

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 98 (1980)
Heft: 33-34

Artikel: Rhythmische Struktur des Schlafes
Autor: Frese, Walter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74168>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

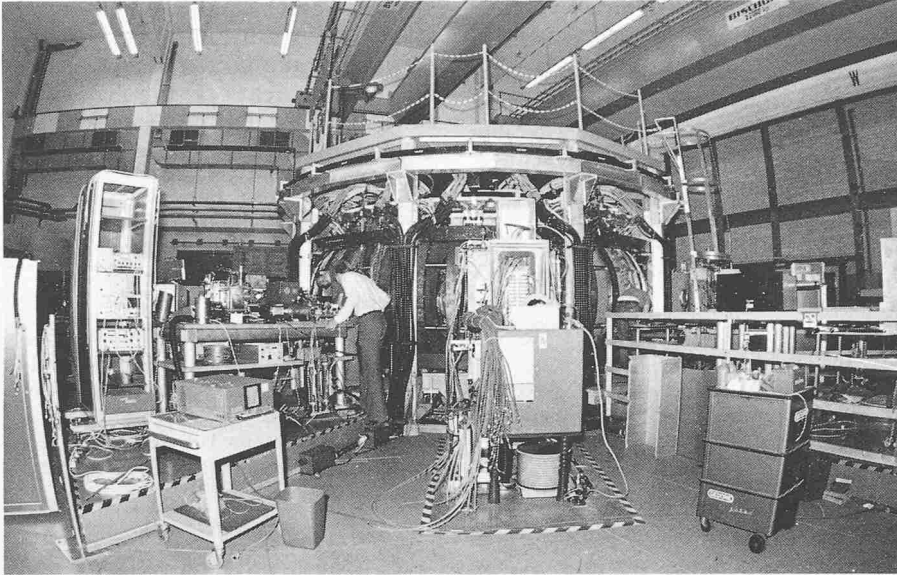
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 13.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Im Fusionsexperiment «Wendelstein VII-A» aus der Familie der Stellaratoren wird das Plasma fast ausschliesslich durch ein von aussen um das Ringgefäss «gewickelt» Magnetfeld zusammengepresst. Das Plasma wird dabei für Bruchteile von Sekunden auf 10 Millionen Grad erhitzt. Im Vordergrund (Mitte) ist die neuartige «Neutralteilchen-Heizung» zu sehen, mit der – nach Abschalten der Anfangsheizung – die Plasmaentladung aufrechterhalten wird

der konkurrierenden Geräte zu vereinen, ohne sich dafür den Nachteil der Abbruchinstabilitäten einzuhandeln.

Im Typ «Wendelstein VII-A» – einem grösseren Nachfolger des ersten Prototyps –, der unter der Projektleitung von Günter Grieger betrieben wird, wird das Tokamakprinzip lediglich zum «Anheizen» des Gerätes benutzt: Ein Transformator baut das Plasma auf und heizt es in seiner Anfangsphase. Danach übernimmt eine andere Heizung die «Fütterung» des energiehungrigen Plasmas: die sogenannte *Neutralinjektion*. Mit dieser auch bereits bei neueren Tokamaks verwendeten Methode wird ständig ein Strahl elektrisch neutraler (nichtgeladener) Teilchen ins Plasma gelenkt. Die neutralen Teilchen können tief ins Plasma eindringen. Die Bewegungsenergie der Neutralteilchen wird

dabei teilweise vom Plasma absorbiert, heizt es auf und füllt auch Gasverluste wieder auf. Der stromlose Betrieb bringt noch den wichtigen Vorteil, dass die verschiedenen, beim Tokamak auftretenden Strominstabilitäten, durch das von aussen starr angelegte Magnetfeld, gar nicht auftreten können. Bisher war es jedoch noch an keinem anderen vergleichbaren Stellarator typ möglich gewesen, in dieser Phase den Transformatorstrom, der die Anfangsheizung besorgt, wieder herunterzufahren oder gar völlig abzuschalten.

