

## HIRNFORSCHUNG

# VORSICHT: UMBAUARBEITEN!

Mitunter erkennen Eltern ihre pubertierenden Kinder nicht wieder – so stark sind die körperlichen und seelischen Veränderungen, die Jungen und Mädchen durchmachen. Seit es Neurologen möglich ist, Jugendlichen in den Kopf zu schauen, lässt sich nach und nach erschließen, weshalb sie oft so seltsam sind

VON HARALD WILLENBROCK (TEXT) UND MARTIN KÜNSTING (INFOGRAFIK/BILDBEARBEITUNG)

Es ist Dienstag und Hirnscan-Tag am „National Institute of Mental Health“ (NIMH), ein paar Kilometer nordwestlich von Washington gelegen. In den Fluren des Instituts lümmelt eine Handvoll mit Laptops und MP3-Playern ausgerüsteter Teenager, vertreibt sich die Zeit mit Computerspielen und wartet auf ihren Einsatz. Einer nach dem anderen wird von Dr. Jay Giedd, einem Kinderpsychiater des NIMH, aufgerufen, auf einer Liege platziert und in eine große graue Röhre geschoben.

15 Minuten lang müssen die jugendlichen Freiwilligen im Kernspintomographen ausharren. Währenddessen tasten Radiowellen und Magnetfelder Region für Region ihres Kopfinneren ab, Computerprogramme verwandeln die gewonnenen Daten in 3-D-Grafiken.

So geht es nun schon seit 17 Jahren am NIMH. Woche für Woche, Dienstag für Dienstag. Und je mehr Bilder und

Daten die Computer ausspucken, desto stärker gerät die Auffassung über jenes rätselhafte Alter ins Wanken, das „Pubertät“ genannt wird.

Schuld daran ist die große graue Röhre. Noch bis Mitte der 1990er Jahre glaubten Fachleute, das Hirn eines Menschen sei mit zwölf Jahren praktisch komplett entwickelt. Die entscheidenden neuronalen Vorgänge, so die damalige wissenschaftliche Lehrmeinung, spielten sich sogar bereits bis zum dritten Lebensjahr ab.

Wenn sich die „süßen Kleinen“ scheinbar über Nacht in übelgelaunte, stets provokationsbereite Halbwüchsige verwandeln, wenn also das Gespenst der Pubertät mit viel Getöse bei einer Familie einzieht, dann – so dachte man – liegt es entweder an den Hormonen, an der sich wandelnden jugendlichen Psyche, oder an beidem.

Mit den Hirnscans war es Forschern plötzlich möglich, Einblicke in vormals

verschlossene Teenagerhirne zu gewinnen, und zwar regelmäßig und ohne belastende Strahlendosen. Jay Giedd, selbst Vater von vier Kindern, hat dies am längsten und ausführlichsten getan. Seit 1991 brechen er und seine Kollegen immer wieder zu Expeditionen in die Köpfe amerikanischer Teens auf – und kehren mit höchst erstaunlichen Ergebnissen zurück.

Anstelle eines fertig ausgebildeten Organs mit fest etablierten Strukturen entdeckten die Forscher im Schädelinneren eine höchst betriebsame Baustelle, auf der ständig Gerüste errichtet, neue Verbindungen gelegt und alte wieder abgerissen wurden. Viele Bauabschnitte, die man längst abgeschlossen gewöhnt hatte, wurden gerade erst neu vermessen, andere befanden sich offensichtlich in einer Phase fortgesetzter Restaurierung.

„Das Gehirn“, so Giedd, „entwickelt sich in den Teenagerjahren weitaus dy-



namischer, als wir es vermutet hatten.“ Damit verblasste das alte Bild vom Fast-Erwachsenen, der bis auf ein paar überschwappende Hormone „biologisch fertig“ ist. Und genau so, wie Heranwachsende plötzlich alles infrage stellen, was die Elterngeneration ihnen über das Leben weismachen will, bezweifeln Wissenschaftler seither vieles von dem, was sie über Pubertierende zu wissen glaubten.

