

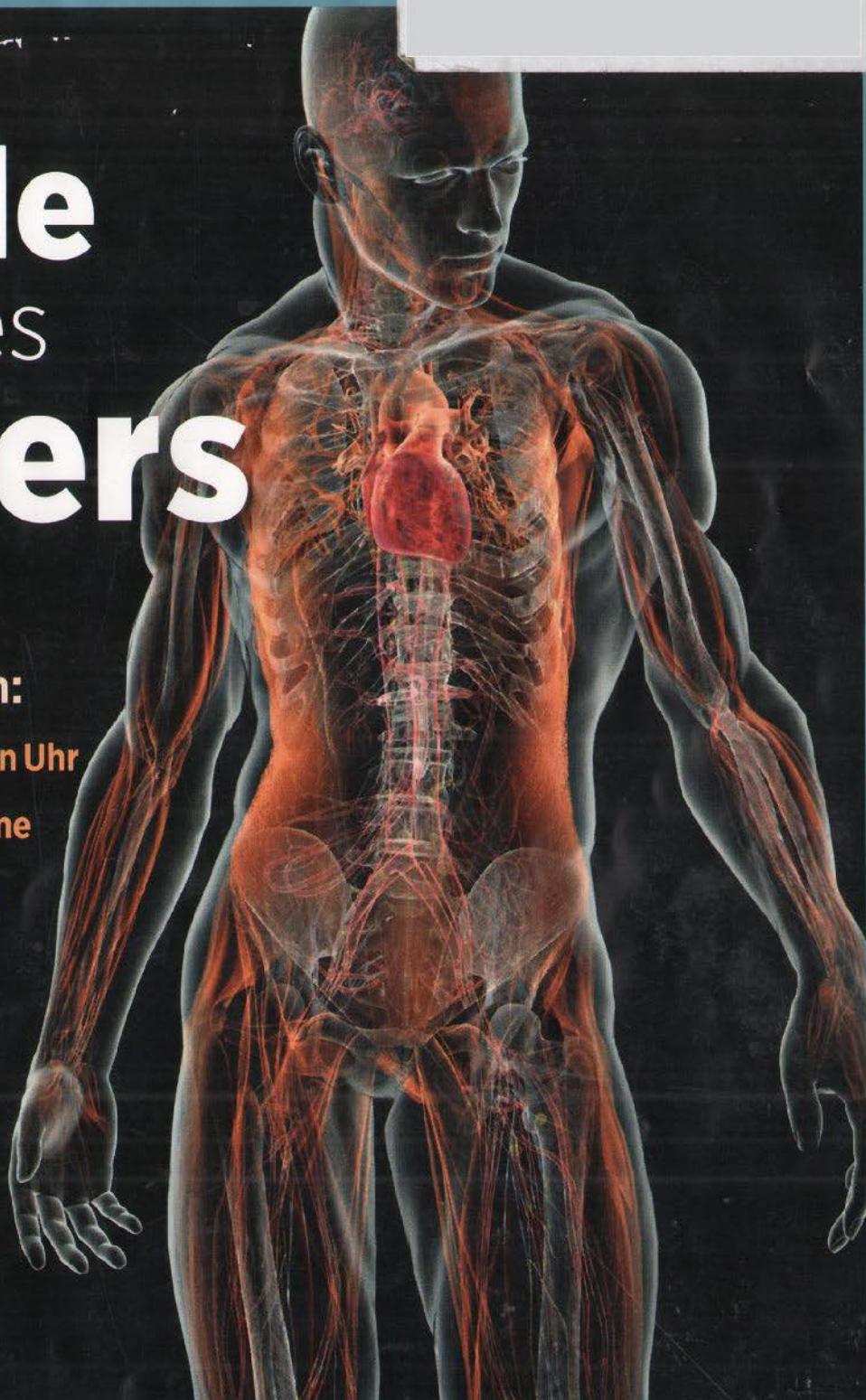
# GEO kompakt Nr. 26

Die Grundlagen des Wissens

## Die **Signale** unseres **Körpers**

Forscher enträtseln das  
**Wunderwerk Mensch:**

- Das Geheimnis der **inneren Uhr**
- Die Botschaften der **Träume**
- Die Logik des **Schmerzes**



### DOSSIER

Wie unser Organismus  
funktioniert

### STRESS

Warum es ihn gibt - und  
wie man ihn bekämpft

### EVOLUTION

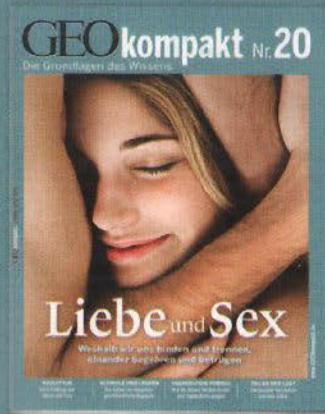
Welche Fehler die Natur  
bei uns gemacht hat

### MEDIZIN

Wie Ärzte in Zukunft  
heilen werden

26  
4 196472 308501

www.GEOkompakt.de



Man kann nie genug wissen. **GEO kompakt.**

Jetzt im gut sortierten **Buch- und Zeitschriftenhandel**. Falls Sie eines dieser Hefte verpasst haben, bieten sich jetzt folgende Möglichkeiten: Sie können zum Zeitschriftenhändler Ihres Vertrauens gehen und danach fragen. Sie können sich direkt an **GEO** wenden – Tel. 01805/861 8000\* oder Fax 01805/861 8002\*. Sie können im Internet unter [www.geoshop.de](http://www.geoshop.de) nachschauen. Oder Sie können sich auf das neue Heft freuen.

Weitere Produkte im Internet unter [www.geoshop.de](http://www.geoshop.de)

**GEO kompakt**



Liebe Leserin, lieber Leser,

unser Körper spricht eine Sprache, die wir nicht kennen. In unserem Inneren tauschen die Organe ständig Botschaften aus – etwa Herz und Lunge, Magen und Hirn –, doch fast alles läuft im Verborgenen ab.

Sensoren überwachen permanent den Organismus und speisen alle Informationen, die sie erfassen – Körpertemperatur, Stellung eines Gelenks, den Sauerstoffgehalt im Blut –, in ein verwobenes Informationssystem ein.

780 000 Kilometer Nervenfasern verbinden jeden Winkel des Zellverbundes Mensch letztendlich mit dem Gehirn. Abermillionen elektrischer Signale rasen pausenlos durch diese Nachrichtenkanäle, informieren die Schaltzentrale im Kopf in Millisekunden über den Status der Organe, übertragen Sinneseindrücke oder schicken Befehle an die Muskeln.

Daneben wird unser Körper auch von biochemischen Botenstoffen gesteuert: von Hormonen wie Adrenalin, Testosteron oder Insulin, die in jeder einzelnen Zelle wichtige Prozesse in Gang setzen.

All das zusammen verbindet sich zum komplexesten Daten- netz der Welt – einem Verbund, der uns hocheffizient das Leben bewältigen lässt, ohne dass wir willentlich eingreifen müssen.

Beispiel Angst: Wann immer wir plötzlicher Gefahr ausgesetzt sind, melden Sehzellen in den Augen über ein Netz von Neuronen ihre Informationen über die Notlage an das Gehirn, das für eine Ausschüttung von Hormonen sorgt, die unseren Körper in höchste Alarm- stimmung bringen. All das geschieht unwillkürlich und in wenigen Sekunden.

Beispiel Infektion: Wann immer uns Erreger befallen, setzen sich Millionen Ab- wehrzellen des Immunsys- tems in Gang und bekämpfen

die Eindringlinge in mehreren Eskalationsstufen derart raffiniert, dass es ihnen schließlich sogar gelingt, unseren Organismus eine Zeit lang immun zu machen gegen weitere Angriffe ebendieser Erreger.

Das vorliegende Heft ist der Kommunikation in unserem Inneren gewidmet – und damit eine Ergänzung zur Ausgabe Nr. 2 von GEOkompakt, in der wir vor sechs Jahren den menschlichen Körper in seinen Grundfunktionen vorgestellt haben.



GEOkompakt-Redakteur Jörn  
Auf dem Kampfe hat das Konzept für  
diese Ausgabe erarbeitet

Sie werden auf den folgenden Seiten neben Beiträgen über klar definierte Körpersignale (etwa den Schmerz, den Traum, die innere Uhr, den Stress) auch solche finden, bei denen man nicht sofort an Botschaften des Organismus denkt.

Etwa den Artikel über „Die Uhr des Lebens“, der von den wichtigen Phasen unserer Existenz handelt: Geburt, Wachstum, Tod. Doch auch bei diesem Thema wird sehr schnell deutlich, wie sehr Hormone und andere Körpersubstanzen jede Minute unseres Daseins bestimmen – und vor allem die großen Brüche in unserer Biografie, etwa die Pubertät.

Oder den Text über die „Medizin von morgen“, der verdeutlicht, wie viel stärker noch als heute die Ärzte in Zukunft auf all das achten werden, was unser Inneres ihnen zu sagen hat. Oder den Beitrag über unsere Symbiose mit Billionen von Kleinstlebewesen, etwa Darmbakterien, die unseren Körper als Biotop nutzen und nicht nur untereinander auf hochkomplexe Weise kommunizieren, sondern auch einen direkten Draht zu ihrem Wirt haben, also zu uns Menschen.

Auch wenn es Biologen ablehnen, beim *Homo sapiens* von der „Krönung der Evolution“ zu reden (denn ist das nicht jedes andere Lebewesen in Bezug auf sein Biotop auch?): Ein wahres Wunderwerk ist er schon, unser Körper.



Jedes Jahr im Mai wird von einer hoch angesehenen Jury in mehreren Kategorien der „Henri-Nannen-Preis“ für herausragende journalistische Leistungen vergeben. Vor zwei Jahren ist mein Kollege Malte Henk mit seiner Reportage über Teilchenphysik (erschienen in GEOkompakt Nr. 14) unter die letzten drei gekommen. In diesem Jahr ist er erneut im engeren Kreis der Kandidaten: mit seinem Text „Im Herz der Finsternis“, dem Porträt eines Mörders (erschienen in GEOkompakt Nr. 25 „Gut + Böse“).

In der Kategorie „Sonderpreis“ ist zudem einer unserer Bild-essays in der Endauswahl: der Beitrag „Die Geschichte des Lebens“, der die zwölf großen Zeitalter in der Historie unseres Planeten vorstellt. Erarbeitet wurde dieser Essay von den beiden Hamburger Illustratoren Jochen Stuhrmann und Tim Wehrmann sowie von dem Redaktionsteam Susanne Gilges, Rainer Harf und Torsten Laaker.

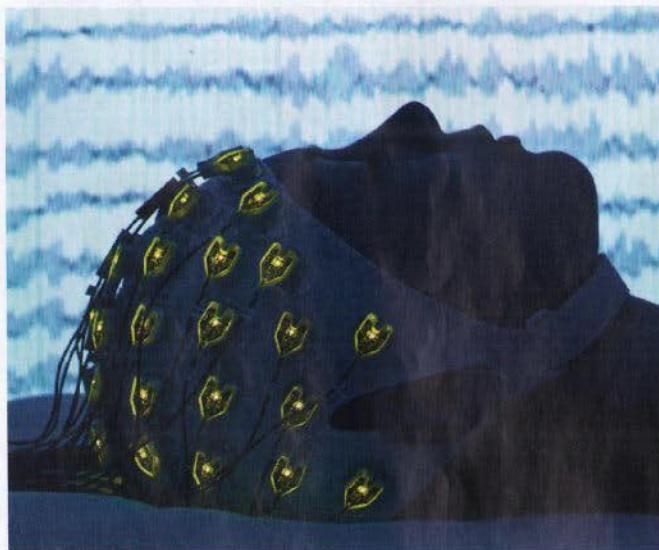
Ich gratuliere allen Beteiligten.

Herzlich Ihr

*Michael Siefen*



**Lichttherapie:** Mit Speziallampen versuchen Ärzte, die Signalkaskaden in unserem Körper zu beeinflussen - und dem Organismus längere Tage zu suggerieren [Seite 6](#)



**Schlaf und Traum:** Anhand von Gehirnströmen wollen Wissenschaftler entschlüsseln, was in uns vorgeht, wenn uns die Müdigkeit übermannt. [Seite 30](#)



**Biorhythmus:**  
Wie unsere innere Uhr  
arbeitet - und sich  
etwa Einhandsegler  
Jörg Riechers mit  
extremen Bedingun-  
gen arrangiert. [Seite 32](#)



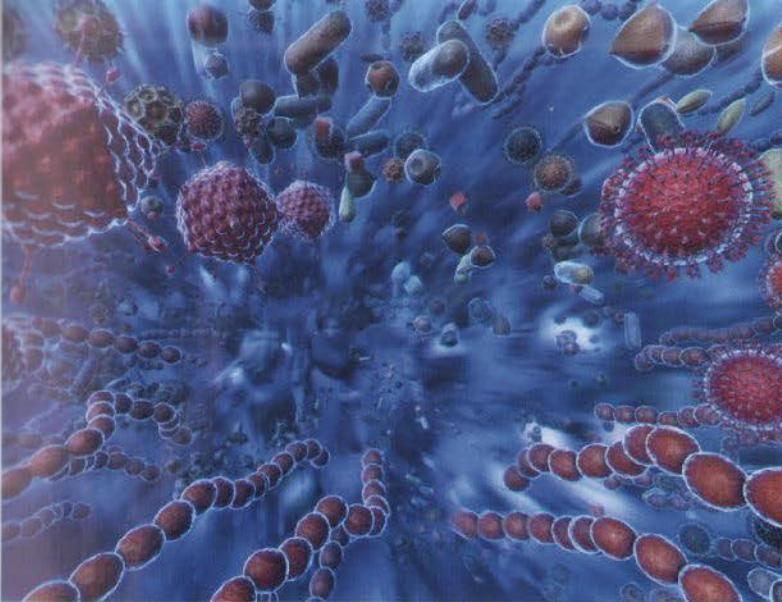
**Die Logik des Schmerzes:** Weshalb wir ohne Qualen nicht überleben könnten - und wie Mediziner die Pein dennoch besiegen wollen. [Seite 20](#)



**Evolution:** Welche  
Fehler die Natur bei der  
Konstruktion des  
*Homo sapiens* gemacht  
hat - zum Beispiel bei  
unseren Knien. [Seite 42](#)



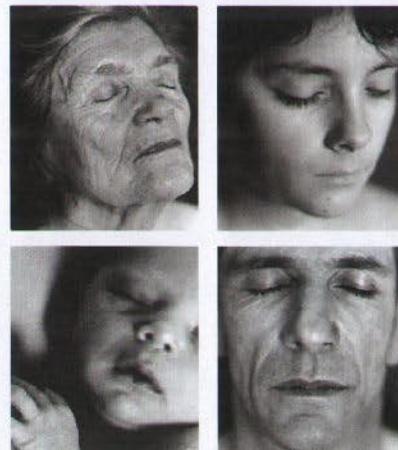
**Lebensraum Mensch:** Unser Körper ist ein Rücken, bewohnt von bis zu 100 Billionen  
Bakterien. Sie tun uns gut - solange die Immunreaktion funktioniert. [Seite 70](#)



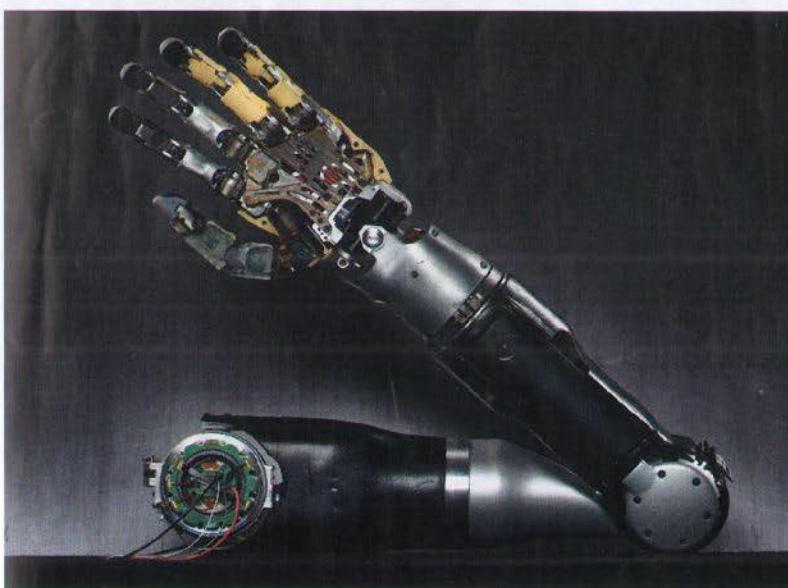
**Immunsystem:** Wann immer uns unerwünschte Eindringlinge befallen, kommt es im Körper zu spektakulären Vorgängen. Auf hochkomplexe Weise werden die Mikroben bekämpft. [Seite 84](#)



**Die Kraft der Erneuerung:** Die Heilkraft des Körpers und der Traum der Ärzte, Gliedmaßen nachwachsen zu lassen. [Seite 108](#)



**Ein Menschenleben im Zeitraffer:** Wie unser Körper entsteht, wächst und vergeht – und wie sich das Ende hinauszögern lässt. [Seite 118](#)



**Die Medizin der Zukunft:** Hightech-Prothesen sowie Medikamente, die auf den individuellen Patienten zugeschnitten sind – neue Techniken werden die Heilkunde revolutionieren. [Seiten 78 und 144](#)

## Was uns der Körper zu sagen hat

Bildessay über die geheimnisvollen Botschaften aus unserem Inneren

6

## Die Logik des Schmerzes

Weshalb die körperliche Pein uns vor Gefahren schützt – und warum sie für manche Menschen zum Martyrium wird

20

## Wenn Dunkel unseren Geist umfängt

Schlaf und Traum: Forscher entschlüsseln die sonderbare Metamorphose in der Nacht

30

## Kompromisswesen Mensch

Die Schwachstellen unseres Körpers

42

## Biorhythmus

Wie unsere inneren Uhren arbeiten

52

## Die heimlichen Siedler

Ohne Billionen winziger Mitbewohner könnten wir nicht überleben

70

## Die Pille nach Maß

Ärzte betrachten individuelle Körpersignale und entwickeln völlig neue Heilmittel

78

## Krieg gegen die Mikroben

Wie das Immunsystem sich gegen Eindringlinge wehrt – und dabei zuweilen den eigenen Körper attackiert

84

## Ein Leben unter Druck

Warum wir ohne Stress nicht existieren könnten

104

## Die Kraft der Erneuerung

Auf welch spektakuläre Weise der Körper sich selbst repariert

108

## Die Uhr des Lebens

Der jahrzehntelange Kampf des Menschen gegen den Verfall

118

## Dossier

Wie unser Organismus funktioniert

131

## Die Medizin von morgen

Von Nanomaschinen, Minikameras und Operationsrobotern – die Hightech-Diagnostik der Zukunft

144

### Bildnachweis

69

### Impressum

69

### Vorschau: »Das Rätsel Zeit«

154

Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 21. Februar 2011

**Alle Fakten und Daten** in diesem Heft sind vom GEO kompakt-Verifikationsteam auf ihre Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden.