Beim Stellarator Wendelstein VII-A ist dies seit kurzem *fast vollständig* möglich. Zur Aufheizung wird im zunächst noch kühlen Plasma ein Strom von 18000 Ampere erzeugt. Sobald die weitere Heizung durch die neutralen Teilchen einsetzt, kann dieser Strom fast auf Null heruntergeregelt werden.

Gleichzeitig steigt die Teilchendichte im Reaktionsgefäss (auf 10^{14} Teilchen im Kubikzentimeter), und die Temperatur erreicht gegenwärtig Spitzenwerte bis zu zehn Millionen Grad.

Trotzdem bleibt das Plasma während der ganzen bisher getesteten Entladungszeit relativ sauber: Es dringen kaum Schmutzteilchen ins Plasmainnere – gegenwärtig beschränkt nur die Kapazität der Neutralteilchenheizung die Entladungszeit nach oben.

Wie Günter Grieger sagt, «ist damit endlich demonstriert worden, dass auch mit äusseren Magnetfeldern allein Plasmen dauerhaft eingeschlossen werden können, und das bei einem Druck, der bis an die theoretisch vorberechnete Grenze geht». Dieser Erfolg gelang den Münchner Plasmaphysikern vor allem durch eine verbesserte, kompliziertere Anordnung des äusseren Magnetfeldes. Der Forschungsdirektor des Plasmaphysik-Laboratoriums in Princeton, *Harold P. Furth*, ist in seiner Beurteilung des Wendelstein-Ergebnisses noch deutlicher: «Die deutsche Konstruktion (von Wendelstein VII-A) ist in der Fusionsenergie die bedeutendste Entwicklung der letzten zehn Jahre.»

In der Tat hat der erfolgreiche «stromfreie» Einschluss des sonst schwer zu zähmenden Plasmas der ganzen Stellaratorfamilie einen unverhofften Schub an Optimismus gegeben. Die Vorteile eines stationären, also kontinuierlichen Betriebs sind zwingend in Hinblick auf einen einmal voll arbeitenden Fusionsreaktor. «Mit dem Stellarator Wendelstein VII-A», so kommentiert der Leiter des Experimentes Wendelstein *Hermann Renner*, «konnte erstmals das Potential einer zum Tokamakprinzip alternativen Linie», die zu einem Fusionsreaktor führen könnte, «überzeugend aufgezeigt werden.»

Reinhard Bruer

Rhythmische Struktur des Schlafes

Rund ein Drittel seines Lebens «verschläft» der Mensch. Doch bis heute kann niemand sagen, warum er das tut: Man weiss nicht, wie oder wodurch Schlaf ausgelöst wird, noch hat man klare Vorstellungen von seinem Sinn, von seinen biologischen Funktionen. Dagegen ist recht gut bekannt, wie der Mensch schläft – und dass sich hinter dem scheinbar gleichförmigen Ruhezustand verschiedene *Schlafstypen* und *Schlafphasen* verbergen, die sich während einer Nacht mehrmals ablösen und zyklisch wiederholen. Solche «Schlafmuster» untersuchen Wissenschaftler der *Max-Planck-Institute für Psychiatrie in München* und für *Verhaltensphysiologie in Erling bei Andechs*. Dabei geht es darum, Einblick in den Ablauf und in die Steuerung des Schlafes zu erhalten. Auch will man Schlafstörungen, wie sie etwa bei Pa-

tienten mit Depressionen auftreten, auf den Grund gehen und Wege zu ihrer Behandlung erschliessen.

Grundlage und zugleich wichtigste Hilfsmittel der modernen Schlafforschung sind *elektrophysiologische Messverfahren*. Sie gestatten, verschiedene physiologische Grössen während des Schlafes fortlaufend zu erfassen, ohne den Schläfer zu stören: Über Elektroden werden von der Haut *bioelektrische Potentiale* abgeleitet, *schwache Spannungen*, die je nach Lage der Elektroden Aufschluss über die *Aktivität des Gehirns*, über die *Herzarbeit*, die *Augenbewegungen* oder den *Spannungszustand bestimmter Muskeln* liefern. «Diese Methoden», berichtet *Hartmut Schulz*, vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie, «wurden erst gegen Ende der dreissiger Jahre in die Schlafforschung einge-

führt. Bis dahin war es unmöglich, Näheres über den Schlafverlauf zu erfahren, ohne zugleich den Schläfer empfindlich zu stören. Entsprechend einfach war das klassische Konzept des Schlafes: Man sah darin einen rein passiven Ruhezustand, der zwar – wie man aus Weckreiz-Versuchen wusste – in seiner Tiefe veränderlich, ansonsten aber völlig ungegliedert und einheitlich sein sollte.