Wenn Teenager in ihre frühkindliche Trotzphase zurückzufallen scheinen, wenn sie nachts nicht ins Bett und morgens zu spät zur Schule kommen, hat das zweifelsohne auch mit ihren Hormonen und dem Abschied von der Kindheit zu tun. Die entscheidende Erklärung aber könnte in ihren Hirnen liegen.

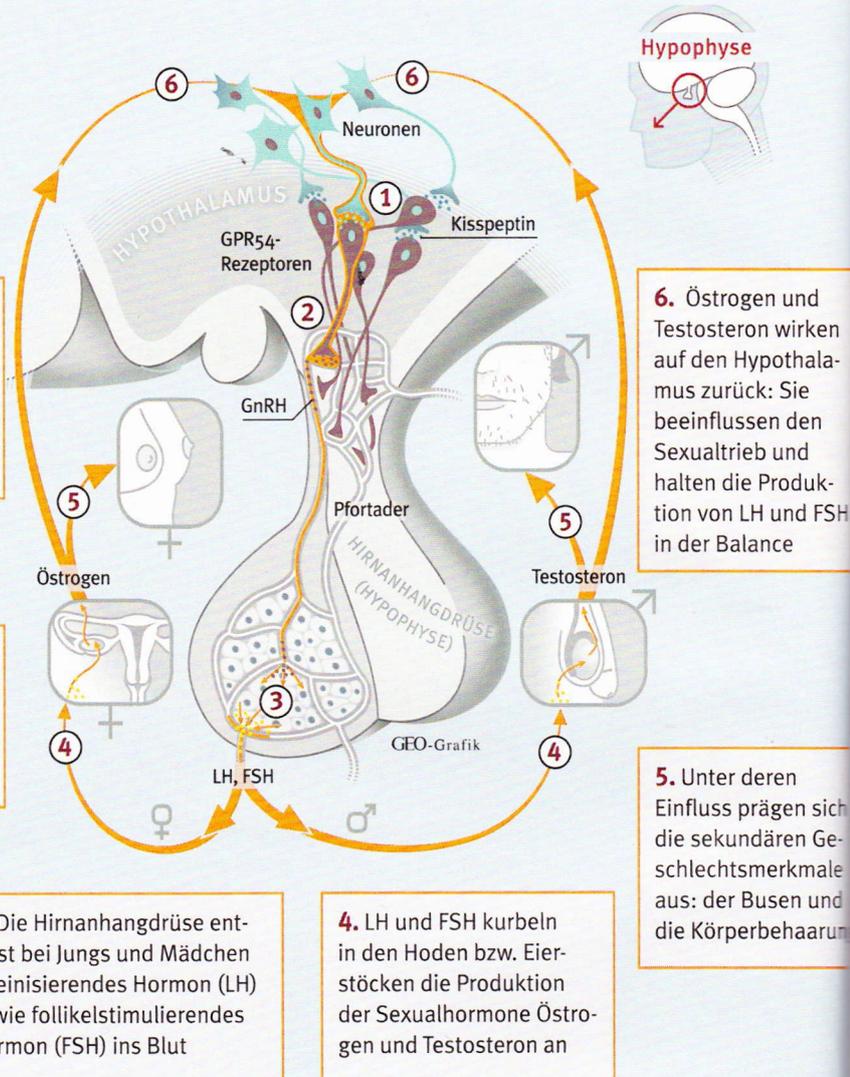
Auf seinen Scan-Aufnahmen konnte Giedd deutlich erkennen, dass die graue Substanz des Gehirns – aus ihr besteht vor allem die mit höheren kognitiven Aufgaben betraute Großhirnrinde – in den Jahren vor der Pubertät einen Wachstumsschub erlebt; den zweiten nach jenem im Kleinkindalter. Hinter der Volumenzunahme vermuten Forscher das Sprießen frischer Verzweigungen der Nervenzellen und die Entstehung neuer Kontaktstellen zwischen ihnen. Das Gehirn bildet auf diese Weise offenbar Myriaden neuer Verschaltungen, mit deren Hilfe es Informationen verarbeiten und speichern kann.

