology*, 23, S. 451-460.
- Steinberg, L.* (2005): Cognitive and affective development in adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 2, S. 69-74.
- Tobler, N.* (1986): Meta-analysis of 143 adolescent prevention programs: Quantitative outcome results of program participants compared to a control or comparison group. *Journal of Drug Issues*, 16, S. 537-567.
- Wainryb, C./Shaw, L. A./Laupa, M./& Smith, K. R.* (2001): Children's, adolescents' and young adults' thinking about different types of disagreements. *Developmental Psychology*, 37, 3, S. 373-386.
- Wenz, C.* (1997). Unawareness und gestörtes Kommunikationsverhalten. In S. Gauggel & G. Kerkhoff (Hrsg.), *Fallbuch der klinischen Neuropsychologie*, S. 358-367. Göttingen: Hogrefe.
- Wittchen, H.-U./Jacobi, F.* (2005): Size and burden of mental disorders in Europe. A critical review and appraisal of 27 studies. *European Neuropsychopharmacology*, 15, 357-376.
- Yakovlev, P. A./Lecours, I. R.* (1967) : The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In: Minkowski, A. (Hrsg.): *Regional development of the brain in early life* – Oxford Blackwell, S. 3-70
- Yurgelun-Todd, D. A./Killgore, W. D.* (2006): Fear-related activity in the prefrontal cortex increases with age during adolescence: a preliminary fMRI study. *Neuroscience Letters*, 406, 3, S. 194-199.