Dass hinter dem Schlaf mehr steckt, zeigte sich 1937, als man erstmals die *Hirnstromkurven* – das sogenannte *Elektro-Enzephalogramm* (kurz EEG) – von Schlafenden über längere Zeit aufzeichnete. Anhand dieser Kurven konnte man klar *zwei verschiedene Schlafstadien* trennen: das eine kenntlich an *langsamen und hohen Wellen* im EEG, das andere an *schnellen, also hochfrequenten Wellen mit kleiner Amplitude*.

Zwei Sorten Schlaf

Endgültig abgelöst wurde das klassische Bild vom Schlaf dann im Jahre 1953. Schulz spricht von einer «kopernikanischen Wende» in der Schlafforschung: «Man stellte damals – zuerst an Säuglingen – fest, dass während des Schlafs immer wieder Phasen mit regelrechten Salven von raschen Augenbewegungen auftraten, und dass dieser sogenannte REM-Schlaf (engl.: Rapid Eye Movement, rasche Augenbewegung) rhythmisch mit Perioden von NREM-Schlaf, von Nicht-REM-Schlaf, abwechselte.»

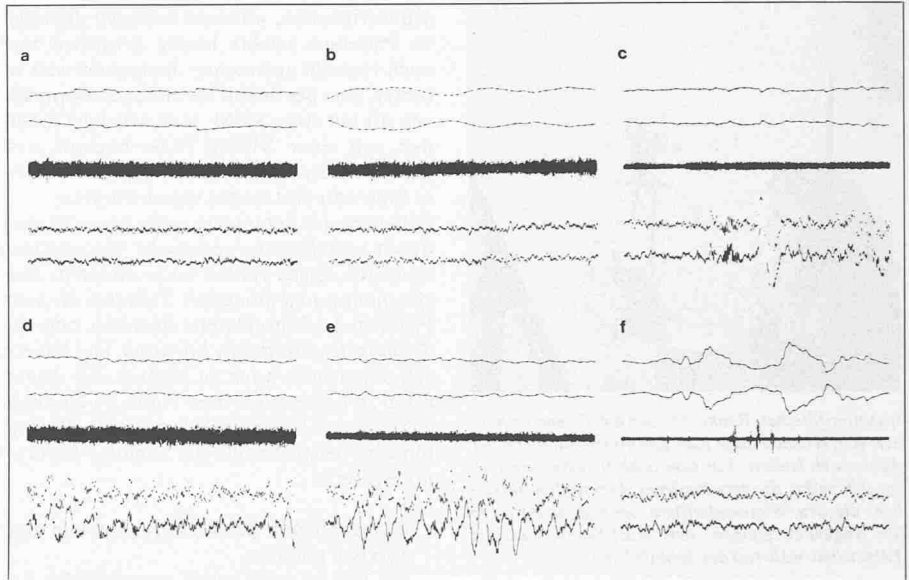
Damit waren zwei Sorten, zwei Typen von Schlaf entdeckt, die sich grundlegend unterscheiden. Dabei weicht der REM-Schlaf erheblich von der Vorstellung erholsamer Ruhe ab, wie man sie gewöhnlich mit dem Begriff Schlaf verbindet; er wird deshalb auch *paradoxe Schlaf* genannt. Neben raschen Augenbewegungen zeichnet er sich durch ein flaches und unregelmässiges EEG aus, das eine hohe neuronale Aktivität des Gehirns anzeigt. Als weitere schlaf-untypische Zeichen findet man kurzfristige, oft hohe Schwankungen von Herzfrequenz, Atmung und Blutdruck. Der während des Schlafs ohnehin erniedrigte Tonus – Spannungszustand – der Haltemuskulatur bricht im REM-Schlaf völlig zusammen; deshalb sinken Tiere, die man im Stehen schlafen lässt, mit Beginn des REM-Schlafs um. Beim Menschen kommt dazu noch eine starke psychische Aktivierung: Vier von fünf Schlafenden, die man aus dem REM-Schlaf weckt, berichten über eben abgelaufene, bildhafte und intensiv erlebte Träume.