Anschließend beschneidet es diese Vielfalt wieder. Häufig beanspruchte Verknüpfungen bleiben dabei erhalten, während solche, über die kaum „gefunkt“ wird, verkümmern. „Neuronalen Darwinismus“ nennt der Nobelpreisträger Gerald Edelman diese Selbstorganisation des Denkapparats.

Mit anderen Worten: Während der Adoleszenz werden die Wege, auf de-

## DER KREISLAUF DER HORMONE

Damit der Junge zum Mann, das Mädchen zur Frau wird, muss im Gehirn eine Kettenreaktion von Signalübertragungen in Gang kommen



nen ein Mensch Informationen und Emotionen transportiert und verarbeitet, neu justiert. Das Hirn reift zu einer effizienten Denk- und Kontrollmaschine mit weniger, aber schnelleren Verbindungen. Es wird erwachsen.

Allein das Wissen um diesen Umbau hat weitreichende Auswirkungen auf die Art, wie man heute die Sturm- und Drang-Zeit betrachtet. Von „massiven Konsequenzen auf unser Verständnis von Pubertät“ spricht Karina Weichold,

die an der Universität Jena eine Langzeitstudie über Pubertierende begleitet hat. „Seit wir mehr über die Hirnentwicklung von Jugendlichen wissen, wird Pubertät viel komplexer wahrgenommen und erforscht. Einfache Erklärungen greifen heute nicht mehr.“

Dazu ist die Hirnentwicklung viel zu kompliziert. Während die Bausteine in den Arealen, die an der Bewegungssteuerung und der Wahrnehmung beteiligt sind, relativ bald wieder

geschlossen werden, dauern die Umbauten in den Feldern für Sprache und räumliche Orientierung weitaus länger. Selbst das zeitliche Orientierungsvermögen durchläuft eine Phase der Reorganisation.

**SO PRODUZIERT** die Zirbeldrüse im Hirn das müde machende Hormon Melatonin während der Wachstumsphase mit einer täglichen Verspätung von bis zu zwei Stunden, wie Mary Carskadon von der Brown University in Rhode Island herausgefunden hat. Viele Jugendliche leiden daher unter einer „Phasenverzögerung“ – sie werden später müde als der Rest der Welt. Da sich das Melatonin aber auch mit Verspätung abbaut, kommen sie morgens mühsamer aus dem Bett.

Die letzten Umbauarbeiten machten Giedd und sein Team im Präfrontallhirn aus, das unmittelbar hinter der Stirn liegt. Dieser Teil des Stirnlappens ist exakt jener Abschnitt, der Entscheidungen fällt wie „Jetzt beende ich zunächst meine Hausaufgaben und bringe den Müll weg – und erst dann maile ich meinen Freunden.“

Allerdings ist das Präfrontallhirn wegen der ständigen Renovierungsarbeiten kaum noch zugänglich – Jay Giedd glaubt, dass der präfrontale Kortex erst weit jenseits des 20. Lebensjahres seine letzte Ausbauphase erreicht. Wenn also ein Sprössling auch auf wiederholte Aufforderung hin den Müll nicht wegbringt, könnte es schlicht daran liegen, dass sein Präfrontallhirn die Welt und deren Signale anders bewertet.

Auf die gebrüllte Frage seiner Eltern: „Hast du mich jetzt endlich verstanden?“, müsste ein solcher Teenager ehrlicherweise antworten: „Ja, aber nicht so, wie ihr denkt.“ Lässt er solche Wutausbrüche scheinbar ungerührt an sich abperlen? Auch das könnte mit seiner Hirnentwicklung zusammenhängen. Denn zwischen dem zwölften und 18. Lebensjahr geht die Geschwindigkeit, mit der Heranwachsende Gefühle von

Mitmenschen erkennen, um bis zu 20 Prozent zurück – womöglich ebenfalls ein Zeichen für die relativ ineffiziente Verschaltung neuronaler Zentren.