**Informationen** zum Thema und Kontakt zur Redaktion unter [www.geokompakt.de](http://www.geokompakt.de)

Titelbild: Bryan Christie



Gefangen



# Die Signale des Körpers

Nur ein Bruchteil dessen, was in unserem Körper geschieht, dringt in unser Bewusstsein. Die meisten Prozesse laufen im Verborgenen ab, gesteuert durch unsichtbare Signale: Muskeln und Nerven, Herz und Lunge, Darm und Niere, Leber und Hirn kommunizieren pausenlos miteinander. Drüsen etwa schütten biochemische Botenstoffe aus, die im Organismus verteilt werden, Sinneszellen speisen jede Sekunde Millionen elektrischer Impulse in unser Nervensystem. Die Nachrichten jagen durch dieses rund 780 000 Kilometer lange Datennetz und informieren unser Gehirn permanent über unseren Zustand und die Umwelt. Ist ein Körperteil verletzt, empfinden wir Schmerz. Droht Gefahr, versetzt uns das Denkorgan in Angst. Geht abends die Sonne unter, werden wir müde. Die fortwährende Verständigung hält uns am Leben – und allmählich lernen Forscher, die geheime Sprache des Körpers zu entschlüsseln

Texte: Rainer Harf

Tag für Tag pumpt unser Herz 7000 Liter Blut durch ein Gefäßsystem, das 100 000 Kilometer misst. Mit Elektroden detektieren Forscher die elektrischen Impulse, die der faustgroße Muskel sendet





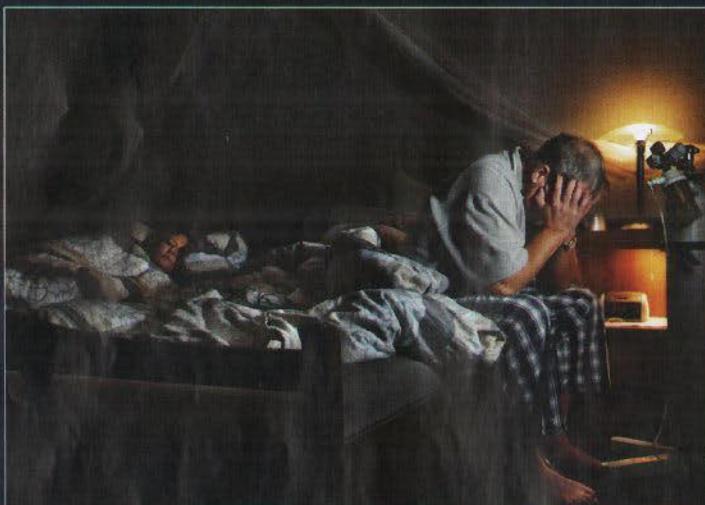
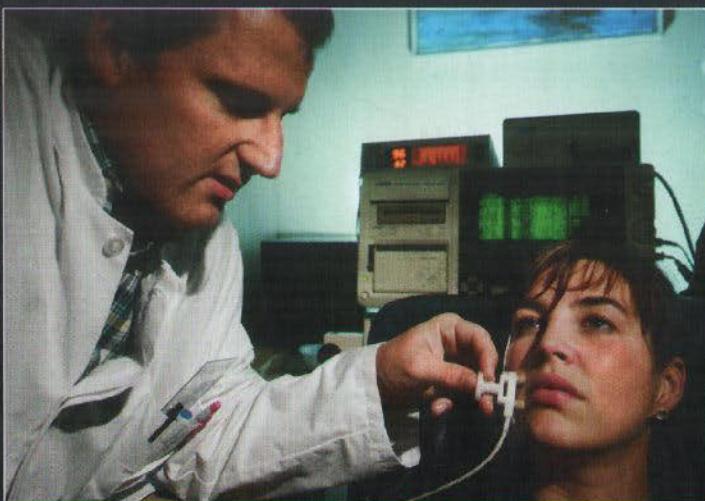
## Innere Uhr: Im Takt der Moleküle

Jeder Mensch verfügt über eine biochemische Zeitmessung, die seit Millionen von Jahren in den Genen verankert ist. Das Uhrwerk ist von Geburt an programmiert und bestimmt, wann wir müde werden, wann wir aufstehen – und wann wir sterben.

 Sonnenlicht justiert unsere innere Uhr. Im sibirischen Winter aber verschwindet die Sonne über Wochen. Zum Schutz von Körper und Seele bestrahlt man Kinder mit UV-Licht.

 Depressive lassen sich in einer süddeutschen Klinik mit Licht therapieren: Die Netzhaut leitet die Signale ans Gehirn, das daraufhin den Botenstoff Serotonin ausschüttet.

 Leben gegen den Biorhythmus ist ungesund: Wer nachts, wie hier in New York, arbeiten muss, macht häufiger Fehler und wird eher krank.



## Schmerz: Die rettende Qual

Er ist verhasst wie kein anderes Gefühl. Doch ohne ihn ließen wir Gefahr zu sterben: Schmerz warnt uns vor körperlicher Verletzung, überkommt uns immer dann, wenn wir uns verletzt haben oder krank sind – und erzieht uns so von früh an zur Vorsicht.



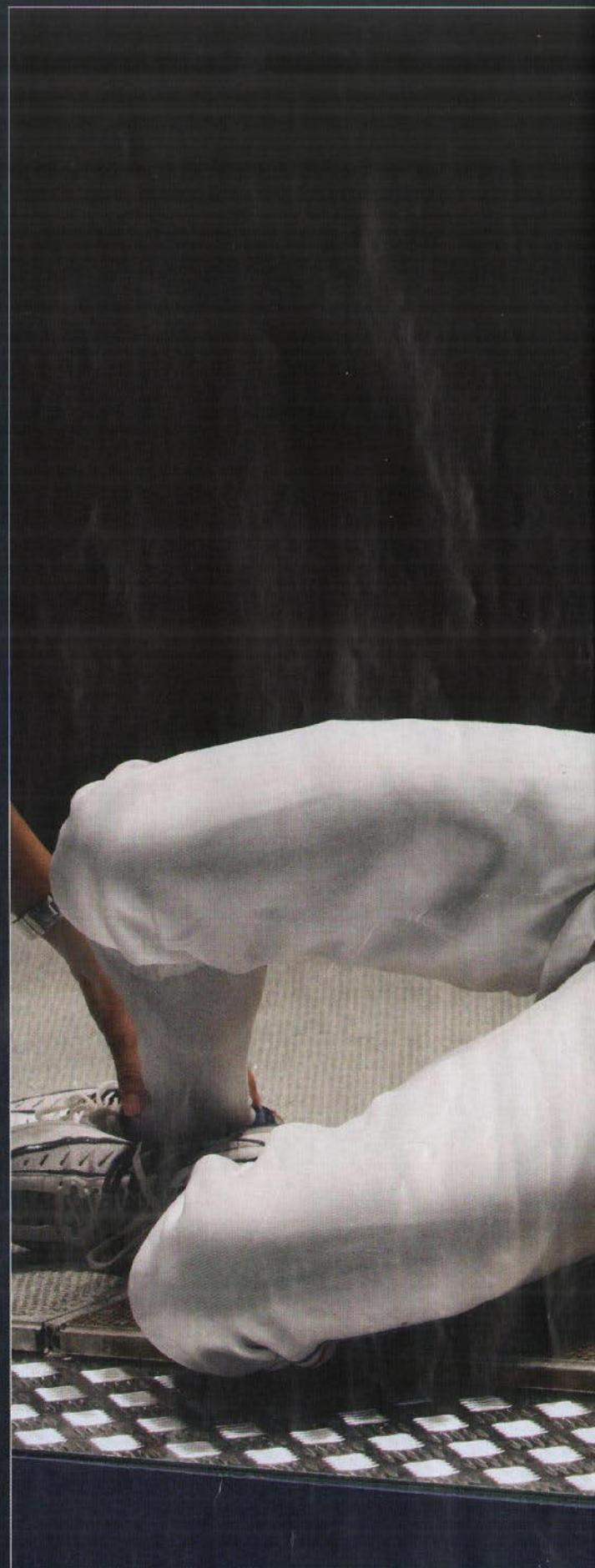
Wenn Menschen stürzen, durchzucken Myriaden elektrischer Impulse den Leib, Muskeln ziehen sich zusammen, in verschiedenen Hirnarealen flackern Nervenzellen.



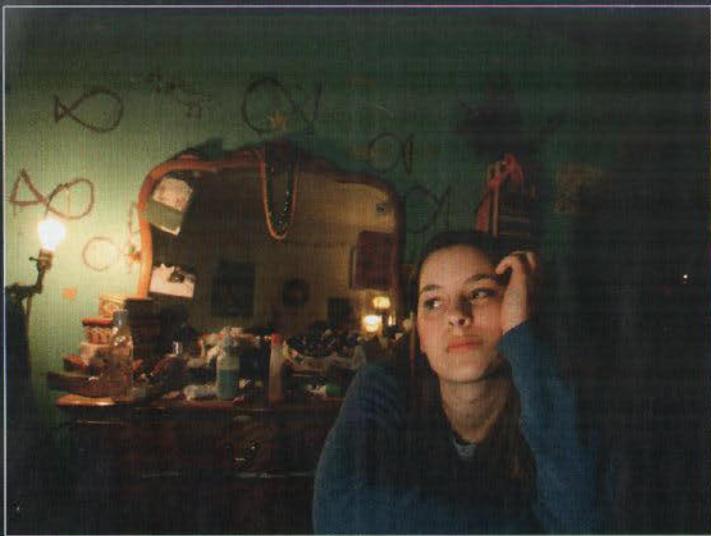
Schmerzdiagnostik: Mittels feiner Messfühler registriert ein Arzt elektrische Impulse, die von einem Muskel ausgehen. So erkennt er, ob Nerv oder Gewebe beschädigt sind.



Wenn Schmerz zur Krankheit wird: Mehr als 15 Prozent aller Erwachsenen leiden unter anhaltenden Schmerzen. Bei ihnen ist das natürliche Alarmsystem häufig grundlos aktiv.







## Umbruch: Abschied von der Kindheit

Nie signalisiert der Körper deutlicher, dass er sich verändert, als in der Pubertät: Das heranwachsende Gehirn schüttet Botenstoffe aus, die bei Mädchen Brüste, bei Jungen Muskeln wachsen lassen – und sie vorübergehend in tiefe Verwirrung stürzen.

■ Ohne sich dessen bewusst zu sein, folgen Jugendliche der biochemischen Sprache ihres Körpers: Getrieben durch Hormone, entdecken sie ihre Sexualität.

■ Wut oder Freude, Ausgelassenheit oder Melancholie: Die Stimmung von Pubertierenden schwankt enorm. Das liegt, so eine These, an Umbauarbeiten im reifenden Gehirn.

■ Jede Sekunde baut das pubertierende Hirn 30 000 Schaltstellen ab, andere Neurone vernetzen sich – das beeinträchtigt oft das Einfühlungsvermögen von Jugendlichen.









## Träume: Wenn unser Geist auf Reisen geht

Sobald wir einschlafen, driften unsere Gedanken ab, bis wir uns in einer Welt irrationaler Geschichten verlieren. Psychologen vermuten, dass diese Träume von Erlebnissen und Erfahrungen, Ängsten und Sehnsüchten hervorgerufen werden, die aus unserem Innersten hervorbrechen und uns freier assoziieren lassen als bei Tage.

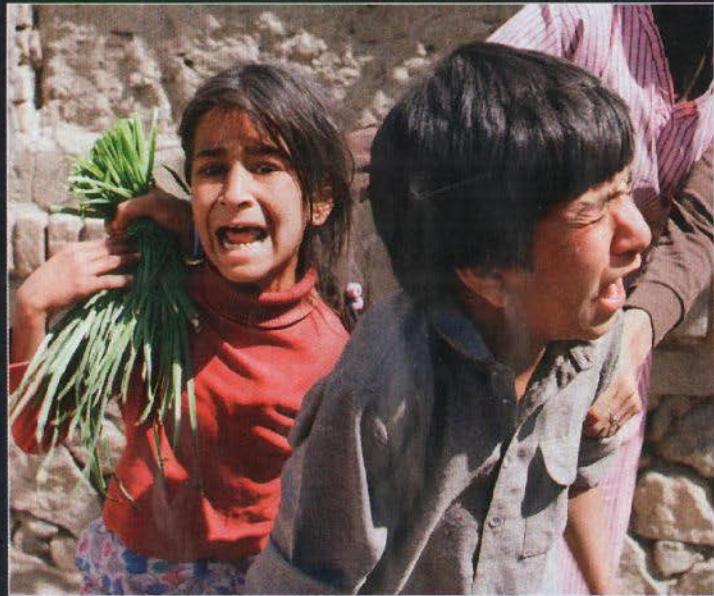


Der schlummernde Leib ruht, nur der Geist treibt traumwandlerisch umher. Ein Hirnareal, das »Motivationszentrum«, dirigiert wohl die nächtliche Reise und erlaubt uns, Wünsche ungeniert auszuleben.



In der Nacht lässt unser Verstand los: Gedankenschnipsel flattern umher, Gefühle steigen empor, wir vermögen alles mit allem zu verbinden und betrachten Ereignisse aus ungekannter Perspektive.





## Angst: Das archaische Warnsignal

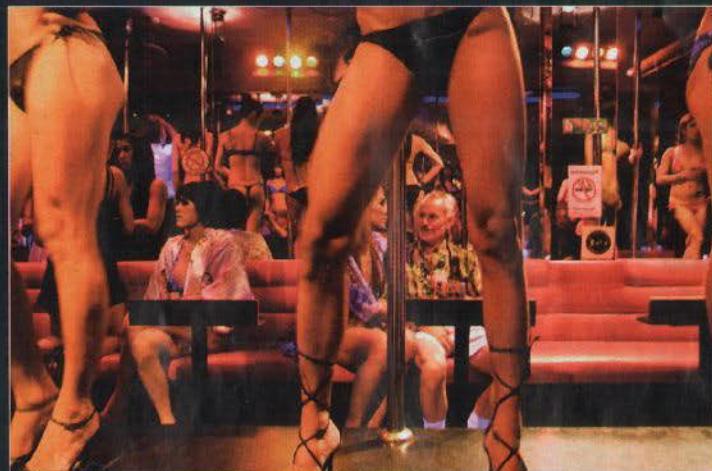
Sie ist ein untrügliches Zeichen für Gefahr, ein uraltes Gefühl, das die Psyche augenblicklich in Alarmzustand versetzt: Panik lässt die Sinne hellwach werden – und macht unseren Körper fluchtbereit.

■ Bei Bedrohung geraten wir wie dieses afghanische Mädchen augenblicklich in einen »Angstmodus«: Sämtliche Aufmerksamkeit richtet sich auf die Gefahrenquelle.

■ Schmerz lenkt die Aufmerksamkeit ins Innere des Körpers, Furcht treibt den Blick nach außen – wie bei diesem illegalen Migranten, der in Spanien festgenommen wurde.

■ Schwindel und Zittern, Tränen und Schreie: Angst kann übermächtig werden und in Panik umschlagen, etwa wenn Kinder von ihrer Mutter getrennt werden.





## Sex: Die Chemie der Triebe

Liebe, Lust und Begehrten sind Ausdruck hochkomplexer Vorgänge in unserem Körper: Rund ein Dutzend verschiedener Hormone orchestriert vermutlich das Verlangen nach Sex und einem Partner.

■ Feuerwerk an Nervenimpulsen: In Sekundenbruchteilen tauschen Küssende unbewusst Informationen darüber aus, ob der Partner rabiat oder sinnlich, gesund oder kränklich ist.

■ Der Orgasmus verläuft bei Männern und Frauen unterschiedlich: Bei ihm steigt die Durchblutung im Hirn stark an, bei ihr werden große Teile des Denkorgans ausgeschaltet.

■ Eros entsteht im Gehirn: Sieht ein Mann weibliche Brüste, lange Beine, nackte Haut, reagieren unwillkürlich bestimmte Hirnareale, die seine Fantasie anregen. □

# Die Logik des Schmerzes

**Körperliche Pein ist unsere Lebensversicherung: Ohne ihre Signale würden wir Gefahren wie eine Krankheit oder eine heiße Herdplatte kaum bemerken. Doch Schmerz kann sich auch verselbstständigen und chronisch werden. Forscher sind dabei, die komplexen Mechanismen dahinter zu entschlüsseln – und haben möglicherweise eine entscheidende Entdeckung gemacht, die Millionen Menschen helfen könnte**

Text: Martin Paetsch

Illustrationen: Alexander Tsiaras



Wenn es im Bauch schmerzt, dann ist eine Signalkette von der Quelle der Pein bis zum Kopf aktiv. Das Prinzip dahinter hat sich über Jahrmillionen entwickelt und ist im Menschen zu einem System von ungeheurer Komplexität herangereift. Empfinden wir Qualen, durchzucken elektrische Impulse den Organismus, ist in verschiedenen Zonen des Gehirns eine Fülle von Nervenzellen aktiv, ziehen sich Muskeln unwillkürlich zusammen. Der New Yorker Illustrator Alexander Tsiaras hat diese durchleuchteten Körper aus Fotos und Grafiken erstellt

In seiner Heimat in Nordpakistan erregt der Junge schon früh Aufsehen: Bereits mit zehn Jahren tritt er als Straßenkünstler auf, vollführt dabei schier unfassbare Kunststücke. Unter den ungläubigen Blicken seiner Zuschauer rammt er sich Messer durch den Arm. Und er geht barfuß über brennende Kohlen, ohne irgendein Anzeichen von Schmerz zu zeigen.

Als Wissenschaftler auf den Fall aufmerksam werden, ist es bereits zu spät: Um Freunde zu beeindrucken, ist der Junge an seinem 14. Geburtstag von einem Dach gesprungen – und an seinen Verletzungen gestorben.

Doch im Verwandtenkreis des Verunglückten stoßen die Forscher um Geoff Woods von der University of Cambridge auf ein seltsames Phänomen: Sechs weitere Kinder, die alle dem Clan entstammen, zeigen sich ebenso unbbeeindruckt von Schmerzen.