Demgegenüber bietet der NREM-Schlaf ein Bild «echten Friedens». Man teilt ihn nach EEG-Kriterien in vier Stadien ein, wobei



Regelrecht verkabelt gehen die «Testschläfer» zu Bett. Über die Elektroden werden schwache Spannungen von der Haut abgeleitet, die dann je nach Lage der Elektroden Anschluss über die Augenbewegungen, den Spannungszustand der Kinnmuskulatur und über die Hirnströme liefern. Anhand dieser Daten lässt sich der Schlafverlauf genau verfolgen

Stadium 1 Dösen oder Leichtschlaf, Stadium 2 mitteltiefem Schlaf und die Stadien 3 und 4 Tiefschlaf entsprechen. Im EEG äussert sich diese zunehmende «Entrücktheit» in einem stetig wachsenden Anteil von langsamen – niederfrequenten – und hohen Wellen, den sogenannten *Delta-Wellen*. Die Stadien 3 und 4 werden deshalb auch als *Delta-Schlaf* bezeichnet.



Ausschnitte aus «Schlafprotokollen». Die Abbildungen a bis f entsprechen der Reihe nach: Wachen, NREM-Stadium 1, 2, 3 und 4 sowie REM-Schlaf. Dabei geben die beiden oberen Kurven jeweils die Bewegungen der Augen wieder, die mittlere den Tonus der Kinnmuskulatur und die beiden unteren Kurven ein Elektroenzephalogramm (EEG). Beim Übergang vom Wachen zu den Stadien 1, 2, 3 und 4 des NREM-Schlafs zeigt das EEG zunehmend langsamere Wellen mit höherer Amplitude; im REM-Schlaf wird das EEG wieder flacher und hochfrequent. Der Muskeltonus ist in allen NREM-Stadien variabel, bricht jedoch im REM-Schlaf – abgesehen von gelegentlichen, kurzen «Zuckungen» – vollständig zusammen. Im NREM-Stadium 1 findet man langsame, rollende Augenbewegungen; während der Stadien 2, 3 und 4 fehlen Augenbewegungen. Im REM-Schlaf schliesslich treten Salven schneller Augenbewegungen auf, denen dieses Schlafstadium seinen Namen verdankt

Im Schlaf steckt Rhythmus

Schlaf ist somit kein einheitlicher Zustand, sondern in einzelne Phasen gegliedert – er besitzt Struktur. «Diese Struktur», erklärt Schulz, «lässt sich ermitteln, indem man EEG, Muskeltonus und Augenbewegungen über eine Nacht hinweg registriert. An diesen drei Grössen kann man die einzelnen Schlafphasen, also den REM-Schlaf und die vier NREM-Stadien, genau ablesen und sie dann in ihrer zeitlichen Reihenfolge und Dauer in einem Diagramm darstellen: Auf diese Weise erhält man ein sogenanntes *Schlafprofil*. Solche Schlafprofile bilden die Grundlage für die Forschungen, die Schulz gemeinsam mit Reimer Lund, ebenfalls vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie, und mit Jürgen Zulley vom Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie durchführt.

Zunächst geht es den Wissenschaftlern um die *Struktur und Steuerung* des normalen, das heisst des ungestörten Schlafs. Wie aus einem durchschnittlichen Schlafprofil hervorgeht, läuft der Schlaf in einzelnen Zyklen ab, jeweils gebildet aus einer längeren NREM- und einer kürzeren REM-Phase. Von Schlafbeginn an werden erst der Reihe nach die Phasen 1, 2, 3 und 4 des NREM-Schlafs durchlaufen; dann, nach etwa einer Stunde, erfolgt ein rascher, sprunghafter Übergang zu REM-Schlaf, der ungefähr zehn bis 15 Minuten dauert. An ihn schliesst sich erneut eine rund einstündige NREM-Phase an, wiederum gefolgt von einer REM-Phase, die allerdings – mit 20 bis 25 Minuten Dauer – etwas länger als die erste ausfällt. Dieses zyklische Wechselspiel wiederholt sich vier- bis sechsmal im Verlauf einer Nacht, bis der Schlafende, oft aus einer REM-Phase heraus, erwacht.