Wie eigenartig Jugendliche selbst vermeintlich unmissverständliche Botschaften verarbeiten, konnten Forscher am McLean-Hospital in Belmont, Massachusetts, in einem einfachen Experiment demonstrieren. Sie legten Pubertierenden und Erwachsenen eine Reihe Porträtfotos vor, auf denen die Menschen Emotionen wie Wut, Trauer, Ärger und Freude zeigten. Gleichzeitig maßen sie mit einem Kernspintomographen die Aktivitäten der Probanden-Gehirne.

Ergebnis: Während die erwachsenen Teilnehmer ihren präfrontalen Kortex für die Deutung vielschichtiger Gefühle beanspruchten, schaltete sich bei Heranwachsenden vor allem die Amygdala ein, der „Mandelkern“, der Instinktreaktionen und „Bauchentscheidungen“ steuert. „Ich glaube, dass der Frontallappen bei Teenagern nicht immer voll funktioniert“, erklärt die Studienleiterin Deborah Yurgelun-Todd. „Deshalb denken Jugendliche nicht

## Teenager müssen gleichsam von einer höheren Klippe springen, um einen gleich starken Kick wie Ältere zu spüren

über die Konsequenzen ihres Tuns nach und handeln nach unserer Einschätzung impulsiver.“

Für Eltern heißt das: Wer einen 15-Jährigen zum zügigen Erledigen seiner Mathematik-Hausaufgaben bewegen will, sollte weniger die abstrakten, in ferner Zukunft liegenden Nachteile („So kriegst du später nie einen Job!“) als die greifbaren Vorteile („Für eine Zwei in der Mathearbeit spendiere ich dir einen Kinobesuch!“) betonen.

Eine weitere Ursache für den Hang zu unüberlegten Aktionen sehen Forscher im unreifen *Nucleus accumbens*, einer Zellansammlung, die tief im Gehirn hinter den Schläfen ruht. Dieser Nucleus ist an der Steuerung des Stre-

bens nach Belohnung beteiligt, und er arbeitet, wie man heute weiß, bei Jugendlichen träger als bei Erwachsenen – was nichts anderes heißt, als dass Teenager von einer höheren Klippe springen müssen, um einen gleich starken Kick wie Ältere zu spüren.

Gleichzeitig ist ihr Hirn aber noch nicht reif genug, um die damit verbundenen Risiken einschätzen zu können. Neurobiologisch gesehen, ähneln Heranwachsende einem vollbesetzten Düsenjet, der mit vibrierenden Triebwerken über die Startbahn jagt, während oben im Cockpit noch hektisch an Kontrollinstrumenten und Navigationssystem geschraubt wird.

Kein Wunder, dass es zu Unfällen kommt. Nie zuvor und nie mehr später im Leben ist das statistische Risiko von Verletzungen so hoch wie während der Pubertät. In jener Phase, in der Menschen in physischer Hinsicht ihren Höhepunkt erreichen, liegt beispielsweise in Europa die Sterblichkeit zwei- bis dreimal höher als während ihrer Kindheit. Nahezu alle häufigen Todesursachen während dieses Lebensabschnitts lassen sich auf falsches Verhalten durch

Fehleinschätzungen oder extreme Emotionen zurückführen.

Alles also eine Sache des Denkapparats? Emotionale Ausbrüche, ausschweifende SMS-Orgien und riskante Spritztouren mit Papas Fahrzeug lediglich eine Frage von Mandelkern, Frontallappen und grauer Masse?

**BEILEIBE NICHT.** Neurobiologen glauben, dass zum Beispiel die praktischen Lebenserfahrungen eines Jugendlichen enorme Rückwirkungen auf die Strukturbildung seines Gehirns haben können. „Ihr entscheidet selbst über die permanenten Verschaltungen in eurem Gehirn“, ermutigt der Neuroforscher Jay Giedd junge Leute. „Willst du es

# LÄSST SICH PUBERTÄT STEuern?

Das Protein Kisspeptin startet im Körper eines Jugendlichen die typischen hormonellen Veränderungen. Wissenschaftler diskutieren, ob dieser »Schalter« künstlich umgelegt werden darf

**GEBURTEN WERDEN HEUTE** in vielen Fällen künstlich eingeleitet. Könnte man nicht auch den Beginn der Adoleszenz steuern? Die Frage ist nicht so abwegig, wie sie erscheinen mag. Immer mehr Kinder starten sehr früh in die Pubertät. Dadurch aber steigt, wenn auch nur geringfügig, das Risiko für spätere Erkrankungen wie Brust- oder Prostatakrebs. Frühreife Mädchen sind zudem anfälliger für Depressionen und Drogen, und sie unternehmen häufiger einen Selbstmordversuch. Bei einer verzögerten Pubertät hätten Kinder mehr Zeit, um mental und psychisch mit den Veränderungen ihres Körpers klarzukommen.