Ihre Körper sind voller Schrammen, blauer Flecke und Spuren von Knochenbrüchen. Ihre Münden sind entstellt, weil sie sich, ohne etwas zu spüren, früh Teile der Lippen oder der Zunge abgebissen haben.

Dass einige wenige Menschen unter einer solchen Schmerzunempfindlichkeit leiden, ist der Wissenschaft bereits bekannt. Doch nur äußerst selten tritt die Störung so gehäuft auf wie in diesem pakistanischen Clan.

Für Woods ist es eine einmalige Gelegenheit. Denn im Erbgut der Familie verbergen sich Antworten auf drängende Fragen: Wie können Ärzte die Qualen bekämpfen? Lassen sie sich ausschalten wie bei diesen Kindern? Und wie entsteht der Schmerz überhaupt?

Jeder wohl kennt und fürchtet dieses Gefühl. Sei es das Ziehen im Zahn oder das unablässige Pochen einer Migräne, sei es der Geburtsschmerz einer Mutter oder die Tortur einer Nierenkolik. Seit jeher ist der Schmerz der Begleiter des

Menschen. Forscher haben mittlerweile zwar wirkungsvolle Schmerzmittel entwickelt und begonnen, die molekularen Mechanismen der Pein zu entschlüsseln. Doch natürlich ist der Schmerz noch nicht aus der Welt. Im Gegenteil: Da immer mehr Patienten schwere Erkrankungen und selbst Rückfälle überleben, leiden immer mehr an quälenden Begleiterscheinungen.

Der Schmerz kommt in unzähligen Varianten. Er kann kurz auflammen, als akuter Ausbruch, der schnell vorüber ist. Oder er hält dauerhaft an, wird chronisch, bleibt über Jahre im Bewusstsein.

Und die peinvolle Erfahrung ist für jeden Menschen anders: Die gleiche Verletzung kann dem einen unerträgliche Qualen bereiten, während der andere kaum etwas davon spürt.

Wie stark wir Schmerz empfinden, hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von unseren Genen. So brauchen Rothaarige beim Zahnarzt meist eine stärkere Betäubung: Denn jene Genmutation, die ihre Haarfarbe prägt, erklärt vermutlich auch ihre Anfälligkeit für bestimmte Arten von Schmerz.

Auch unsere Gefühle und Erwartungen spielen eine wichtige Rolle. So kann schon der Gedanke an Belohnungen – etwa Sex – Schmerzen lindern. Dagegen erleben Menschen, die zur Schwermut neigen, ihre Körperqualen oft sehr viel intensiver.

Doch warum verspüren wir überhaupt Schmerz? Warum begleitet er uns ein Leben lang, vom ersten Sturz als Kleinkind bis hin zum Todeskampf?

**SO SEHR WIR** auch darunter leiden, so sehr es uns zur Verzweiflung treibt: Wir brauchen dieses verhasste Gefühl. Denn es verrät uns zum Beispiel, wenn sich tief unter einem Zahn ein Eiterherd verbirgt. Es ermahnt uns, einen gebrochenen Arm ruhig zu stellen. Und es ermöglicht uns, die Hand von einer heißen Herdplatte zurückzuziehen, bevor wir uns ernsthaft verbrennen. Es erzieht uns so von klein auf zur Vorsicht.

Jene wenigen hingegen, die wie die Kinder aus Pakistan aufgrund eines genetischen Defekts keinerlei Pein verspüren, sind von Geburt an in ständiger Lebensgefahr. Ohne Angst vor Schmer-

zen erleiden sie eine Verletzung nach der anderen. Ihre Knochen sind durch schlecht verheilte Brüche verformt. Ihre Gelenke verschleißt, weil sie stundenlang ohne jedes Unbehagen in der gleichen Position verharren.

Vor allem aber merken sie nicht, wenn in ihrem Körper eine gefährliche Krankheit ausbricht. Weil alle Warnsignale fehlen, kann eine Blinddarmentzündung ihren Tod bedeuten. Oft sterben sie deshalb schon in jungen Jahren.

Der Schmerz ist also lebenswichtig: Er ist eine Art biologischer Alarm, der jedes Mal aufschreibt, wenn unser Körper Schaden zu nehmen droht.

Einige Teile dieses Warnsystems sind wahrscheinlich uralt. Wie weit seine Ursprünge zurückreichen, haben genetische Studien gezeigt. Dabei haben Forscher eines jener Erbmerkmale untersucht, auf denen auch unsere Schmerzreaktion beruht.

Es kommt in ähnlicher Form bei sehr viel primitiveren Lebewesen vor – etwa der Mücke oder der Fruchtfliege. In dem die Wissenschaftler die Struktur des Gens bei verschiedenen Arten verglichen, konnten sie rekonstruieren, wie es sich im Laufe der Evolution verändert hat.

Demnach ist dieses Merkmal bereits vor mindestens 500 Millionen Jahren entstanden – und damit zu einer Zeit, als die ersten komplexeren Lebensformen den Ozean bevölkerten.

Schon damals verfügten Organismen wahrscheinlich über einen körpereigenen Alarm: Selbst wenn dieser Mechanismus wohl noch sehr primitiv war, bewahrte er sie doch vor Gefahren, ließ sie vielleicht rechtzeitig reagieren, ehe

sich schädliche Chemikalien in ihre Außenhülle fressen konnten.

Doch während diese Reaktion bei einfachen Lebewesen immer noch rein automatisch abläuft, ist sie beim *Homo sapiens* ungleich vielschichtiger.

Denn unsere biologische Warnanlage hat sich im Laufe von Jahrtausenden beständig weiterentwickelt und ist so zu einem System von ungeheuerer Komplexität herangereift. Wenn wir Qualen erleiden, laufen in unserem Körper zahlreiche bewusste und unbewusste Prozesse ab, elektrische Impulse durchzucken den Organismus, Muskeln ziehen sich unwillkürlich zusammen, in verschiedenen Arealen des Gehirns flackern Nervenzellen (Neurone) auf.

**DIE SYMPHONIE** des Schmerzes beginnt in zahllosen winzigen Sensoren, die sich in der Haut verbergen, aber auch fast den gesamten Körper durchziehen. Nur die Gewebe weniger Organe, etwa des Hirns und der Leber, sind frei von diesen Fühlern und schmerzen daher nicht, wenn sie verletzt werden.

Diese Sensoren sind nichts weiter als die Spitzen langer Fasern, die zu Neuronen im Rückenmark gehören. Von dort aus entsenden diese Zellen ihre Fortsätze bis in die entferntesten Körperteile, um selbst in diesen Regionen drohende Gefahren zu registrieren.

Manche der Faserspitzen reagieren auf starken Druck, wie er etwa bei einem Schlag entsteht, oder auf

**Schmerzsignale  
rasen 30 Meter  
pro Sekunde  
schnell durch  
die Nerven-  
fasern des  
Körpers**

Temperaturen von mehr als 45 Grad Celsius – deshalb empfinden wir eine solche Hitze als Schmerz. Andere Fühler sprechen darüber hinaus auch auf chemische Reize an.

Verbrennen wir uns zum Beispiel den Finger an einer Flamme, kommt es in den Schmerzmeldern zu mehreren Reaktionen: Sie schütten chemische Warn-



**Beim Menschen  
ist Schmerz  
eine vielschichtige**

**Regung. Bereits  
vor 500 Millionen  
Jahren besaßen  
vermutlich primitive  
Lebensformen zum  
ersten Mal ein ein-  
faches Warnsystem**

stoffe aus, die letztendlich das umliegende Gewebe anschwellen lassen: Es entzündet sich. Andere Moleküle versetzen benachbarte Nervenenden in Alarmbereitschaft, die nun auch auf schwache Reize reagieren: Deshalb ist die Haut rings um eine Verletzung besonders empfindlich. Zugleich entsteht in den Nervenspitzen ein elektrisches Signal, das sich entlang der Fasern ins Innere fortpflanzt.

Diesen Verbindungen folgend, rast das Schmerzsignal in Richtung Rückenmark. Manche der Fasern übertragen das Signal mit einer Geschwindigkeit von 30 Metern pro Sekunde – etwa so schnell wie ein beim Elfmeter hart geschossener Fußball.

Diese Impulse sind für den stechenden Schmerz verantwortlich, den wir fast sofort nach einer Verletzung empfinden. Andere Nervenverbindungen übermitteln die Information dagegen deut-

lich langsamer, erzeugen so den später einsetzenden dumpfen Schmerz.

Haben wir uns den Finger an einer Flamme verbrannt, treffen die ersten Signale bereits nach Sekundenbruchteilen im

Rückenmark ein. Dort liegt eine Umschaltstation des Schmerzes: Die Neurone übermitteln die Impulse an benachbarte Zellen und geben sie so in verschiedene Richtungen weiter.

Einige alarmierte Nervenzellen schicken umgehend ein Signal an die Armuskeln; noch bevor uns der Schmerz überhaupt bewusst wird, zucken diese zusammen, ziehen dadurch den Finger von der Flamme zurück – und verhindern so heftigere Verbrennungen.

Andere Nervenimpulse versetzen den gesamten Körper in einen Aus-

nahmezustand. Bei bestimmten starken Schmerzarten steigt deshalb oft der Blutdruck, das Herz schlägt schneller, die Pupillen weiten sich. Die Haut ist fahl und feucht, weil sich Blutgefäße zusammenziehen und Schweißdrüsen mehr Flüssigkeit absondern.

Vor allem aber leiten die Neurone die Alarmsignale weiter ins eigentliche Zentrum des Schmerzes: das Gehirn. Dort werden die eintreffenden Daten interpretiert und bewertet und zu einem Gesamtbild zusammengesetzt.

Es ähnelt darin einem Fernsehgerät, das über ein Kabel abstrakte TV-Signale empfängt. Erst auf seiner Mattscheibe entsteht daraus ein Bild. Genauso formt sich auch erst im Gehirn jenes Gefühl, das wir als Schmerz kennen.

Die Vorgänge, die dabei im Inneren des Hirns ablaufen, sind enorm komplex. Trifft ein Nervenimpuls ein, kommt es zu einem Ausbruch von Aktivität. Denn nicht ein einzelnes Hirnzentrum ist für die Verarbeitung

# Die Quelle der Pein

Erkältung, Medikamente, Verspannungen - was im Körper Schmerzen auslösen kann

**J**eder Schmerz entsteht auf die gleiche Weise, unabhängig davon, in welcher Körperregion er auftritt und wie stark er ist: Über bestimmte Sensoren gelangt der Reiz zu den Nerven im Rückenmark, die leiten die Information an das Gehirn weiter, das die Signale dann verarbeitet. Die Ursachen von Schmerz aber sind vielfältig.

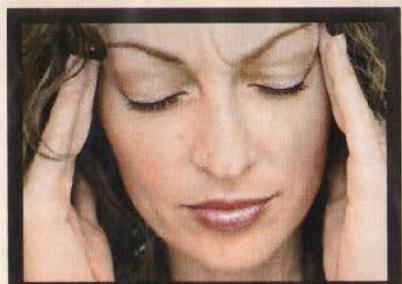
## SPANNUNGSKOPFSCHMERZEN

Nach letzter Zählung der Mediziner gibt es 164 verschiedene Kopfschmerz-Typen - von denen sich allerdings 99 Prozent in drei übergeordnete Kategorien einordnen lassen.

Die am häufigsten verbreitete Art ist der Spannungskopfschmerz; er röhrt zumeist vom modernen Arbeitsalltag her: Durch das lange Sitzen vor dem Computer, oft in gekrümmter Haltung, verspannen sich Kopf-, Schulter- und Nackenmuskeln. Auch Stress, Konflikte, Überforderung können zu Verspannungen führen.

Dabei registrieren Sensoren die erhöhte Spannung der Muskeln als Schmerzsignal. Sie senden diese Botschaft ans Hirn, das den

Muskelstress daraufhin sogar noch steigert: als Vorbereitung auf eine Verteidigungsreaktion - denn der Schmerz ist ja eine Warnung, ein Alarm, der unseren Körper vor Schaden schützen soll. Die Blutzufuhr nimmt ab, und das Gehirn setzt noch weitere Schmerz erzeugende



**Wissenschaftler kennen 164 Arten von Kopfschmerz**

Stoffe frei - ein Mechanismus, der dazu dient, den verletzten Bereich ruhig zu stellen. Und der den Menschen dazu zwingt, Hals und Kopf vor lauter Schmerz kaum noch zu bewegen.

## MIGRÄNE

Diese heftigen, in der Regel halbseitig und anfallartig auftretenden Kopfschmerzen hängen offenbar mit überaktiven Bereichen im Hirnstamm zusammen, die zu Störungen bei der Durchblutung führen: Die Gefäße weiten sich und werden durchlässig für Stoffe, die die Umgebung der Adern schmerhaft entzünden.

Als äußere Auslöser von Migräne gelten etwa Stress, Wetterumschwünge sowie bestimmte Lebensmittel wie Käse oder Rotwein. Auch das Hormon Serotonin spielt eine Rolle: Die Konzentration des eigentlich lindernd wirkenden Botenstoffs steigt zu Anfallsbeginn zunächst an, verringert sich dann aber rapide - und schützt nicht mehr vor dem jähnen Schmerz.

## DURCH MEDIKAMENTE AUSGELÖSTE LEIDEN

Ärzte vermuten, dass rund 40 Prozent aller Kopfschmerzen auf einen Dauergebrauch von Schmerzmitteln zurückzuführen sind: Patienten, die beispielsweise über einen längeren Zeitraum und

mit wachsender Dosierung täglich Tabletten nehmen - weil sie etwa über Monate zunächst vergleichsweise schwache Kopfschmerzen bekämpfen - , steigern dabei die Schmerzempfindlichkeit ihres Nervensystems enorm: Es wird durch immer leichtere Reize erregt, etwa ein Streicheln, das nun als Schmerz registriert wird. Entzugsschmerzen im Kopf können zudem auftreten, sobald die Wirkung einer Pille nachlässt.

## RÜCKEN

Ärzte unterscheiden zwei Arten chronischer Rückenschmerzen: radikuläre (etwa zehn Prozent der Fälle) und nichtradikuläre (rund 90 Prozent). Radikuläre Rückenschmerzen (von lat. *radicula* = kleine Wurzel) entstammen einem bestimmten Teil der Wirbelsäule und entstehen durch Druck auf Nervenwurzeln, ausgelöst etwa durch einen Bandscheibenvorfall: Teile des Bandscheibenkerns treten vor, wobei das austretende Material umgebende Nerven einquetschen kann. Oft werden die Schmerzen nicht nur direkt im Rücken wahrgenommen, sondern strahlen auch in das Gesäß und die Beine aus.

Nichtradikuläre Rückenschmerzen haben ihre Ursache häufig in den Gelenken der Beine - wenn die etwa eine Fehlstellung aufweisen und dadurch bei Bewegung immer wieder Verspannungen im Rücken auslösen. Auch eine Überlastung der Wirbelsäule, zum Beispiel durch falsche Haltung, kann Beschwerden verursachen. Gleicher gilt, wenn Bauch- und Rückenmuskulatur zu schwach sind, den Rumpf und damit die Wirbelsäule zu stützen.

## ZAHNSCHMERZEN

Die häufigste Ursache für Zahnschmerzen ist Karies: Vermehren sich im Mundraum aufgrund mangelnder Hygiene oder stark zuckerhaltiger Ernährung bestimmte Bakterien, die Säure freisetzen, zerstören die winzigen Einzeller erst den harten äußeren Zahnschmelz, dann die inneren Zahnschichten und schädigen schließlich die Nerven und Blutgefäße des Zahns - der Schmerz setzt ein.

Neben Karies ist Parodontose weit verbreitet, die chronische Zahnfleischentzündung. Sie legt die empfindlichen Zahnhäuse frei, die oft schon auf Hitze und Kälte mit Schmerz reagieren.

## ERKÄLTUNG

Viren vermehren sich rapide und rufen bei einer Erkältung Entzündungen der Atemwege hervor (bei einer Grippe manchmal auch des Magen-Darm-Trakts, der Muskeln oder des Gehirns), das Immunsystem wird geschwächt. Als Reaktion schüttet der Körper Hormone aus, die die Schmerzsensoren empfindlicher machen und uns so jeden unangenehmen Reiz noch intensiver wahrnehmen lassen - der Kopf und die Glieder schmerzen. Denn die Botenstoffe, die die Abwehrzellen des Immunsystems aktivieren, haben eine unangenehme Begleiterscheinung: Sie setzen zugleich die Schmerzempfindlichkeit herauf.

Die Gliederpein, die besonders bei der Grippe, der Influenza, sehr stark sein kann, zeigt also etwas durchaus Positives an: Der Körper wehrt sich heftig gegen die Infektion. *Johannes Schneider*

solcher Warnsignale zuständig, sondern gleich ein ganzes Netz: die Schmerzmatrix.

Zu ihr gehört unter anderem der *somatosensorische Kortex* (siehe Illustration Seite 26). Diese Hirnregion bestimmt die Herkunft des Signals, verortet es wie auf einem anatomischen Atlas. Hier entsteht unser Gefühl für einen bestimmten Körperteil – etwa für den schmerzenden Finger, den wir uns an der Flamme verbrannt haben.

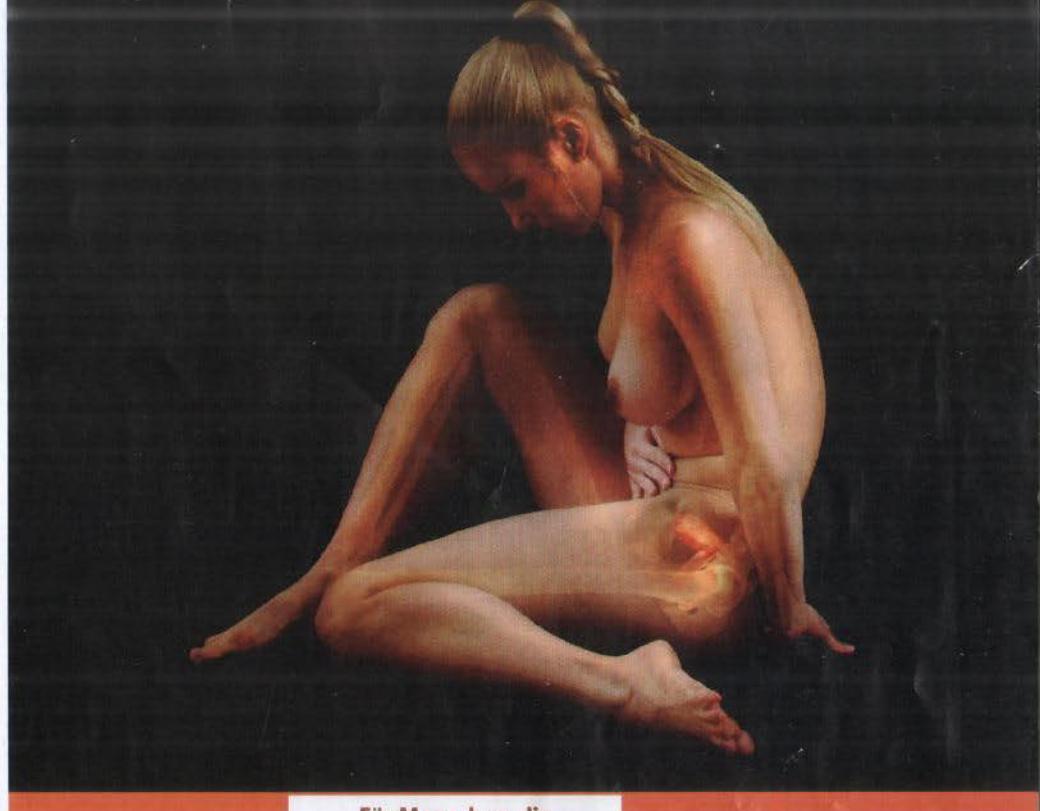
Wie unangenehm wir den Schmerz empfinden, bestimmen aber andere Areale, darunter der *anteriore cinguläre Kortex*. Er lenkt unsere Aufmerksamkeit auf die peinvolle Empfindung, sorgt dafür, dass wir uns manchmal auf nichts anderes konzentrieren können.