Bemerkenswert ist noch, dass gut die Hälfte des gesamten Delta-Schlafs (Stadien 3 und 4), also des Tiefschlafs, in den ersten Zyklus fällt. Danach sinkt sein Anteil, und vom vierten Zyklus an werden die Stadien 3 und 4 des NREM-Schlafs nicht mehr erreicht. Von da an überwiegt Stadium 2, das mit etwa 50 Prozent überhaupt die meiste Schlafenszeit ausmacht. Auf den REM-Schlaf entfallen im Schnitt 25 Prozent.

Zu dem fundamentalen, tagesperiodischen Wechsel von Wachen und Schlafen tritt mit den Schlafzyklen also ein zweiter schlafspezifischer *Bio-Rhythmus*. Er stellt, mit einer Periodenlänge von etwa 100 Minuten, einen sogenannten *ultradianen Rhythmus* dar – im Unterschied zu *zirkadianen* Rhythmen, die ungefähr einmal täglich schwingen, oder zu *infradianen* Rhythmen, die Perioden von mehr als einem Tag aufweisen, wie etwa der Menstruationszyklus der Frau.

Schlafforschung im Bunker

Ob die ultradiane Periodik erst mit Schlafbeginn einsetzt und mit dem Erwachen wieder endet, ist noch ungeklärt. Es könnte sein, dass sie tagsüber weiterläuft und dabei nur verdeckt ist. Die andere Frage, wie oder wodurch der zirkadiane Schlaf-Wach-Rhythmus gesteuert wird, untersucht Jürgen Zulley in einem unterirdischen Bunker in Andechs. Dort können Versuchspersonen abgeschirmt von jeglichen Umwelteinflüssen und Zeitinformationen nach ihrem eigenen «Taktgefühl» leben: So lässt sich feststellen, welche internen Faktoren das Schlafverhalten beeinflussen. Zulley fasst einige Ergebnisse dieser «Untertage-Schlafforschung» zusammen: «Ohne äussere Zeitgeber, wie etwa den



Im unterirdischen Bunker bleiben die Versuchspersonen vier Wochen ohne jede Zeitinformation von der Aussenwelt isoliert. Vor dem Schlafengehen müssen sie sich selbst die verschiedenen Elektroden aufkleben, die den Wissenschaftlern dann Auskunft über die Augenbewegungen, den Muskeltonus und die Hirnströme während des Schlafs liefern

Hell-Dunkel-Wechsel, weicht der Ruhe-Aktivitäts-Zyklus vom Normaltag ab. Seine Periode liegt dann um 25 Stunden. Es fiel ferner auf, dass die Versuchspersonen, obschon sie keinerlei Zeitinformation besitzen, regelmässig zu Bett gehen und noch regelmässiger wieder aufwachen – was eindeutig auf innere Uhren als Zeitmesser hinweist.»

Besonders wichtig war der Befund, dass Beginn und Dauer des Schlafs eng mit dem zirkadianen Verlauf der Körpertemperatur zusammenhängen, deren Minimum um 24-Stunden-Tag in die frühen Morgenstunden fällt. Dagegen gehen die Testschläfer im Bunker meist kurz vor dem Temperaturminimum schlafen. In den Fällen, in denen der Einschlafzeitpunkt mehrere Stunden vor dem Temperaturminimum lag, war die Schlafdauer soweit verlängert, dass der gleiche Aufwachzeitpunkt wie in den Nächten mit späterem Einschlafen erreicht wurde. Aufgrund des Verlaufes der Körpertemperatur lassen sich somit Einschlafzeit und Dauer des Schlafs vorhersagen.