**DIE PUBERTÄT** von extremen Frühstartern wird in medizinisch begründeten Einzelfällen schon heute künstlich verzögert. Das geschieht mit Medikamenten, die wie das Hormon GnRH wirken und durch kontinuierliche Einnahme per Injektion oder Nasenspray die Hormonausschüttung aus Hoden und Eierstock bremsen; allerdings ist die Dosierung schwierig.

Einige Forscher glauben, dass eine Manipulation des Kisspeptins die bessere Alternative wäre – etwa indem der

Rezeptor, an den das Hormon anbindet, durch eine andere Substanz blockiert wird, die per Tablette verabreicht werden kann. Um die Pubertät zu starten, würde man hingegen das Kisspeptin selbst verabreichen. Welch machtvolle Wirkung eine gesteigerte Kisspeptin-Aktivität im Extremfall haben kann, zeigt der Fall eines einjährigen Kleinkindes, dem Schamhaare wuchsen und dessen Genitalien denen eines 13-jährigen entsprachen.

**DAS WICHTIGSTE ARGUMENT** gegen einen Eingriff in den Hormonhaushalt betrifft die Hirnreifung. Aus Tierversuchen ist bekannt, dass das Gehirn in bestimmten Entwicklungsphasen besonders anfällig für den Einfluss von Hormonen ist. Niemand vermag aber zu sagen, wie sich eine künstliche Veränderung des Hormoncocktails auf die Reifung des Hirns auswirkt. „Manipulationen der Pubertät bedeuten einen Eingriff in eine fundamentale menschliche Entwicklungsphase, ohne dass wir etwas über eventuelle Langzeitfolgen wüssten“, warnt die Kinderärztin Marcia Herman-Giddens von der University of North Carolina.

durch Sport zur Reifung bringen, durch das Spielen eines Musikinstruments oder durch das Lösen mathematischer Aufgaben? Oder indem du vor dem Fernsehapparat sitzt?“

Die phänomenale Plastizität des jugendlichen Hirns sei ein Aspekt, der bislang viel zu wenig berücksichtigt worden sei. „Aber wir zahlen für diese Formbarkeit den Preis der Verletzbarkeit“, so Giedd. „Denn wenn ein Hirn zum Guten verändert werden kann,

kann man es auch zum Schlechten wandeln.“ So ist es auch zu erklären, dass Jugendliche trotz ähnlicher Prozesse in ihrem Hirn die Pubertät ganz unterschiedlich hinter sich bringen. Ihre biologische Konstitution ist lediglich ein Motor, der sie vorantreibt – wohin er sie bewegt, hängt ab von den Widerständen, die ihnen Gesellschaft und Kultur, Psyche und Familie entgegensetzen, und von den Wegen, die sie ihnen weisen.

Zusätzlich verkompliziert wird das Ganze durch den Einfluss der Hormone, die – gleich hochwirksamen Drogen – nicht nur das Bewusstsein, sondern auch Körper und Verhalten radikal verändern. Wer aber anders denkt, lebt und sich verhält, macht neue Erfahrungen, was wiederum die Bauarbeiten in seinem Hirn in eine andere Richtung lenkt und die Hormone anregt – was wiederum . . .