Als weitere wichtige Region tritt der direkt hinter der Stirn gelegene *präfrontale Kortex* in Aktion. Hier verarbeiten wir nicht nur bisherige Erfahrungen mit Schmerzen, sondern treffen auch bewusste Entscheidungen – etwa, ob wir einen Arzt aufsuchen sollten.

Viele dieser Hirnzentren arbeiten jedoch nicht unabhängig voneinander: Sie tauschen ständig Signale aus, beeinflussen sich so gegenseitig, regen andere Areale zu größerer Aktivität an oder hemmen sie in ihrer Tätigkeit.

## Bei chronischen Leiden kann sogar das Gehirn schrumpfen – wie bei der Alzheimer-Krankheit

Ein Teil des Netzwerkes funktioniert auf diese Weise als eine Art Lautstärkeregler für das Schmerzsignal: Es unterdrückt oder verstärkt es, lässt uns die Pein intensiver erleben oder gar vergessen – und zwar unabhängig davon, wie leicht oder schwer die Wunde ist.



Für Menschen, die dauerhaft Schmerz empfinden, gibt es nur wenige Heilmittel. Daher suchen Forscher im Erbgut nach einer Art Hauptschalter der Qual

Doch das Hirn vermag noch mehr: zum Beispiel die Beschwerden einer Krankheit zu lindern.

Um diese Reaktion im Kopf auszulösen, genügt oft schon eine bestimmte Empfindung – Hoffnung. So stellte der US-Mediziner Henry Beecher fest, dass im Zweiten Weltkrieg schwer verwundete Soldaten seltener nach Morphin verlangten als Zivilisten, die bei Verkehrsunfällen vergleichbare Verletzungen erlitten hatten: Die Aussicht, den Gräueln des Krieges zu entkommen, linderte offenbar die Qualen der GIs.

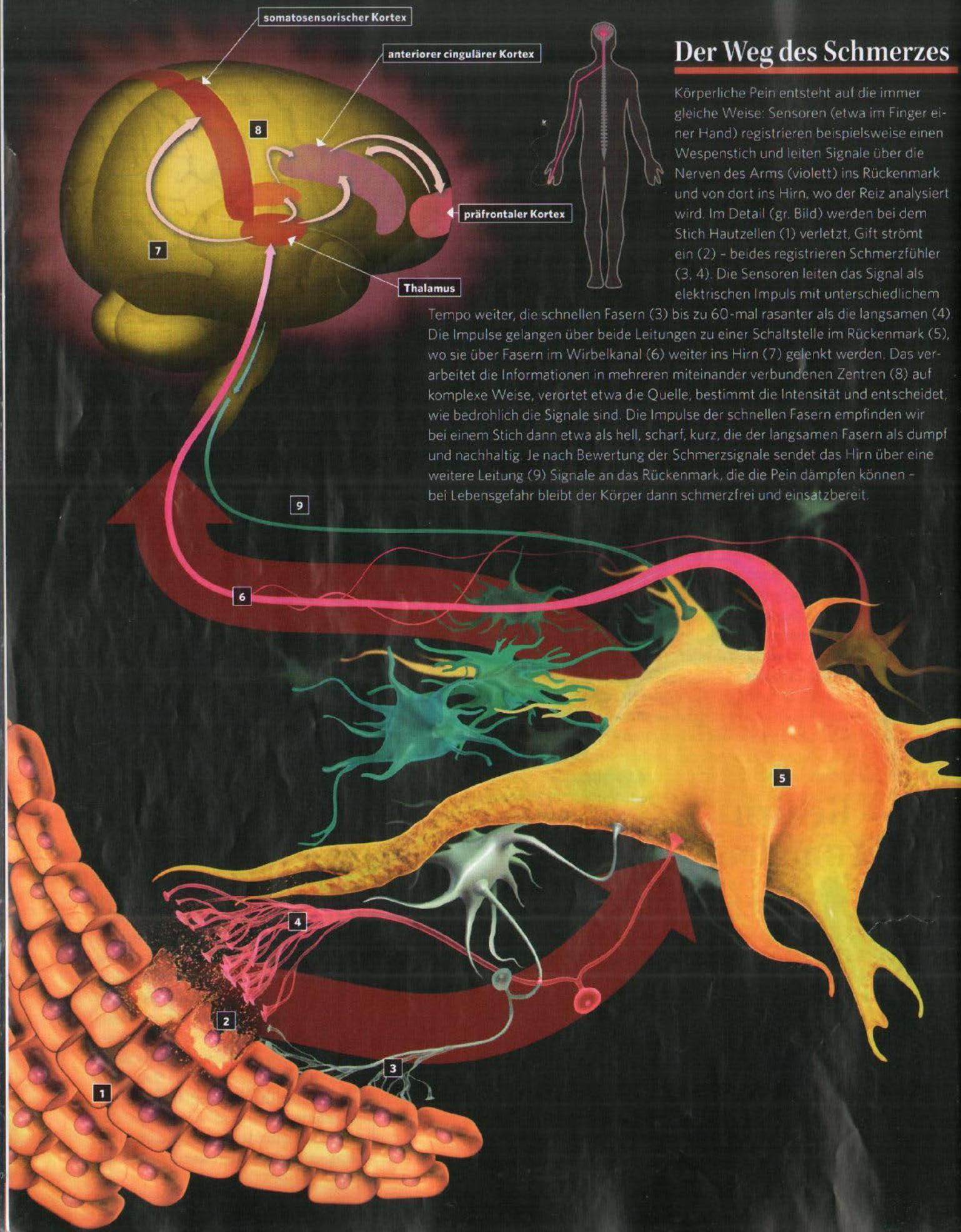
Auf der gleichen Kraft der Hoffnung beruht wohl auch der Placebo-Effekt: Schon die reine Erwartung, dass beispielsweise eine Tablette unsere Beschwerden lindern wird, lässt uns die Schmerzen weniger stark empfinden – und zwar selbst dann, wenn das eingenommene Medikament gar keine Wirkstoffe enthält.

Wie dieser merkwürdige Mechanismus funktioniert, haben Neurowissenschaftler des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf ergründet. Die Forscher um den Psychologen Falk Eippert verabreichten dazu ihren nichts

Wie machtvoll diese Kontrollinstanz ist, zeigt sich in Extremsituationen: So merken Soldaten, die grausame Verletzungen erleiden, davon zunächst oft gar nichts – ihr Gehirn ist einfach zu sehr mit der lebensbedrohlichen Situation beschäftigt.

Aus evolutionärer Sicht erscheint diese Reaktion zwar zunächst widersinnig – schließlich droht der Organismus ja zu verbluten, wenn er eine tiefe Wunde einfach ignoriert. Doch in Momenten höchster Gefahr, wenn sein Leben auf dem Spiel steht, kann es für den Menschen von Vorteil sein, vorübergehend keinen Schmerz zu spüren. Denn lähmende Pein würde womöglich seine ganze Aufmerksamkeit beanspruchen, ihn handlungsunfähig machen – und so eventuell seinen Tod bedeuten.

Nur wenn das Denkorgan den körpereigenen Alarm unterdrückt, kann es sich auf eine Gefahrensituation konzentrieren, kann weiterhin blitzschnelle Entscheidungen treffen und so vielleicht einen Ausweg aus der Lage finden.



## Der Weg des Schmerzes

Körperliche Pein entsteht auf die immer gleiche Weise: Sensoren (etwa im Finger einer Hand) registrieren beispielsweise einen Wespenstich und leiten Signale über die Nerven des Arms (violett) ins Rückenmark und von dort ins Hirn, wo der Reiz analysiert wird. Im Detail (gr. Bild) werden bei dem Stich Hautzellen (1) verletzt, Gift strömt ein (2) – beides registrieren Schmerzfühler (3, 4). Die Sensoren leiten das Signal als elektrischen Impuls mit unterschiedlichem

Tempo weiter, die schnellen Fasern (3) bis zu 60-mal rasanter als die langsamen (4). Die Impulse gelangen über beide Leitungen zu einer Schaltstelle im Rückenmark (5), wo sie über Fasern im Wirbelkanal (6) weiter ins Hirn (7) gelenkt werden. Das verarbeitet die Informationen in mehreren miteinander verbundenen Zentren (8) auf komplexe Weise, verortet etwa die Quelle, bestimmt die Intensität und entscheidet, wie bedrohlich die Signale sind. Die Impulse der schnellen Fasern empfinden wir bei einem Stich dann etwa als hell, scharf, kurz, die der langsamen Fasern als dumpf und nachhaltig. Je nach Bewertung der Schmerzsignale sendet das Hirn über eine weitere Leitung (9) Signale an das Rückenmark, die die Pein dämpfen können – bei Lebensgefahr bleibt der Körper dann schmerzfrei und einsatzbereit.

ähnenden Probanden eine angeblich schmerzlindernde Creme.

Dann erhitzten sie den Arm der Testpersonen, während die in einem Kernspintomographen lagen: So konnte das Team beobachten, wie die Nerven im Rückenmark, der Umschaltstation für Schmerzsignale, auf den Reiz reagierten.

Das Ergebnis war erstaunlich: Wann immer die Probanden zuvor die wirkstofffreie Placebo-Salbe erhalten hatten, zeigten diese Zellen eine deutlich geringere Aktivität. Im Glauben an eine Schmerzlinderung durch die Salbe sendete das Gehirn also Steuersignale bis ins Rückenmark und unterband dort die Kommunikation der Nervenzellen.

Normalerweise hätten die Neurone ihre Impulse ans Gehirn weitergeleitet, und das Denkorgan hätte sie als unangenehmes Brennen interpretiert. Doch da es einen Teil des Datenstroms unterdrückte, empfing es weniger Alarmbotschaften. Das Ergebnis: Den Probanden tat der Arm weniger weh.

Doch so erstaunlich diese Fähigkeit des Gehirns auch ist: Es setzt das Warnsystem des Körpers nicht ganz außer Kraft. Stärkere Schmerzsignale dringen im Regelfall weiterhin zum Denkorgan durch.

Dieser Effekt beweist aber, wie vielschichtig unser Schmerzempfinden ist. Die Wahrnehmung von Pein ist kein einseitiger Prozess: Vielmehr fließen Daten in beide Richtungen, sowohl von den Nervenenden herauf ins Gehirn als auch hinab in den Körper. Manche der Impulse mildern den Schmerz, andere machen ihn noch unerträglicher. Der Schmerz ähnelt somit einem Tonsignal, das durch mehrere Verstärker läuft: Selbst wenn der Lautstärkeknopf an dem ersten Gerät voll aufgedreht ist, kann das zweite das Signal wieder herabregeln. Wie laut wir es am Ende wahrnehmen, bestimmt nicht bloß ein einzelner Drehknopf, sondern eine ganze Reihe von Reglern.

IN DIESE hochkomplexe Signalkette müssen Mediziner eingreifen, wenn sie versuchen wollen, die Qualen ihrer Patienten zu lindern. Je nach Schwere der Schmerzen unterbrechen sie die Datenübertragung an drei verschiedenen Stel-

len: direkt am Ort ihrer Entstehung, im Rückenmark oder im Gehirn selbst.

Vor einer Zahnoperation spritzen sie zum Beispiel ein örtliches Betäubungsmittel; es hindert die Schmerzsensoren im Zahnfleisch direkt an der Injektionsstelle daran, ein Signal weiterzuleiten – unterbricht die Kettenreaktion also gleich zu Beginn.

Bei anderen Eingriffen – etwa einem Kaiserschnitt oder einer Hüftoperation – müssen Ärzte dagegen die Empfindung einer ganzen Körperregion ausschalten. Dazu greifen sie dort ein, wo die Nervenfasern zu einem Bündel zusammenlaufen: im Rückenmark.

Bei dieser Art der Narkose spritzen sie ein Betäubungsmittel in die Lendenwirbelsäule. Die Operierten spüren dann ihre untere Körperhälfte nicht mehr, bleiben aber bei Bewusstsein.

Um aber unser Hirn, dieses Zentrum des Schmerzes, komplett auszuschalten, muss man den Patienten in eine Vollnarkose versetzen.

Wie sich dabei die Narkosemittel – inhaled Gase und in die Vene gespritzte flüssige Medikamente – auf das Gehirn auswirken, ist noch nicht hinreichend erforscht. Doch sie unterdrücken dort die Kommunikation zwischen den Nervenzellen und lassen den Menschen dadurch in tiefe Ohnmacht fallen.

Mit diesen drei Formen von Betäubung lassen sich akute Schmerzen in der Regel gut unterdrücken.

Doch es gibt Körperqualen, bei denen die Mediziner nach wie vor machtlos sind. Denn mitunter gerät das Meldesystem des Körpers außer Kontrolle: Die Schmerzfühler senden immer weiter Impulse, obwohl es dazu

längst keinen Grund mehr gibt – etwa nachdem eine Verletzung bereits abgeheilt ist.

Das Schmerzsignal gleicht dann einer defekten Alarmglocke, die nicht mehr zu schrillen aufhört. Die Warnung, die uns eigentlich nur auf eine Verletzung oder Infektion aufmerksam machen soll, wird so selbst zu einer Krankheit.

Zu einer solchen Schmerzerkrankung kommt es unter anderem dann, wenn Nervenzellen durch eine Operation oder eine Krankheit beschädigt werden.

Bei einer Gürtelrose etwa werden Windpockenviren reaktiviert, die nach der ursprünglichen Infektion zunächst in den Neuronen des Rückenmarks geschlummert hatten.

Die Viren wandern durch die langen Fortsätze der Neurone zurück zur Haut, die sich dann mit Ausschlag überzieht.

Diese Infektion kann die Nervenfasern verändern, bringt sie manchmal dazu, ein Dauerfeuer von Schmerzsignalen auszusenden: Die Folge sind Torturen, die im Extremfall ein Leben lang anhalten können.

Häufig entstehen chronische Schmerzen auch durch eine Art Lernprozess im Rückenmark. Die dortigen Zellen sind über Kontaktstellen miteinander verbun-

den, können so die aus dem Körper eintreffenden Signale weiterleiten.

Empfangen diese Neurone nun ständig Impulse, kann sich das auf die Verbindung zum Nachbarn auswirken: Nach einiger Zeit fließen die Daten dann weitaus einfacher von einer Zelle zur nächsten – ganz so wie ein verbreiterter Kanal mehr Wasser leiten kann.

Das Netz der Nerven ist nun empfänglicher für Schmerzsignale aus dem Körper, verstärkt die Warnungen dabei so stark, dass sie sich in einen Daueralarm verwandeln.

## Mehr als 15 Prozent aller Erwachsenen leiden an chronischen Schmerzen

Die Folgen sind für viele Menschen dramatisch. Mehr als 15 Prozent aller Erwachsenen weltweit leiden unter anhaltenden Schmerzen. Mit herkömmlichen Medikamenten lassen sich ihre Qualen häufig nicht mehr bekämpfen.

Die ständige Marter verändert das Leben, führt zu Schlafstörungen und Depressionen. Und sie hat dramatische Auswirkungen auf das Gehirn, wie der Neurowissenschaftler Vania Apkarian von der Northwestern University in Chicago herausgefunden hat.

Gemeinsam mit Kollegen untersuchte Apkarian das Hirn von Patienten, die an chronischen Rückenschmerzen litten. Das Team analysierte dazu Aufnahmen, die ein Magnetresonanztomograph geliefert hatte.

Das Ergebnis war erschütternd: Die Graue Substanz des Denkorgans – eine dunkle Masse, bestehend aus den Zellkörpern von Abermilliarden von Neuronen – hatte sich zurückgebildet. Ein beträchtlicher Teil dieses Nervenmaterials war verschwunden: Die Schmerzpatienten besaßen bis zu elf Prozent weniger davon als beschwerdefreie Altersgenossen. So viel Hirnmasse verlieren Menschen normalerweise während des üblichen Alterungsprozesses im Verlauf von zehn bis 20 Jahren.

Von diesem Rückgang besonders betroffen war der präfrontale Kortex – jene Region hinter der Stirn, die uns unter anderem dabei hilft, langfristig zu planen und verschiedene Alternativen abzuwägen.

Und tatsächlich sind diese wichtigen Fähigkeiten bei Schmerzpatienten beeinträchtigt: Als Apkarian eine andere Gruppe von Leidenden einem Verhaltenstest unterzog, waren die Betroffenen weniger gut in der Lage, Risiken abzuschätzen und sinnvolle Entscheidungen zu treffen. Insgesamt schnitten sie nur etwa halb so gut ab wie gesunde Probanden.

Anscheinend lässt anhaltende Pein das Denkorgan regelrecht verkümmern. Chronische Schmerzen sind demnach weit mehr als eine belastende Erfahrung: Sie sind vielmehr vergleichbar mit Krankheiten wie Alzheimer oder

Parkinson, bei denen sich das Gehirn ebenfalls nach und nach zurückbildet.

Um diese Qualen zu bekämpfen, müssen Forscher neue Therapien entwickeln. Denn herkömmliche Schmerzmittel lindern nicht nur die Pein, sondern beeinflussen den gesamten Organismus, führen so zu starken Nebenwirkungen wie Übelkeit oder Wahrnehmungsstörungen. Eine dauerhafte Einnahme dieser Medikamente ist deshalb kaum zu ertragen.