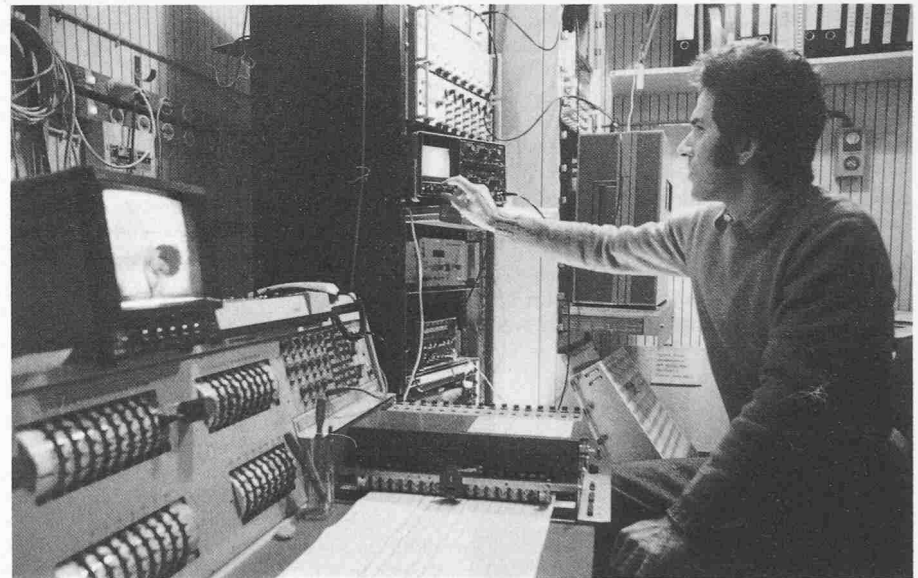
Schlafen und Wachen, das geht aus den Bunker-Versuchen hervor, werden dem Organismus nicht durch tagesperiodische Vorgänge in der Umwelt aufgezwungen. Solche externen Einflüsse wirken lediglich als sogenannte Zeitgeber; sie synchronisieren die inneren, körpereigenen Rhythmen mit der geophysikalischen Tagesperiodik. Speziell beim Menschen wird das Schlafverhalten massgeblich noch durch soziale Zeitgeber beeinflusst.

Schlafstörungen = Rhythmusstörungen?

So könnte auch die Ursache mancher Schlafstörungen in einer *Instabilität der internen Rhythmen* liegen. Der Organismus arbeitet dann nicht im «Gleichschritt», er gerät sozusagen aus seinem natürlichen Takt. Wie sich Schlafstörungen bei Patienten mit *Depressionen* im Schlafprofil ausdrücken, wird am Max-Planck-Institut für Psychiatrie untersucht. «Gestörter Schlaf», so dazu Reimer Lund, «ist eines der Hauptsymptome der Depression – wobei noch offen ist, ob hier ein ursächlicher Zusammenhang besteht oder ob wir nur ein Begleitphänomen vorliegen haben. Patienten mit neurotischen Depressionen klagen meist über Einschlaf-

schwierigkeiten, während endogen depressive Patienten nachts häufig erwachen und auch verfrüht aufwachen. Bemerkenswert ist ferner, dass der Schlaf bei endogen Depressiven oft mit einer REM- statt, wie bei Gesunden, mit einer NREM-Phase beginnt, und dass diese Störung während depressionsfreier Intervalle fast immer verschwindet.» Patienten mit Schlafstörungen versucht man durch *verhaltenstherapeutische Massnahmen* zu helfen. Dazu zählen unter anderem *Entspannungs- und autogenes Training*, die vom Problem des Einschlafens ablenken, oder die *Technik der paradoxen Intention*: Der Patient soll versuchen, wach zu bleiben, die Augen offen zu halten und einen Punkt im Dunkeln zu fixieren; oft schläft er darüber ein. Weiterhin wird beispielsweise die *Stimulus-Kontrolle* eingesetzt:

- Nur dann zum Schlafen legen, wenn man wirklich müde ist;
- das Bett ausschliesslich zum Schlafen benutzen, nicht darin essen oder fernsehen;
- das Bett verlassen, wenn man nicht einschlafen kann, und warten, bis sich Müdigkeit einstellt, und dies nötigenfalls immer wiederholen; dabei die Zwischenzei-



Im Schlaflabor des Münchner Max-Planck-Instituts für Psychiatrie: Über einen Monitor kann die im Nebenraum schlafende Versuchsperson beobachtet werden. Der Mehrkanal-Schreiber im Vordergrund zeichnet die für den Schlafverlauf charakteristischen Grössen auf: Augenbewegungen, Tonus der Kinnmuskulatur und Elektroenzephalogramm

ten mit eher langweiligen Beschäftigungen ausfüllen.

Von herkömmlichen Schlafmitteln raten die Schlafforscher in vielen Fällen ab, da sie allesamt keinen echten, wirklich erholsamen Schlaf bringen. «Schlafmittel wirken nicht gezielt, sondern bloss nebenbei schlafauslösend», stellt Schulz fest. «Die Struktur dieses <imitierten> Schlafs ist ganz anders als die des natürlichen. So können beispielsweise die REM-Phasen wochenlang unterdrückt werden. Setzt man das Mittel dann ab, werden die verlorengegangenen Schlafstadien zum Teil nachgeholt: Es kommt zu einem <Rebound> in Form eines hohen prozentualen REM-Schlafanteils. Das wiederum wird vom Organismus als unangenehm, als Entzugerscheinung erlebt – man schläft deshalb wieder schlecht, und man greift wieder zum Schlafmittel...» Dass man kein «echtes» Schlafmittel kennt, hängt letztlich damit zusammen, dass man nicht weiss, wodurch Schlaf natürlicherweise ausgelöst wird. Man

hat noch keine körpereigene Substanz gefunden, die – ähnlich einem Hormon – als Schlaffaktor wirkt. Und man hat auch keine Hinweise auf irgendein Stoffwechselprodukt, das tagsüber angereichert wird und dann Schlaf induziert, um nachts wieder abgebaut zu werden.

Ungewiss ist derzeit auch noch die Funktion des Schlafs. Die bisher vorliegenden Befunde ergeben noch kein einheitliches Bild. Möglicherweise muss man NREM- und REM-Schlaf in ihren Rollen gesondert betrachten. Dabei scheint der NREM-Schlaf in erster Linie für die körperliche Erholung wichtig zu sein: Sowohl nach Schlafentzug als auch nach starker körperlicher Belastung treten vermehrt die Stadien 3 und 4 auf. Bemerkenswert ist auch, dass während dieser Tiefschlaf-Stadien rund 90 Prozent des gesamten Wachstumshormons ausgeschüttet werden – womit weiter zusammenhängen könnte, dass die Stadien 3 und 4 bei Kindern vermehrt auftreten, in höherem Alter aber oft gar nicht mehr erreicht werden.

Andererseits zeigen Säuglinge und Kinder aber auch extrem viel REM-Schlaf. Er überwiegt bereits in der vorgeburtlichen Reifungsphase und macht während der ersten

Lebenswochen mehr als die Hälfte der gesamten Schlafdauer aus. Danach sinkt der REM-Anteil stetig, bis er beim Erwachsenen nur mehr rund 20 Prozent der Gesamtschlafzeit beansprucht. Zusammen mit einer anderen Beobachtung knüpft sich daran eine Spekulation um die Funktion des REM-Schlafs. Wie nämlich aus elektrophysiologischen Messungen hervorgeht, laufen während der REM-Phasen neuronale Impulse aus evolutionsgeschichtlichen älteren Strukturen des Gehirns in jene Bereiche der Grosshirnrinde, die der visuellen Wahrnehmung dienen; normalerweise, im Wachen, verlaufen die Impulse in entgegengesetzter Richtung. Vielleicht, so vermuten die Schlafforscher, werden über die «verkehrten» Impulse während der REM-Phasen genetische Programme ausgeschrieben – die ja nicht nur in den Genen gespeichert sind, sondern sich in Strukturen und Funktionen des Körpers, also auch des Gehirns, verwirklichen müssen.

Walter Frese, München