Barbara Strauch, Wissenschaftsredakteurin der „New York Times“, beschreibt diesen Regelkreis in ihrem Buch „Warum sie so seltsam sind“ an einem Beispiel: „Anfangs lassen die Hormone einen Penis entstehen, aber schon der Besitz eines Penis führt zu anderen Erfahrungen, die sich später ihrerseits auf Hormonspiegel, Gehirnstruktur und Verhalten auswirken.“

Letztlich kann man sich die drei Faktoren Gehirnstruktur, Hormone und Psyche wie die Zutaten einer Backmischung vorstellen, die zusammengemischt und in den Ofen geschoben werden – und dort während der Pubertät überhitzt miteinander reagieren.

**WAS ABER SETZT DIESE** Reaktion in Gang? Stephanie Seminara vom Massachusetts General Hospital in Boston hat im Erbgut einen potenziellen Schalter ausgemacht. Auf die Spur geführt hatte sie ein Phänomen namens „Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism“ (IHH), eine Krankheit, bei der die Pubertät verzögert eintritt oder im Extremfall sogar ausfällt.

Unbehandelt behalten männliche Betroffene eine hohe Stimme und entwickeln keine Schambehaarung; Patientinnen bleiben ohne Busen und erleben nie einen Eisprung. Der Defekt trifft statistisch gesehen nur einen von 50 000 Menschen. In einer saudi-arabischen Familie stieß Seminaras Team aber gleich auf sechs Betroffene.

Untersuchungen ergaben, dass die vier männlichen und zwei weiblichen Patienten eine Veränderung des Gens

GPR54 aufwiesen, die auch bei Mäusen die sexuelle Reifung unmöglich macht. Betätigt wird dieser genetische Schalter von einem erst kürzlich entdeckten Hormon namens Kisspeptin, dessen Ausschüttung an die Fortschritte der körperlichen Entwicklung gekoppelt sein könnte.

Denn bevor das Konzert der Hormone überhaupt einsetzen kann, müssen Mädchen gewisse Fettreserven gebunkert haben – biologisch sinnvoll, schließlich benötigen sie die Vorräte,

## Wann sind Jugendliche endlich erwachsen? Wenn sie freiwillig wieder früher ins Bett gehen

um Schwangerschaften überstehen zu können. Unterernährte oder mager-süchtige Mädchen reifen daher auch deutlich später als ihre gewichtigeren Altersgenossinnen.

Dass zudem wirtschaftliche und körperliche Entwicklung zusammenhängen, lässt sich an Statistiken zur Menarche ablesen: Setzte um 1860 die erste Regelblutung noch mit knapp 17 Jahren ein, beginnt sie heute im Schnitt mit zwölf bis 13 Jahren. 2010, so meinen Sexualforscher, könnten Mädchen die Geschlechtsreife sogar bereits mit durchschnittlich zehn Jahren erreichen.

Bei Jungen ist der Start der Pubertät statistisch schlechter erfasst, da sie die Spermatogenese, den ersten Samenerguss, meist weniger genau datieren können. Fest steht nur: Bei 90 Prozent kommt es irgendwann zwischen neun und 15 Jahren dazu.

**SIND DIE VORAUSSETZUNGEN** für den Start des Pubertäts-Programms jedoch erst einmal erfüllt, setzt im kindlichen Körper eine Art Kettenreaktion ein.

Der Hypothalamus, eine Steuerzentrale des Hirns für Körperfunktionen wie Kreislauf, Atmung und Nahrungsaufnahme

sendet chemische Signale an die benachbarte Hypophyse (siehe Illustration S. 26). Diese Drüse schüttet Botenstoffe aus – das luteinisierende Hormon (LH) sowie das follikelstimulierende Hormon (FSH). Unter deren Einfluss produzieren Eierstöcke bzw. Hoden Sexualhormone wie Östrogen und Testosteron. Bei Mädchen beginnen diese Vorarbeiten der Pubertät etwa mit acht, bei Jungen mit zehn Jahren.

Parallel dazu steigt auch der Spiegel anderer Botenstoffe, wie der von Hor-

monen aus der Nebennierenrinde. Sie lassen Pickel auf der Haut und Haare unter den Achseln sowie im Genitalbereich sprießen (das Wort „Pubertät“ ist abgeleitet von lateinisch *pubes* = Schamhaar und bezeichnet die Entwicklungsphase bis zur Erlangung der sexuellen Reife). Dank Wachstumshormonen legen Jungen in dieser Zeit bis zu zehn, Mädchen bis zu neun Zentimeter Körperlänge pro Jahr zu.