Wissenschaftler haben daher mehrere neue Verfahren entwickelt, um zielgenau auf die Zellen im Rückenmark einzuwirken – die Folgen für den restlichen Körper sollen sich dadurch in Grenzen halten. Manche Forscher benutzen dazu einen ungewöhnlichen Verbündeten: ein Virus.

Einen solchen Krankheitserreger hat sich zum Beispiel ein Team um David

patienten zu spritzen. Vom Einstichort soll es bis ins Rückenmark wandern, um dort das Gen in die Nervenzellen zu schleusen. Mit diesem Bauplan des körpereigenen Schmerzmittels ausgestattet, könnten die Neuronen dann beginnen, die betäubende Substanz herzustellen und freizusetzen. So hoffen die Forscher, die Weiterleitung der Signale zum Gehirn zu unterbrechen – und die Torturen der Kranken zu lindern.

Noch radikaler gehen andere Wissenschaftler vor: Sie versuchen jene Zellen, die für die Entstehung von chronischen Schmerzen zuständig sind, gleich ganz auszuschalten.

Dazu haben sie ein Zellgift mit einem Botenstoff verbunden, der ausschließlich an Rezeptoren dieser Nervenzellen andockt, sich also mit ihnen verbindet: Damit wollen sie sicherstellen, dass der Schadstoff nur in diese Zellen gelangt – und auch nur diese tötet.

Das Verfahren funktioniert wie ein biochemisches Skalpell: Es ermöglicht den Forschern, gezielt jene Nerven zu treffen, die an dem Dauerschmerz beteiligt sind – die anderen sollen intakt bleiben.

An Ratten ist diese Methode bereits erprobt worden. Die so behandelten Nager empfanden nach einer Pfotenverletzung zwar noch Pein, doch die klang schnell ab. Dagegen entwickelten unbehandelte Artgenossen nach einer vergleichbaren Wunde anhaltende Schmerzen.

Obwohl dieses Skalpell-Verfahren im Tierversuch offenbar funktioniert, wäre der Einsatz bei Menschen bisher noch zu riskant. Zu groß erscheint die Gefahr, womöglich auch andere Nervenzellen dauerhaft zu beschädigen. Viele Forscher hoffen deshalb auf eine einfachere Lösung. Im weit verzweigten Netzwerk des Schmerzes suchen sie nach einer Art Generalschalter: nach einem simplen Mechanismus, der das ungewollte Gefühl zu deaktivieren vermag.

EIN SOLCHER MECHANISMUS verbirgt sich möglicherweise im Erbgut jener Kinder, auf die Geoff Woods und seine Kollegen in Pakistan gestoßen sind. Denn nachdem die Wissenschaft-

#### Memo: SCHMERZ

- **Unzählige Sensoren** etwa in der Haut registrieren Druck, Hitze oder chemische Reize – was wir als Schmerz wahrnehmen.
- **Jeder Schmerz** entsteht auf die gleiche Weise, unabhängig von seiner Stärke und der Körperregion, in der er auftritt.
- **Fast augenblicklich** werden elektrische Impulse gesendet, die in Sekundenbruchteilen über Nerven bis ins Hirn rasen.
- **Das Empfinden** ist sehr unterschiedlich: Die gleiche Ursache kann bei zwei Menschen völlig andere Reaktionen hervorrufen.
- **Wie stark** wir Schmerz wahrnehmen, ist auch genetisch bedingt. Rothaarige etwa sind möglicherweise generell empfindsamer.

Fink von der University of Michigan zu nutzen gemacht. In das Erbgut des Erregers fügten die Forscher ein menschliches Gen ein – und zwar ein Gen, das in unserem Organismus normalerweise für die Ausschüttung körpereigener Schmerzmittel verantwortlich ist.

In ersten Versuchen haben die Wissenschaftler begonnen, das so manipulierte Virus unter die Haut von Krebs-

ler das Erbgut der Schmerzlosen analysiert hatten, stellten sie fest: Alle wiesen die gleiche Mutation auf, und zwar an einem ganz bestimmten Gen.

Dieses Erbmerkmal, genannt SCN9A, ist vor allem in jenen Schmerzfühlern aktiv, die unseren Körper durchziehen: Dort sind die nach seinem Bauplan hergestellten Proteine für die Weiterleitung von Signalen zuständig.

Bei den Kindern sind diese Moleküle jedoch fehlerhaft, die Datenübertragung ist blockiert – sie empfinden deshalb nach Verletzungen auch kein Unbehagen.

Dass dieses Gen eine zentrale Bedeutung für den Schmerz hat, beweist jedoch nicht nur diese erstaunliche Unempfindlichkeit.

So haben Wissenschaftler inzwischen andere Varianten des Erbmerkmals entdeckt, die für ihre Träger ähnlich dramatische Folgen haben. Diese Menschen sind allerdings anders als die Kinder aus Pakistan nicht schmerzunempfindlich.

Im Gegenteil: Ihr Leben ist ein einziges Martyrium, das bereits beginnen kann, wenn sie zur Welt kommen. Auch als Erwachsene leiden sie immer wieder an Schmerzattacken im Unterleib, die noch heftiger als die Wehen einer werdenden Mutter sind.

Schon winzige Veränderungen dieses Gens können also darüber entscheiden, ob ein Mensch sein Leben lang von Schmerzen verfolgt wird – oder ob ihm diese Empfindung für immer fremd bleibt.

Das schicksalhafte Erbmerkmal ähnelt dabei dem Einstellknopf an einem Radio: Dreht man ihn in die eine Richtung, kann das Signal völlig verstummen, während es zur anderen Seite hin womöglich grotesk verzerrt wird.

Vielleicht, so hoffen die Wissenschaftler, lässt sich dieser genetische Effekt durch maßgeschneiderte Moleküle imitieren. Dann wäre es immerhin mög-

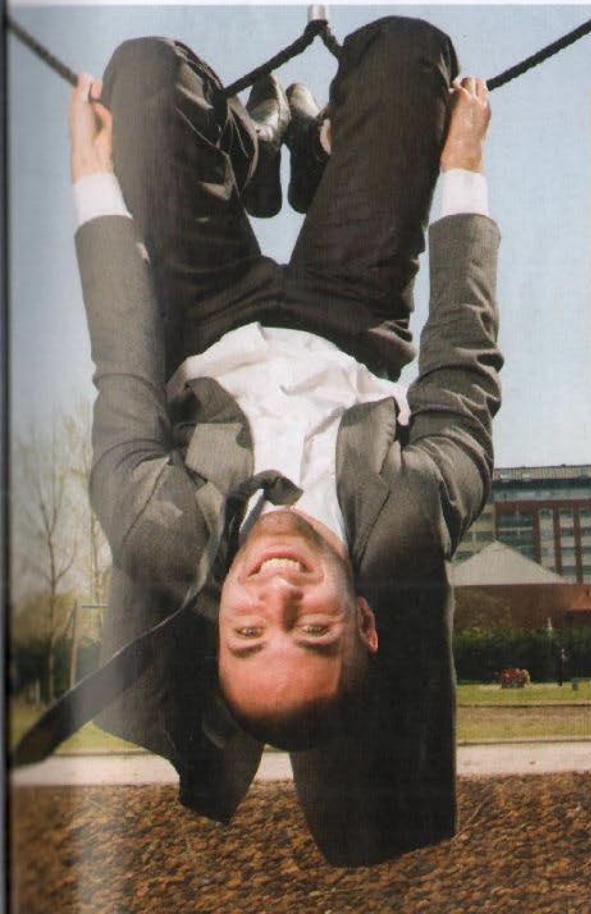
lich, eine völlig neue Klasse hochwirksamer Schmerzmittel zu entwickeln.

Besonders ein Umstand befeuert den Optimismus der Forscher: Die pakistanischen Kinder verspürten zwar nie irgendeinen Schmerz, doch abgesehen davon hatte das defekte Gen für sie offenbar keinerlei negativen Folgen. Sie schienen im Gegenteil völlig gesund zu sein.

Sollte es also tatsächlich gelingen, diesen genetischen Mechanismus durch ein Medikament nachzuahmen, dann könnte es nicht nur den Schmerz ausschalten, sondern hätte möglicherweise auch wesentlich geringere Nebenwirkungen als herkömmliche Mittel.

Der Fluch der Schmerzlosigkeit, der diese Kinder heimsucht und sogar ihren Tod bedeuten kann, hätte dann wenigstens eine gute Seite: Für viele andere Menschen würde er sich in einen Segen verwandeln. □

**Martin Paetsch**, 40, arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Hongkong. Der Fotograf und Illustrator **Alexander Tsaras**, 57, lebt in New York.



## Sprachen lernen? Betrachten Sie es als ein Kinderspiel.

Erinnern Sie sich daran, wie Sie als Kind Ihre Muttersprache erlernt haben. Die Welt war Ihr Klassenzimmer, aber es gab keine Schulstunden. Sie haben auf eine spielerische Weise aktiv am Lernprozess teilgenommen. **Es war ein Kinderspiel.**

Das ist das Geheimnis von Rosetta Stone. Wir fördern Ihre natürliche Fähigkeit, eine Sprache zu erlernen. Unsere **Dynamic Immersion™** Methode hilft Ihnen von Anfang an in der neuen Sprache zu denken, nämlich ganz ohne Übersetzungen und lästiges Auswendiglernen von Vokabeln. Sie haben Spaß und finden es leicht, Ihre Sprachlernziele zu verwirklichen.



In 31  
Sprachen  
erhältlich

**10% Rabatt**  
+ Gratis Lieferung

Aktionscode "geok311"

Informieren Sie sich jetzt  
**0800 030 30 602**  
[RosettaStone.de/geok311](http://RosettaStone.de/geok311)

**RosettaStone** 

# Wenn **Dunkel** unseren **Geist** umfängt

Nacht für Nacht durchlaufen wir eine sonderbare Metamorphose: Unser Körper erschlafft, unsere Gedanken schweifen ab, allmählich schwindet unser Bewusstsein, und wir versinken in einer Welt aus Träumen. Weshalb aber müssen wir von Zeit zu Zeit den Verstand verlieren, um bei Verstand zu bleiben? Mit modernen Messgeräten durchleuchteten Schlafforscher unseren Kopf und entschlüsseln die Botschaften der Nacht





Um die Aktivität des schlafenden Gehirns aufzuzeichnen, befestigen Forscher eine Hightech-Haube mit 64 Elektroden am Kopf einer Probandin. Im Millisekundentakt detektieren die hochempfindlichen Messfühler feinste Schwankungen der Hirnströme und erstellen daraus ein sogenanntes Elektroenzephalogramm (EEG, im Hintergrund). Solche EEG-Messungen (hier mithilfe der actiCAP der Brain Products GmbH) zeigen, in welcher Schlafphase – etwa im Tief- oder Leichtschlaf – sich ein Mensch gerade befindet. Zudem geben sie Aufschluss darüber, wie das Gehirn schlafender Menschen das tagsüber Gelernte nachts verinnerlicht.

# Schlaf

Text: Rainer Harf

Foto: Heiner Müller-Elsner

Seit jeher preisen ihn Dichter und Denker. Heinrich Heine nannte ihn „die köstlichste Erfindung“. Johann Wolfgang von Goethe sprach von einem „treuen Freund“, vom „reinen Glück“. Und Arthur Schopenhauer bezeichnete seine Wirkung für den Menschen als „das, was das Aufziehen für die Uhr ist“.

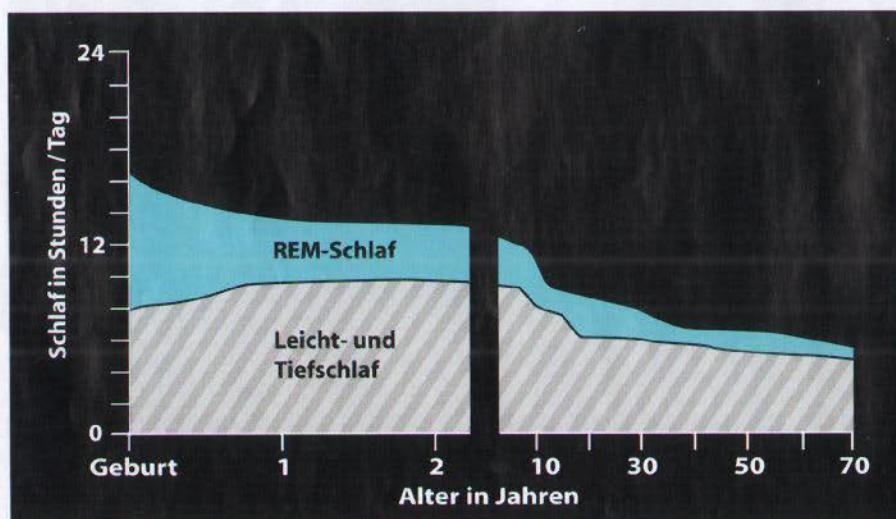
Tatsächlich verschafft uns kein anderer Zustand so wohltuende Erholung wie: der Schlaf. Und keinem anderen Bedürfnis widmen wir mehr Zeit. Gut ein Drittel unseres Lebens verbringen wir in jener sonderbaren Verfassung der

Bewusstlosigkeit. Tauchen ein in eine irrationale Welt aus Träumen, in der sich unser Verstand verflüchtigt, in der die Gesetze von Zeit und Raum nicht mehr gelten und unser Geist fantastische Bilder erschafft.

Doch so selbstverständlich und vertraut uns der Schlaf auch vorkommt, so sehr er unseren natürlichen Rhythmus beherrscht: Die nächtliche Ruhe gehört zu den rätselhaftesten Phänomenen, die das Leben in Jahrtausenden hervorgebracht hat. Denn die wundersame Metamorphose, die Mensch und Tier von Zeit zu Zeit durchlaufen, scheint den Kräften der Evolution zu widersprechen: Denn wer schläft, begibt sich in Gefahr.

Sobald die Muskeln erschlaffen und die Sinne schwinden, verliert der Schlummernde die Kontrolle über sich selbst. Was um ihn herum geschieht, nimmt er kaum noch wahr. Er hört und sieht nicht, ob Gefahr droht, ob sich zum Beispiel ein Feind anschleicht – und kann so zur leichten Beute werden. In der Wildnis sollte sich demnach der Wachsame in der Regel gegen den Müden und Achtlosen behaupten.

Und dennoch ist jenes tiefe Verlangen danach, sich hin und wieder gänzlich von der Außenwelt abzuschotten, offenbar unabdingbar für das Leben. Der Schlaf hat sich gegen sämtliche Kräfte des evolutionären Wettbewerbs durchgesetzt und neben Essen und Atmen zu einer biologischen Grundfunktion ent-



Im Laufe der Jahre verändern sich Schlafbedürfnis und -struktur. Neugeborene brauchen rund 16 Stunden Schlaf täglich, im Alter kommen viele Menschen mit sechs Stunden aus. Babys verbringen zudem mehr Zeit im REM-Schlaf. Forscher gehen daher davon aus, dass diese Phase unerlässlich für die Gehirnentwicklung ist.



Bilder aus einer Nacht: Der Stoffwechsel des Schlafenden fährt herunter, der Körper kommt zur Ruhe, die Muskulatur erschlafft - vor allem in den traumreichen REM-Phasen. Und doch liegen Schlummernde nicht völlig still: Hin und wieder zuckt ihr Leib, und sie wechseln ihre Position

wickelt: Es gibt kaum ein Tier, das nicht hin und wieder müde wird. Nicht nur Säuger legen sich zur Ruhe, auch Schlangen, Frösche und Fische dösen beizeiten, ja selbst Fliegen, Schaben und Würmer schlummern regelmäßig ein.

Die Fauna hat höchst unterschiedliche Schläfer hervorgebracht: Manche Tiere träumen fast den ganzen Tag vor sich hin – Fledermäuse bis zu 20 Stunden, das Opossum rund 19 Stunden, Igel 18 Stunden. Andere Arten wiederum nächtigen eher kurz: Elefanten und Giraffen kommen mit drei bis fünf Stunden innerer Ruhe aus.

Auch Meeressäuger wie Seekühe und Delfine können sich ihrer Müdigkeit nicht erwehren. Doch um nicht zu ertrinken, bedienen sie sich eines Tricks: Sie lassen jeweils nur eine ihrer beiden Gehirnhälften schlummern, während

*Schlaf ist nicht  
das Gegenteil von  
Wachsein – sondern  
ein hochdynamischer  
Zustand*

die andere wach bleibt – wohl damit die Tiere nicht vergessen, Luft zu holen.

Der Schlaf bezwingt beinahe jeden. Wer dauerhaft daran gehindert wird, der kann gar sterben. Das belegen unter anderem Experimente an Ratten, die künstlich wach gehalten wurden. Die Tiere magerten innerhalb weniger Tage ab, obwohl sie besonders viel fraßen, ihre Körper kühlten aus, schließlich fielen sie völlig entkräftet um.

Weshalb aber entfaltet dieser eigenartige Dämmerzustand so eine allgemeinwährtige Macht? Was geschieht dort hinter verschlossenen Augen in unserem Kopf?

Und woher kommen jene flatterhaften Bilder und Gedankenschnipsel, die sich wie von selbst zu Geschichten verweben? Haben Träume vielleicht sogar einen tieferen Sinn?

Wenn wir  
schlafen, schüttet unser  
Gehirn **Hormone**  
aus, die den Körper  
wachsen lassen

**OBWOHL DER SCHLAF** eine derart überragende Rolle in der Natur spielt, haben sich Wissenschaftler lange Zeit kaum darum bemüht, dessen Wesen zu ergründen. Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts interessierten sich die meisten Mediziner nicht sonderlich dafür, welche physiologischen Prozesse im ermateten Körper ablaufen (das Wort „Schlaf“ ist dem alt- und mittelhochdeutschen *slaf* = schlapp entlehnt). Denn viel, so vermutete man, könne dabei ohnehin nicht passieren.

Der schlummernde Leib ähnele in seiner Reglosigkeit dem eines Verstorbenen – man sprach vom „kleinen Bruder des Todes“. Und ging davon aus, dass sich beim Einschlafen das Gehirn abschalte und der Mensch bis zum Aufwachen in gleichförmiger Lethargie verharre, um Energie zu tanken.

Mehr nicht.

Erst seit Mitte der 1950er Jahre hat sich die Sicht der Forscher gänzlich gewandelt: Schlaf – das weiß man inzwischen – ist nicht einfach nur das Gegen teil von Wachheit, also dumpfes Sein. Vielmehr handelt es sich um einen hochdynamischen Zustand und wohl einen der kompliziertesten Vorgänge überhaupt, die in uns ablaufen.

Denn unser Körper ruht in der Nacht weitaus weniger, als es den Anschein

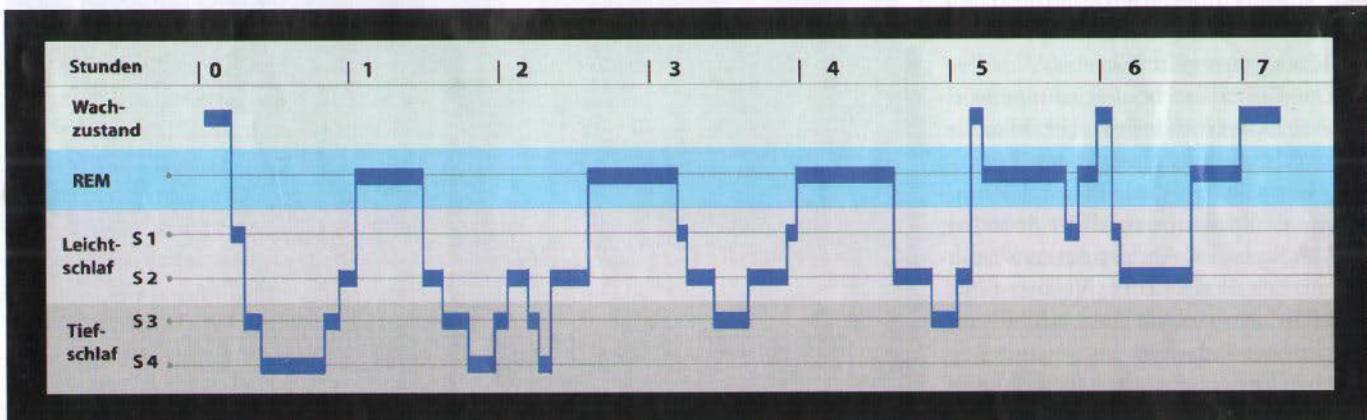
hat – dementsprechend ist die Energieersparnis denkbar gering: Eigentlich könnte man sich ebenso gut aufs Sofa legen und entspannen. Wissenschaftler haben ermittelt, dass ein Mensch, der acht Stunden schläft, nicht mehr Kalorien spart, als in einem Glas Milch enthalten sind.

Das liegt unter anderem daran, dass unser Organismus etliche Vorgänge, etwa die Produktion bestimmter Hormone, erst dann vorantreibt, wenn Dunkelheit unseren Geist umfängt.

Der Körper registriert nun kaum noch störende Reize von außen, etwa Licht, Gerüche oder Geräusche, er ist gleichsam ganz bei sich – und startet eine Art Reparaturprogramm.

Denn im Laufe des Tages reichern sich in den Geweben des Körpers aggressive Molekülbruchstücke an: sogenannte „freie Radikale“. Diese äußerst reaktiven Teilchen entstehen als Abfallprodukte des Stoffwechsels (etwa bei jeder Muskelbewegung) und greifen wichtige Moleküle wie Eiweiße, Fette und sogar Bausteine des Erbguts an. Im Schlaf fährt der Stoffwechsel aber herunter, die Muskeln erschlaffen, und so fallen weit weniger freie Radikale an.

Gleichzeitig treibt der Organismus die Produktion jener Biomoleküle voran, die tagsüber verbraucht oder zerstört



Die Architektur des Schlafes: Anhand von Hirnstrom-Messungen haben Mediziner herausgefunden, dass Menschen verschiedene Schlafphasen durchlaufen (hier ein typischer Verlauf). Zunächst fallen wir in den Leichtschlaf, dann sinken wir in den Tiefschlaf, aus dem wir nur schwer zu wecken sind. Anschließend steigen wir auf in den von lebhaften Träumen gekennzeichneten REM-Schlaf. Bis zum Aufwachen folgen meist vier weitere solcher Zyklen – wobei der Tiefschlaf gegen Morgen hin nachlässt, die REM-Schlafphasen dagegen zunehmen



Zwei Drittel aller Schlafstörungen gehen auf die Schlaf-Apnoe zurück; die Atemwege verschließen sich, Betroffene wachen aufgrund von Sauerstoffmangel auf. Moderne Atemmasken lösen das Problem: Sie kontrollieren die Atmung und pressen bei Bedarf Luft in den Rachen

worden sind – und füllt auf diese Weise die zelleigenen Vorräte wieder auf.

Darüber hinaus schüttet das schlafende Gehirn Wachstumshormone aus, die in die Blutbahn gelangen. Diese Botenstoffe regen nicht nur Knochen, Haare und Haut zum Wachsen an, sie fördern auch die Selbstheilungskräfte des Körpers (siehe Seite 108). Die Folge: Wunden heilen im Schlaf schneller.

**AUCH DAS IMMUNSYSTEM** ist vor allem nachts aktiv. Studien belegen, dass schon eine durchwachte Nacht die Bildung schützender Antikörper behindert und die Aktivität bestimmter Abwehrzellen verringert. Ein paar Tage ohne Schlummer erhöhen das Risiko einer Erkältung um ein Mehrfaches.

Umgekehrt überkommt Menschen, die sich bereits mit Krankheitskeimen infiziert haben, nicht ohne Grund oft tiefe Müdigkeit und Erschöpfung: Der

Körper zwingt sie in ebenjenen Zustand, in dem ihr Immunsystem sich am besten regeneriert. Und sorgt so für schnellstmögliche Genesung.

*Das Denkorgan  
leistet im **Schlaf***

*teilweise ebenso  
viel wie bei wachem*

**Bewusstsein**

Besonders empfindlich auf Schlafmangel reagiert allerdings ein Organ, das während der nächtlichen Ruhe wie ausgeschaltet erscheint: unser Gehirn.

Wer auf Dauer versucht, seine Müdigkeit zu überwinden, bekämpft nichts weniger als seine Geisteskraft. Unweigerlich lässt die Konzentration nach, die Gedanken schweifen ab, Reaktionszeiten verlängern sich. 27 Stunden ohne Schlummer beeinträchtigen die kognitive Leistung stärker als 0,85 Promille Alkohol im Blut.

Erzwungener Schlafentzug kommt sogar psychischer Folter gleich. Werden Menschen länger als 48 Stunden am Einschlafen gehindert, beginnen sie mitunter zu halluzinieren, zunehmend wirken sie verwirrt, haben Gedächtnislücken. Allmählich bildet sich, wie Betroffene berichten, in ihrem Kopf ein Schleier, und mächtig formt sich der eine Wunsch: zu schlafen.

*Während der  
Nachtruhe bastelt das  
Gehirn an unserem  
Gedächtnis – wir ler-  
nen also unbewusst*

Unser Gehirn ist wie kein anderes Organ auf vorübergehende Isolation von der Außenwelt angewiesen. Doch ebenso wie der Rest des Körpers ruht sich das schlafende Nervengeflecht keineswegs aus. Im Gegenteil: Hier laufen wohl die verworrensten Prozesse ab, hier finden die verblüffendsten Umbauarbeiten statt. Unser Geist leistet im Schlaf zeitweise ebenso viel wie bei wachem Bewusstsein. Und Nacht für Nacht folgt er einer geradezu festgelegten Dramaturgie.

**DENN DER** Schlaf ist nichts Amorphes. Er hat eine Struktur. Mithilfe von Hirnstrom-Messungen und Kernspintomographen ist es Somnologen (Schlaforschern) gelungen, diese nächtliche Choreografie nachzuzeichnen.

Wenn wir einschlafen und unsere Gedanken allmählich ins Dunkel abdrif-

ten, steigt unser Geist gleichsam eine Treppe hinab und macht einen erstaunlichen Wandel durch. Binnen 30 Minuten gleiten wir von leichtem Schlummer in den Tiefschlaf. Menschen sind jetzt nur noch schwer zu wecken und erinnern sich dann – wenn überhaupt – an abstrakte Gedanken, bildlose Träume.

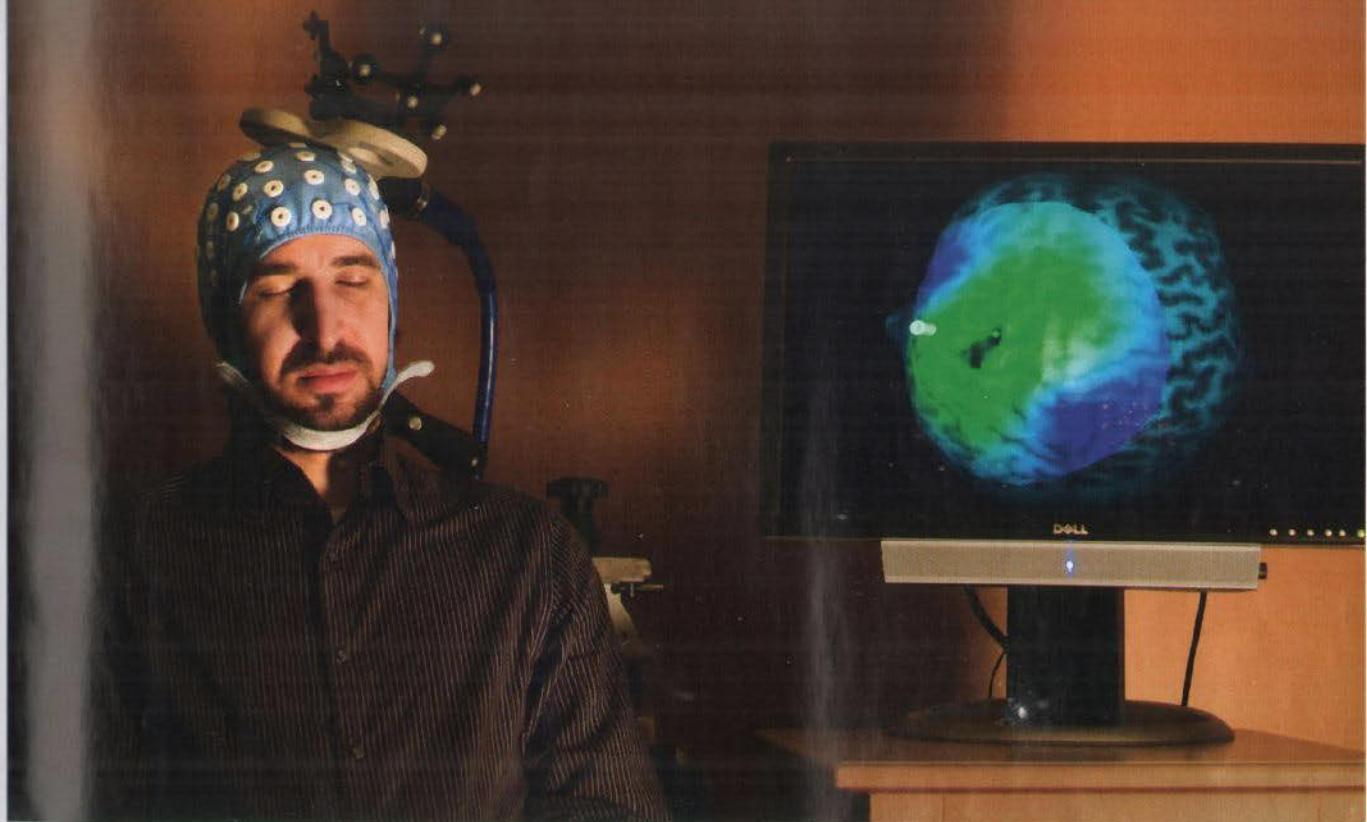
In dieser Phase stellen die meisten Neurone im Hirnstamm (dem evolutio-när ältesten Teil unseres Denkorgans, einer Region unmittelbar oberhalb der Wirbelsäule) ihre Aktivität ein.

Die Nervenzellen in der Großhirnrinde dagegen schalten auf einen eigenartigen Arbeitsmodus um.

Denn während wir wach sind, arbeiten die Neurone dort in der Regel für sich allein, unabhängig voneinander empfangen sie Reize und leiten sie an andere Nervenzellen weiter – im Tiefschlaf dagegen synchronisieren benach-



Je nachdem, in welcher Schlafphase wir uns befinden, ändern sich unsere Körperfunktionen. Besonders der REM-Schlaf (von engl. »Rapid Eye Movement«) unterscheidet sich von den beiden Non-REM-Phasen (Leicht- und Tiefschlaf): Puls und Atmung werden unruhig, und hinter geschlossenen Lidern rollen die Augäpfel hin und her (daher der Name). Wälzen sich Menschen in den Leichtschlafphasen noch hin und wieder im Bett herum, erschafft der Körper während des REM-Schlafs beinahe vollständig – ein Schutzmechanismus, der uns daran hindert, unsere Träume aktiv auszuleben.



Möglicherweise können Menschen mit Schlafstörungen bald mithilfe von Magnetfeldern therapiert werden: US-Forscher stimulieren die Gehirne von Probanden mit Elektromagneten (beigefarbenes Gerät, links oben) und versuchen ihnen so zum Tiefschlaf zu verhelfen

barte Neurone ihre Aktivität, ganze Verbände von Nerven in der Großhirnrinde feuern im gleichen Takt, die Zellen stimmen ihre Signale also harmonisch aufeinander ab.

Es ist, als liefen Wellen elektrischer Impulse über unser Denkorgan.

Bis zu 20 Minuten dauert der Tiefschlaf an, dann tauchen wir auf in einen etwas leichteren Schlummer, aus dem wir mitunter kurz erwachen – ohne uns jedoch morgens daran zu erinnern.

Anschließend geraten wir meist in einen besonders kuriosen Zustand, den manche Wissenschaftler als „paradoxen Schlaf“ bezeichnen. Denn in dieser Phase ähneln die Hirnströme Schlafender denen wacher Menschen.

Einige Bereiche des Gehirns laufen nun auf Hochtouren. Tief im Denkorgan regt sich das limbische System (ein Verbund mehrerer Hirnareale, in dem unter anderem unsere Gefühle entstehen) und ruft heftige Emotionen hervor. Der Blutdruck steigt, Puls und Atmung gehen mal schneller, dann wieder langsamer, und unser Geist verliert sich in einer Welt aus Traumbildern.

Alle Muskeln erschlaffen nun völlig, nur hinter den geschlossenen Lidern zucken unsere Augäpfel unruhig hin und her. Die Entdecker dieser absonderlichen Schlafphase prägten daher den Begriff REM-Schlaf (von engl. „Rapid Eye Movement“). Er dauert oft nicht länger als eine Viertelstunde, dann fallen wir wieder in den Tiefschlaf.

## *Erlebnisse und Erfahrungen*

*werden noch einmal  
aufgerufen, sortiert*

*und geprüft*

Bis zum Morgen durchlaufen Menschen meist drei bis vier weitere Zyklen aus Leicht-, Tief- und REM-Schlaf, wobei der Tiefschlaf gegen Morgen hin nachlässt, die Dauer des REM-Schlafs zunimmt. Die meisten Menschen wachen nach etwa acht Stunden auf.

**WESHALB SICH** die einzelnen Schlafphasen immer wieder abwechseln, welche Bedeutung das jeweilige Nervenflacker hat und welche Prozesse dabei im Hirn ablaufen, haben die Neuroforscher bis heute nicht genau verstanden.

Die Enträtselung der Nacht stellt sich als äußerst schwierig dar: Mit modernen Geräten ist es zwar möglich, ins Hirn eines Schlafenden zu schauen, doch man kann ihn nicht befragen, was in seinem Kopf passiert. Und wenn er aufwacht, erinnert er sich meist nur vage an irrationale Geschichten.

Allerdings steht mittlerweile fest: Im Schlaf bastelt das Gehirn an unserem Gedächtnis. Wir lernen gewissermaßen, ohne dass es uns bewusst ist.

Um das zu erforschen, haben Neurowissenschaftler Versuchspersonen un-



Müdigkeit vermindert die Konzentration und ist daher nicht ungefährlich: Um herauszufinden, wie sich Schlafmangel auf Reaktionszeiten auswirkt, lassen Wissenschaftler der Washington State University übermüdete Polizisten auf virtuelle Gegner schießen

*In gewisser Weise ähneln unsere Träume den Psychosen schizophrener Menschen*

ter anderem die Aufgabe gestellt, mit den vier Fingern einer Hand den Daumen in einer ganz bestimmten Reihenfolge anzutippen – so schnell und präzise wie möglich. Eine Testgruppe trainierte die Fingerübung vor dem Einschlafen, eine andere Gruppe blieb nach dem Training wach.

Ein paar Stunden später wurde die Übung wiederholt. Dabei stellte sich heraus: Die Ausgeschlafenen hatten die Aufgabe weitaus besser verinnerlicht, sie waren nicht nur um ein Drittel schneller als die Wachgebliebenen – sie machten auch weniger Fehler. Offenbar hatte das Gehirn den Schlaf genutzt, um weiterzuüben.

Ähnliches fand der Schlaforschler Jan Born von der Universität Lübeck heraus: Er ließ Schüler zwischen 16 und 18 Jahren Vokabeln lernen und fragte sie zwei Tage später ab. Am besten schnitten jene Probanden ab, die sich die Fremdwörter kurz vor dem Einschlafen eingeprägt hatten. Schüler, die morgens gelernt hatten oder in der ersten Nacht nach dem abendlichen Einstudieren wach geblieben waren,

konnten sich dagegen deutlich schlechter erinnern.

Dass unser Gehirn tatsächlich die Tagesarbeit im Schlaf wieder aufnimmt, konnte auch der belgische Somnologe Pierre Maquet beobachten. In seinem Labor an der Universität Lüttich sollten Testpersonen auf Bildschirmsignale reagieren und so rasch wie möglich bestimmte Tasten drücken. Dabei maß ein Tomograph ihre Hirnaktivität.

Als sich die Probanden später zur Nachtruhe legten, sprangen nach einiger Zeit genau jene visuellen und motorischen Regionen ihres Gehirns an, die bereits während der Übung aktiv gewesen waren. Das neuronale Echo trat dabei allein in den traumreichen REM-Schlaf-Phasen auf.

Forscher gehen daher davon aus, dass sich unsere motorischen und sensorischen Fertigkeiten, also die Koordination sämtlicher Bewegungsabläufe, besonders im REM-Schlaf festigen.

Die Wissenschaftler sprechen vom „prozeduralen Gedächtnis“, zu dem Fähigkeiten wie Klavierspielen, Skifahren, Turnen oder Tanzen gehören.

In den Tiefschlaf-Phasen dagegen – das haben vergleichbare Experimente ergeben – formt sich vornehmlich unser „deklaratives Gedächtnis“. Es umfasst unser gesamtes Wissen über die Welt und unser Ich. Hier speichern wir Vokabeln, memorieren die Gesichter uns bekannter Menschen und horten all jene Erlebnisse, die sich in der Rückenschau zu unserer eigenen Biografie zusammensetzen.