Spätestens jetzt, wenn die jungen Menschen unübersehbar in der Pubertät stecken, übernimmt die Psyche eine Führungsrolle im Entwicklungsprozess. „Wie reagieren die anderen darauf, dass ich kein Kind mehr bin?“ Das wird zu einer entscheidenden Frage. Vor allem aber: „Wie finde ich dies selbst?“

Die meisten Mädchen würden wohl antworten: „Ziemlich doof.“ Denn innerhalb weniger Jahre schießen sie um ein Viertel in die Höhe, ihr Körpergewicht entfernt sie mitunter weit von jenen Fotomodell-Maßen, deren Diktat sie jetzt bewusster denn je wahrnehmen. Heranwachsende Jungen sind

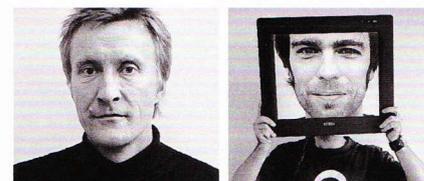
Mädchen gegenüber im Vorteil. Schließlich nähern sie sich durch manche Reifungsphänomene der Pubertät – breitere Schultern, kräftigere Muskeln, tiefere Stimme – au-

tomatisch dem männlichen Schönheitsideal. Probleme haben hier nicht die Frühentwickler, sondern jene Spätzünder, die noch schmalschultrig durch die Gegend laufen, während ihre Freunde schon die äußeren Insignien der Männlichkeit zeigen.

Sind diese Freunde nun also erwachsen? Für Soziologen ist die Sache klar. Sie betrachten einen Menschen dann als mündig, wenn er die Schule abgeschlossen hat, eigenes Geld verdient und nicht mehr bei den Eltern wohnt. Einer britischen Studie zufolge erfüllt heute jedoch nicht einmal mehr ein Drittel der 30-Jährigen alle Kriterien.

Der Münchner Psychologie-Professor Till Roenneberg plädiert deshalb für eine neue Definition: Erwachsen ist, wer freiwillig wieder früher ins Bett geht. Denn der Abschied vom Nacht-eulen-Dasein markiere unmissverständlich den Eintritt ins Erwachsenenalter. Frauen absolvieren diese „Reifeprüfung“ im Schnitt mit 19,5 und Männer mit 20,9 Jahren.

Für Hirnforscher wie Jay Giedd hingegen ist ein 20-Jähriger noch lange nicht ausgewachsen. Biologen wie er schätzen, dass sich ein menschliches Gehirn noch bis zum 25. Lebensjahr im Umbau befindet. Vielleicht wäre allen Beteiligten schon ein wenig geholfen, wenn Jugendliche sich ein unsichtbares Warnschild umhängten: „Achtung! Wegen wichtiger Bauarbeiten an Hirn, Hormonen und Herz kommt es vorübergehend zu Unannehmlichkeiten“, müsste darauf stehen. Und: „Wir danken für Ihr Verständnis.“ □



Der Hamburger Autor **Harald Willenbrock** kann sich nur noch schemenhaft an die eigene Pubertät erinnern. Dafür hat seine Mutter die Teenagerjahre des Sohnes umso lebhafter im Gedächtnis: „Du warst einfach unausstehlich!“ Der GEO-Illustrator **Martin Künsting** hat die Fotos der Kinder auf den Seiten 28/29 mithilfe eines Computerprogramms in digitaler Handarbeit zu Darstellungen von Jugendlichen reifen lassen.

### MEHR ZUM THEMA:

Barbara Strauch: **Warum sie so seltsam sind. Gehirnentwicklung bei Teenagern.** Bvt 2004, 335 Seiten

Rainer Silbereisen/Karina Weichold: **Pubertät und psychosoziale Anpassung.** Wiss. Aufsatz, 50 Seiten  
Download unter: [www.geo.de/weichold](http://www.geo.de/weichold)