Forscher vermuten, dass der merkwürdige Gleichtakt der Neurone im Tiefschlaf mit der Gedächtnisbildung zusammenhängt: Die Nervenzellen synchronisieren möglicherweise ihren Rhythmus, um Erinnerungen aus dem Hippocampus (einem tief im Hirn liegenden Zwischenspeicher) in die Großhirnrinde zu übertragen, wo sie auf Dauer abgelegt werden.

Vielleicht, so vermuten manche Somnologen, verbirgt sich gerade hier eine jener Erklärungen dafür, weshalb wir im Schlaf überhaupt unser Bewusstsein verlieren und uns vom Weltgeschehen abkapseln.

**DENN SOLANGE** wir wach sind, prasseln fortwährend Reize auf uns ein: Jede Sekunde registrieren unsere Sinnesorgane Geräusche, Gerüche, Bilder und leiten Abermillionen elektrische Impulse an unser Gehirn weiter, das permanent damit beschäftigt ist, all diese Informationen zu verarbeiten.

Dort müssen Nervenzellen die Signale so rasch wie möglich bewerten, damit wir unsere Umgebung überhaupt wahrnehmen und angemessen zu reagieren vermögen. Damit wir ein Gespräch führen, Auto fahren, das Gleichgewicht halten, durch die Stadt laufen – oder das, was wir gerade lesen, überhaupt verstehen können.

Ständig werden neue Erfahrungen, wichtige wie unwichtige, im Neuronennetz des Hippocampus abgelegt. Im Laufe des Tages flutet immer mehr Botschaften diesen Zwischenspeicher. Und so kommt es zunehmend vor, dass fragile, noch nicht gefestigte Gedächtnis-

spuren von frischen Eindrücken überschrieben werden.

Erst im Schlaf, wenn sich das Gehirn von der Welt abwendet und den Blick ganz auf unser Inneres richtet, dringt der ständige Datenstrom von außen nicht mehr zu uns durch. Dann können jene zwischengespeicherten Gedanken

## *Träume sind weit mehr als sinnlose Anwendungen des schlummernden Bewusstseins*

und Erlebnisse in Ruhe noch einmal aufgerufen, sortiert und geprüft werden. Unwichtiges wird gelöscht, gerät in Vergessenheit. Erinnerungswürdiges wird ins Langzeitgedächtnis der Großhirnrinde überschrieben. „Konsolidierung“ nennen Forscher diese Archivierung des Wissens.

Wie genau Neurone diesen hochkomplexen Prozess der Gedächtnisbildung koordinieren, können Forscher zwar noch nicht erklären. Doch sie gehen davon aus, dass der Zwischenspeicher sozusagen entrümpt wird, um Platz zu schaffen für den nächsten Tag.

Weshalb dieser Wissenstransfer nicht zeitgleich mit der Datenaufnahme stattfindet – also während wir bei Bewusstsein sind –, erklären die Wissenschaftler damit, dass die Verarbeitung von Sinnesreizen sowie das Speichern von Informationen dieselben Areale unseres Hirns in Anspruch nehmen.

Das heißt: Würden im Wachzustand plötzlich Gedächtnisinhalte aus dem

Hippocampus aktiviert und in die Großhirnrinde übertragen, geriete unser Geist in Verwirrung. Ständig flammten Erinnerungsfetzen in uns auf, immer wieder würde Erlerntes und Erlebtes ins Bewusstsein hochwallen.

Wir wären nicht mehr in der Lage, zwischen der äußeren und der inneren Welt zu unterscheiden, litten unter Wahnvorstellungen, Halluzinationen.

**IN GEWISSE WEISE** ähneln unsere Träume solchen seelischen Trugbildern. Ihre bizarren Inhalte gleichen in mancher Hinsicht den Psychosen schizophrener Menschen. Denn der Schlafende hält die irrlichternden Illusionen für real, in der Hermetik des Traumes ist die Reflexion über das Geschehen ausgeschaltet. Die Welt wird Traum, der Traum wird Welt, schrieb der deutsche Dichter Novalis.

Da gibt es Ungeheuer. Da springt das Ich durch Raum und Zeit. Da leben Tote, sprechen Tiere. Da können wir in die Zukunft sehen – und nehmen sämtliche Ungereimtheiten in Kauf.

Noch in den 1990er Jahren glaubten viele Neurowissenschaftler, Träume hätten keinerlei tiefere Bedeutung. Vielmehr versuchte ein Rest an Geist, sich einen Reim auf das zu machen, was unser Gehirn im Schlaf bewerkstellt. Träume seien nichts weiter als sinnentleerte Nervengewitter, zufällige Nebenprodukte einer verwirrten Psyche.

Demnach wäre die Deutung unserer nächtlichen Reisen mehr oder minder hinfällig, der Traum also mitnichten der „Königsweg zum Unbewussten“, den der Wiener Nervenarzt Sigmund Freud um die Jahrhundertwende benannte.

Der Begründer der Psychoanalyse vermutete, dass sich in unseren Träumen unterdrückte Triebe Bahn brächen, dass sich des Nachts verdrängte Lüste und Wünsche in Form verschlüsselter Symbole offenbarten.

Scharfe Waffen etwa, Baumstämme und Stöcke deutete Freud als phallische Fantasien, der Körper der Frau wiederum wandelte sich im Traum unter ande-



Kinder brauchen besonders viel Schlaf – nicht zuletzt fördert er die Entwicklung des Körpers: Heranwachsende, die zu wenig schlummern, leiden zum Beispiel eher an Übergewicht

*Wenn wir träumen,  
erhebt sich **der Geist**  
über die Gesetze  
der Logik – der Mensch  
gewinnt an Kreativität*

rem in einen Schrank, einen Wagen, einen Ofen. Diese Zeichen zu dechiffrieren heißt nichts anderes, als die Psyche eines Menschen zu entblättern, die Seele bis in ihre Tiefen offenzulegen.

Zwar geht heute kaum noch ein Wissenschaftler davon aus, dass tatsächlich jedes Bild, das uns im Traum erscheint, stets ein entsprechender Schlüssel zu verschütteten Räumen unseres Unbewussten ist: dass man also eine Art allgemeingültige Grammatik der Träume aufstellen könnte.

Trotzdem sind die nächtlichen Ausflüge, wie neuere Befunde zeigen, weit aus mehr als sinnlose Anwandlungen unseres Gehirns. Und zumindest Freuds Annahme, unsere Triebe würden das Traumgeschehen beeinflussen, scheint nicht ganz falsch zu sein.

Der Neuropsychologe Mark Solms von der Universität Kapstadt hat Menschen untersucht, die nach einem Schlaganfall nicht mehr träumen konnten. Bei ihnen war ein bestimmtes Hirnareal hinter den Augen beschädigt, das Forscher „Motivationszentrum“ nennen. Dort schütten Nervenzellen bio-

chemische Botenstoffe aus, die uns dazu antreiben, unsere Bedürfnisse zu befriedigen – sei es Essen, Trinken, Sex oder das Streben nach Anerkennung.

Wenn wir träumen, so vermutet Solms, denken wir auf eine primitivere Art. Weniger in Sprache, nicht mehr kontrolliert durch unser Tagesbewusstsein, durch die Zensur des Verstandes. Sondern bildhafter, instinktiver, emotionaler. Es ist, als gerate unsere Seele in einen ursprünglicheren Zustand.

Denn mitunter steigen im Schlaf aus der Tiefe des Geistes Gefühle auf, die universell sind. Emotionen, die Menschen überall auf der Welt, in allen Kulturen vertraut sind.

Diese grundlegenden Instinktmuster, Sehnsüchte wie Urängste, brechen im Schatten der Nacht hervor und drücken sich oftmals in Traumbildern aus, die wohl jeder von uns kennt und die manche Somnologen „typische Träume“ nennen: Wir erheben uns beispielsweise in die Lüfte, fliegen über Städte oder Landschaften, wir haben Sex mit Fremden, stehen mit einem Mal nackt in der Öffentlichkeit, fallen ins Bodenlose, verlieren die Zähne oder scheitern wieder und wieder bei einer Prüfung.

Es ist, wie Solms vermutet, die animalische, triebhafte Seite des Menschen, die sich nachts vor seine kulturelle, soziale Seite schiebt.

So mögen im Traum zum einen Ängste vor Verlust und Versagen, Trennung und Tod urgewaltig emporsteigen. Zum anderen aber geben uns die Schlafbilder wohl auch die Freiheit, unsere innersten Wünsche ungeniert auszuleben.

Genau diese Freiheit, diese Zügellosigkeit ist es vielleicht auch, die Träume auf eine andere Weise so bedeutsam macht: Im Schlaf erhebt sich das Hirn über die Gesetze der Logik, vermag freier zu assoziieren, der Mensch gewinnt an Kreativität.

Wie in einer Collage fügen wir im Traum Gedanken, Gefühle und Erfahrungen zu völlig neuen Kombinationen zusammen. Forscher haben herausge-

funden, dass Schlafende vor allem das aufgreifen und neu zusammenwürfeln, was sie am Tag zuvor erlebt haben. Schon Sigmund Freud sprach von „Tagesresten“: von Versatzstücken, die das Gehirn zu Schlafgeschichten verweibt.

Forscher des Sigmund-Freud-Instituts in Frankfurt am Main fanden Hinweise darauf, dass wir zum Beispiel verwirrende Szenen aus dem Tag mit in die Nacht nehmen. Sie präsentierten Testpersonen kurz vor dem Einschlafen surreal anmutende Bilder, auf denen sämtliche Objekte dreieckig verzerrt waren – Autos fuhren etwa mit dreieckigen Rädern umher.

Die Darstellungen blitzten bloß für Sekundenbruchteile auf. Zu kurz, um bewusst wahrgenommen zu werden.

Nach dem Erwachen sollten die Probanden Szenen aus ihren Träumen aufzeichnen: Tatsächlich tauchten auf den Bildern auffallend viele dreieckige Gegenstände auf – etwa Segel, Haiflossen oder Ananasstückchen. Offenbar, so vermuten die Wissenschaftler, hatten die Schlafenden die unwirklichen Bilder mit bekannten Impressionen vermischt – und so in ihre Erfahrungswelt eingebaut.

Vielleicht vermögen wir uns auf ähnliche Weise in der Welt der Träume sogar selbst zu therapiieren. Manche Psychoanalytiker jedenfalls gehen davon aus, dass Menschen bisweilen verstörende Erlebnisse im Schlaf mit bekannten Situationen und vertrauten Eindrücken verknüpfen, um das Unverstandene begreiflich zu machen, zu verarbeiten und allmählich in ihr Selbstbild zu integrieren.

Auf unseren nächtlichen Reisen sind wir im Stande, alles mit allem zu verbinden – Träume sind „hyperkonnektiv“, wie Psychologen daher sagen. Wie von selbst vermengen wir Episoden aus ganz unterschiedlichen Lebensphasen, Wirklichkeit und Fiktion. So treten Traumfiguren nicht selten als Melange mehrerer vertrauter Personen in Erscheinung,

der Traumort gleicht mitunter einem Mosaik verschiedener realer und fantas-tischer Schauplätze.

Mithin verleiht uns der Schlaf die Gabe, Situationen aus ungekannter Perspektive zu betrachten, bestimmte Erlebnisse mit neuen, starken Emotionen zu färben. Und dadurch Erinnerungen lebendig zu halten.

Man kann also sagen: Träume bergen schöpferisches Potenzial.

**DASS SCHLAF** tatsächlich ein Quell der Inspiration ist, der Schlummernde also nicht bloß Wissen abspeichert und Fähigkeiten trainiert, konnte der Lübecker Neurowissenschaftler Jan Born vor Kurzem nachweisen.

Born präsentierte zwei Gruppen von Probanden mehrere Zahlenreihen, aus denen sie nach bestimmten mathematischen Regeln jeweils neue Ziffernfolgen herleiten sollten. Was die Test-

Das Resultat: Nach der nächtlichen Auszeit fanden rund 60 Prozent der Probanden den versteckten Schlüssel zur eleganten Lösung – das waren fast dreimal so viele wie in der Vergleichsgruppe.

Die Nachtruhe vermag also unseren Blick auf die Dinge zu verändern. Bisweilen gelangen wir dabei sogar zu Einsichten, die uns mit wachem Geist verborgen bleiben. Denn wer sich mit der Wissenschaftsgeschichte beschäftigt, dem fällt auf, dass manche großen Forscher ihre Entdeckungen praktisch im Schlaf gemacht haben.

So versuchte der russische Chemiker Dmitri Iwanowitsch Mendelejew in den 1860er Jahren lange Zeit vergebens, eine Ordnung für die chemischen Elemente zu finden. Eines Nachts, so berichtete er später, kam ihm im Schlaf die entscheidende Idee: Er sah eine Art Tabelle, in der sämtliche Elemente nach ihren Atomgewichten aufgelistet waren. Mendelejew erstellte daraus das sogenannte Periodensystem, das noch heute als Grundlage der Chemie gilt.

Auch der deutsche Forscher Friedrich August Kekulé berichtete von einem Geistesblitz: Er träumte im Halbschlaf von tanzenden Kugeln, die sich zu Pärchen verbanden und einander umfassten – und erkannte mit einem Mal, wie sich Atome zu Molekülen verbinden.

So mag es auch kein Wunder sein, dass zwei der kreativsten Köpfe aller Zeiten jenem wundersamen Bedürfnis, den Verstand zu verlieren, besonders gern nachgingen: Albert Einstein und Johann Wolfgang von Goethe.

Beide waren ausgesprochene Langschläfer. □

**Rainer Harf**, 34, ist Textredakteur im Team von GEO kompakt. Wissenschaftliche Beratung: Prof. Jürgen Zulley, Schlafmedizini-sches Zentrum, Universität und Bezirksklinikum Regensburg.

**Literaturempfehlung:** Jürgen Zulley, „Mein Buch vom guten Schlaf“, Goldmann; leicht verständlicher Überblick über aktuelle Erkenntnisse aus der Schlaforschung mit zahlreichen Rat-schlägen zur Behandlung von Schlafproblemen.

#### Memo: SCHLAF UND TRAUM

- **Jede Nacht** durchlaufen wir meist fünf Zyklen aus Tief-, Leicht- und REM-Schlafphasen.
- **Im REM-Schlaf** formt sich das prozedurale Gedächtnis. Es umfasst sämtliche motorischen Fertigkeiten, etwa Klavierspielen, Turnen oder Skifahren.
- **Im Tiefschlaf** bildet sich das deklarative Gedächtnis. Es beinhaltet unser Wissen über die Welt und unser Ich.
- **Eine Hirnregion** hinter den Augen, das „Motivationszentrum“, beeinflusst unsere Fähigkeit zu träumen.
- **Möglicherweise helfen** uns Träume bei der Verarbeitung schmerhafter Erlebnisse.

personen nicht wussten: Es gab einen Trick, mit dem sie die gewünschten Ergebnisse sehr viel leichter und schneller ermitteln konnten.

Die erste Gruppe durfte sich nach einem abendlichen Durchlauf hinlegen und sollte am Morgen dann neue Zahlenkolonnen bearbeiten. Die zweite dagegen trat zum ersten Durchlauf morgens an und zum zweiten acht Stunden später, ohne Schlafpause dazwischen.

AUGEN

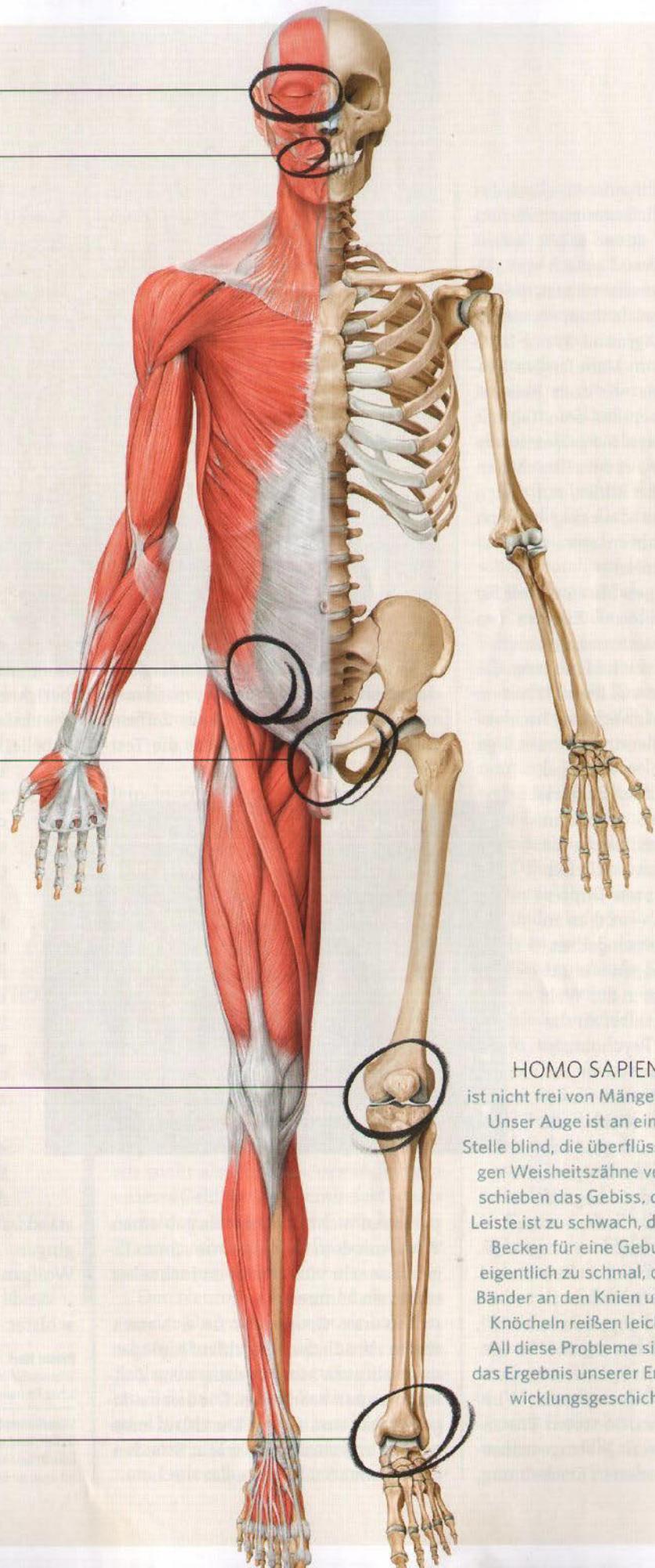
WEISHEITSZÄHNE

LEISTE

BECKEN

KNIEGELENKE

KNÖCHEL



#### HOMO SAPIENS

ist nicht frei von Mängeln:  
Unser Auge ist an einer  
Stelle blind, die überflüssi-  
gen Weisheitszähne ver-  
schieben das Gebiss, die  
Leiste ist zu schwach, das  
Becken für eine Geburt  
eigentlich zu schmal, die  
Bänder an den Knien und  
Knöcheln reißen leicht.  
All diese Probleme sind  
das Ergebnis unserer Ent-  
wicklungsgeschichte

# FEHLKONSTRUKTION MENSCH

Unser Körper ist ein biologisches Wunderwerk. Eine komplexe Maschine, in der Knochen, Muskeln, Organe und Nerven meisterhaft aufeinander abgestimmt sind. Doch so perfekt seine Anatomie auch zu sein scheint, unser Organismus offenbart einige sonderbare Schwachstellen und gibt uns das mit deutlichen Signalen bekannt: Zu leicht brechen unsere Knöchel, zu oft schmerzt der Rücken, verkalken Gelenke, entzündet sich der Blinddarm. Forscher haben nun herausgefunden, woran das liegt:

Wir leiden unter unserer eigenen Evolution

Text: Ute Eberle

Illustrationen: Karl Wesker

**G**äbe man einem Ingenieur den Auftrag, den Menschen neu zu entwerfen – als ein Wesen, das auf zwei Beinen läuft, eine Wirbelsäule besitzt, spricht, Luft einatmet und Nahrung in einem Magen-Darm-Trakt verdaut – dann wäre eines sicher: Sein Entwurf sähe in vielem ganz anders aus als der *Homo sapiens*.

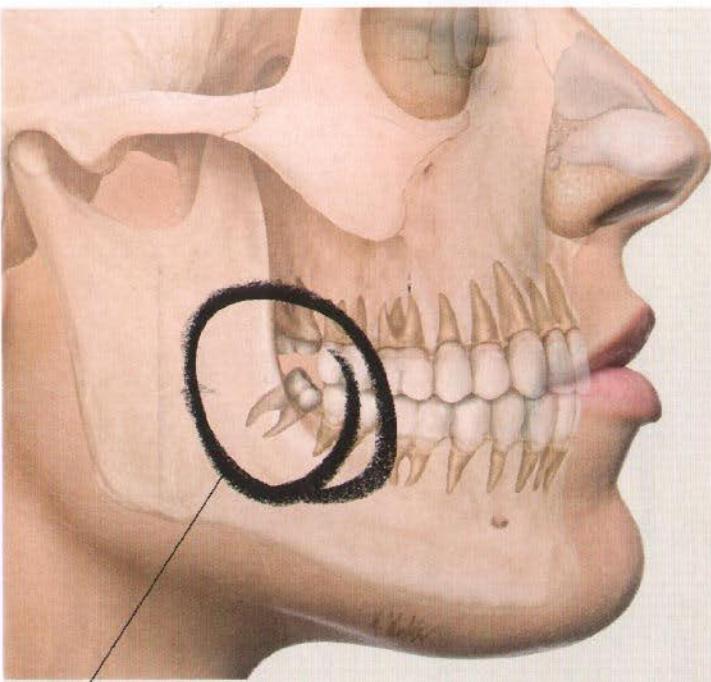
Gewiss, der Leib des Menschen ist ein Meisterwerk, eine ausgetüftelte biologische Maschine mit einem gut funktionierenden Denkzentrum, dem Hirn, das es uns als dem einzigen aller Tiere ermöglicht hat, die gesamte Erde zu erobern und uns gegen alle anderen Spezies zu behaupten.

Aber unser Körper steckt anscheinend auch voller Konstruktionsfehler. Zum Beispiel das Auge.

Dort sind die Adern und Nerven auf der Außenseite der Netzhaut verlegt – also der dem Licht zugewandten Seite (siehe Illustration Seite 47). Sie bündeln sich an einer Stelle der Augenrückwand und laufen in einem Strang Richtung Gehirn. Das ist etwa so sinnvoll, als würde man die Kabel des Sensors einer Digitalkamera, der das Bild aufzeichnet, über diesen hinweg und dann weiter ins Geräteinnere leiten.

Denn dort, wo die Nerven gebündelt das Auge verlassen, kann die Netzhaut kein Licht aufnehmen – sie hat einen blinden Fleck.

Um den auszugleichen, muss sich unser Auge ständig hin und her bewegen, muss das Hirn auf komplexe Weise permanent Simulationen berechnen. Dagegen



DER WEISHEITZAHN ist ein Relikt aus jener Zeit, als unsere Ahnen noch nicht kochten, sondern faserige Rohkost zerkauen mussten. Heute brauchen wir den letzten Backenzahn nicht mehr. Er stört sogar mitunter, wenn er etwa die vor ihm liegenden Zähne zusammenschiebt oder sich entzündet

liegen etwa bei Tintenfischen die Gefäße ganz zweckmäßig *hinter* der Netzhaut, und die Meeresbewohner sehen auf der gesamten Fläche makellos.

Oder der menschliche Rachen. In ihm überkreuzen sich die Luft- und die Speiseröhre. Das bedeutet: Alles, was wir essen und trinken, muss auf dem Weg in den Magen über die Atemöffnung hinwegrutschen. Um zu verhindern, dass Nahrung hineinfällt, muss sich die Luftröhre jedes Mal schließen, wenn ein Bissen anrückt. Doch manchmal versagt dieser Reflex. Dann gelangt die Speise in die Luftröhre, blockiert unsere Sauerstoffzufuhr, und wir ersticken. Insekten kann das nicht zu stoßen. Bei ihnen verlaufen die Atem- und Verdauungsorgane getrennt.

Und so geht es weiter: Unsere effiziente Schrittweise macht uns zwar zu einem der vielseitigsten Läufer im Tierreich: Wir können wandern, sprinten, auf einen Baum klettern oder über einen Graben springen. Doch zugleich sind unsere Füße, Knöchel und Knie sehr anfällig, verdrehen sich oft, zerren oder brechen und nutzen sich ab.

Oder die Adern des Menschen: Sie sind so ausgeklügelt, dass sie jedes Gewebe mit der exakt passenden Menge Blut versorgen. Doch dabei schlagen die Gefäße teils unerklärliche Wege, steile Kurven und Abzweigungen ein, die zu

Wirbeln führen und den Blutfluss hemmen. Besonders an solchen Stellen droht ein erhöhtes Risiko, dass sie zerreißen oder sich mit Ablagerungen verstopfen, die tödliche Infarkte auslösen.

„Es ist, als hätte ein Mercedes-Benz-Designer Strohhalme für die Benzinleitung vorgesehen“, so die US-Wissenschaftler Randolph Nesse und George Williams. Und sie folgern: „Unser Körperdesign ist zugleich sagenhaft präzise und ungeheuer schlampig.“

Die beiden Amerikaner zählen zu der Forscherriege der Evolutionsmedizin, die sich erst vor ein paar Jahren als eigene Disziplin etabliert hat. Anders als ihre Kollegen der konventionellen Zunft fragen Evolutionsmediziner nicht nur danach, wie etwas funktioniert, sondern auch nach dem Warum. Sie beschäftigen sich daher sowohl mit den Eigenheiten unseres Körpers als auch mit deren evolutionärer Geschichte und analysieren die Folgen für unsere Gesundheit.

Ihre Erkenntnis: Vieles von dem, was uns heute plagt – von Arterienverschluss über Hämorrhoiden bis zu schief stehenden Zähnen und Rückenschmerzen –, lässt sich auf zwei Ursachen zurückführen.

Zum einen haben sich die Menschen im Laufe der Evolution zu Lebewesen entwickelt, deren Konstruktion vielen Kompromissen unterliegt.

Zum anderen sind sie Organismen, die zwar anpassungsfähig sind, aber dafür viel Zeit benötigen. Doch sie leben in einer Welt, die sich zu schnell wandelt.

Beides kann krank machen. Aber je mehr die Forscher lernen, Gründe für gesundheitliche Leiden auch in der Evolutionsgeschichte des *Homo sapiens* zu suchen, desto besser lassen sich diese Leiden vermeiden.

DASS DIE KONSTRUKTION des Lebewesens Mensch wie bei allen anderen Tieren auch ein Kompromiss ist,

geht auf bestimmte fundamentale Prinzipien der Biologie zurück. So entstehen in der Natur Organismen niemals von Grund auf neu – vielmehr arbeitet die Evolution gewissermaßen mit dem, was bereits vorhanden ist. Sie verwendet also erprobte Bestandteile wie aus einem Baukasten und verändert sie immer weiter.

Unsere Beine und Hände beispielsweise haben sich aus Fischflossen entwickelt, den Nacken haben wir mit den Krokodilen gemein, unsere Zähne

gehen auf den Panzer von frühen Knochenfischen zurück. „Wir sind in vieler Hinsicht ein in Jahrtausenden gewachsenes Flickwerk“, so der Berliner Evo-

## Ständig geht die Natur Kompromisse ein – der Mensch ist einer davon



lutionsmedizi-  
ner Detlev Ganten.

Dass wir beispielswei-  
se an einem Happen ersti-  
cken können, weil er in die  
Luftröhre gelangt, entschied sich  
bereits vor 500 Millionen Jahren.

Zu jener Zeit schwammen win-  
zige, wurmförmige Wesen durch  
das Meer. Die archaischen Tiere nah-  
men in der Flüssigkeit gelösten Sau-  
erstoff über die Haut auf. Als sie im  
Verlauf der Evolution immer größer

**DAS KNIE** – eine Schwachstelle: Anders als  
bei Affen verteilt sich unser Körpergewicht auf zwei  
Beine, was das Gelenk stark belastet. Dennoch  
ist es im Laufe der Evolution nicht robuster ge-  
worden: Unsere Wild jagenden Ahnen brauchten  
leichte Knochen, um schnell laufen zu können

wurden, genügte das primitive Sys-  
tem nicht mehr – und so formte sich  
aus einer Körperpartie ein komplexes  
Ateminstrument; Teile des siebartigen  
Mundes, durch den das Tier Wasser in  
den Körper strudelte, um Mikroorganis-  
men herauszufiltern, verwandelten sich  
über Jahrhunderten in Kiemen.

Eine Linie dieser Kiemenwesen ent-  
wickelte zudem einfache Lungensäcke, die  
sich aus dem Darm stülpten. Aus diesen  
Säcken ging später die Lunge hervor, das Atem-  
ungsorgan der Amphibien, Echsen, Vögel  
und Säugetiere. Seither sind die Atem- und  
oberen Verdauungsorgane sämtlicher Wir-  
beltiere – von der Forelle bis zum Rotkehl-  
chen – anatomisch eng verknüpft.

Problematisch aber ist dies vor allem  
für unsere Spezies. Denn als unsere Vor-  
fahren eine Sprache hervorbrachten,  
vergrößerte sich der Rachenraum – der  
Zunge verschaffte dies mehr Beweg-  
lichkeit. *Homo sapiens* konnte seine  
Artikulation verfeinern, die Verständig-  
ung vielfältiger werden. Dabei  
verlegten sich jedoch auch Luft- und

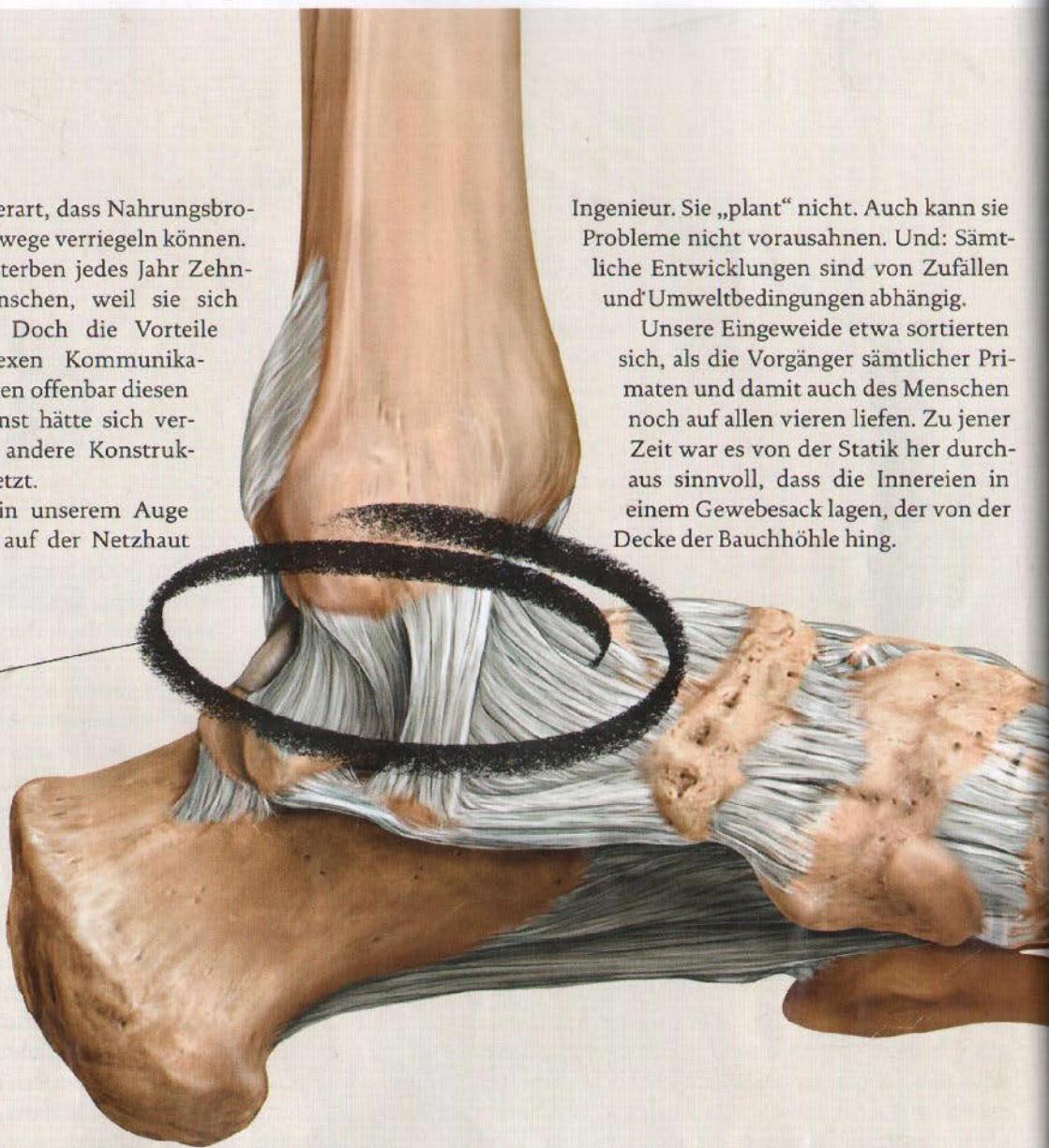
Speiseröhre derart, dass Nahrungsbrocken die Atemwege verriegeln können.

Bis heute sterben jedes Jahr Zehntausende Menschen, weil sie sich verschlucken. Doch die Vorteile einer komplexen Kommunikation überwiegen offenbar diesen Nachteil – sonst hätte sich vermutlich eine andere Konstruktion durchgesetzt.

Und dass in unserem Auge Adern außen auf der Netzhaut

#### DIE FUSSGELENKE

tragen ein noch größeres Gewicht als die Knie, müssen zudem ständig Unebenheiten ausgleichen und Balance halten. Doch da sie nicht zu dick und schwer sein dürfen, verstauchen sie oft



liegen, geht ebenfalls auf die Verwendung uralter Bausteine zurück. Unsere Sehorgane haben sich – wie die aller Wirbeltiere – letztendlich aus lichtempfindlichen Zellen entwickelt, deren ursprünglichste Formen im Gehirn eines Urahnen lagen. Einige dieser Lichtsinneszellen verschoben sich im Laufe der Evolution als Teil kleiner, sich austulpender Gehirnblasen an die Hautoberfläche. Die mit den Sinneszellen verbundenen, weitgehend durchsichtigen Nervenfasern legten sich über die empfindsame Zellschicht des Sehorgans, sodass das Licht sie zunächst durchqueren musste.

Rückblickend ist diese Lösung nur eine von vielen – und wohl nicht die beste. Doch die Evolution ist kein

Ingenieur. Sie „plant“ nicht. Auch kann sie Probleme nicht vorausahnen. Und: Sämtliche Entwicklungen sind von Zufällen und Umweltbedingungen abhängig.

Unsere Eingeweide etwa sortierten sich, als die Vorgänger sämtlicher Primaten und damit auch des Menschen noch auf allen vieren liefen. Zu jener Zeit war es von der Statik her durchaus sinnvoll, dass die Innereien in einem Gewebesack lagen, der von der Decke der Bauchhöhle hing.

Als Menschen sesshaft wurden, kamen völlig neue Krankheiten auf

Als sich aber später, vor gut sieben Millionen Jahren, in Afrika Savannen und offene Waldlandschaften ausbildeten, richteten sich einige Gruppen von Vierbeinern auf: Der zweibeinige Gang entwickelte sich. Dennoch blieb es im Bauch bei der althergebrachten Befestigung – und die erwies sich bald als Nachteil.

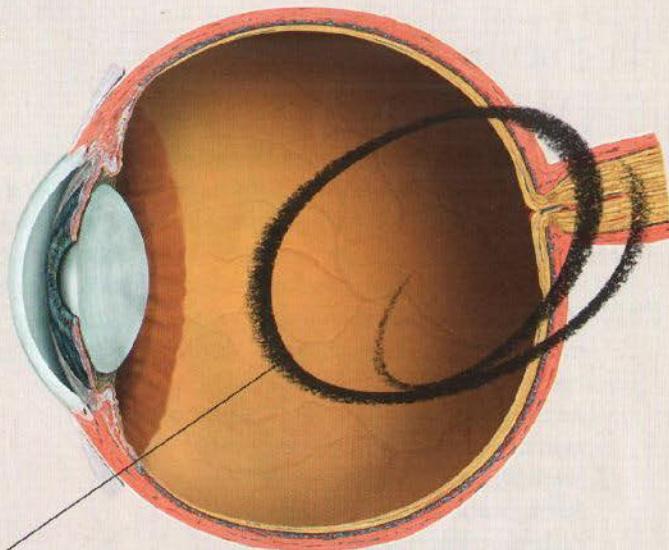
Denn nun hingen die Innereien wie von einem vertikalen Pfosten herab. Sie drückten auf die Bauchwand und schoben sich zuweilen hindurch, sobald sich dort eine Lücke auftat, was bis heute etwa zu Leistenbrüchen führt.

Auch dass sich ein Großteil der Menschheit – in Deutschland beispielsweise 70 Prozent – mindestens einmal

im Jahr mit Rückenschmerzen plagt, hat hauptsächlich damit zu tun, dass unser Design für den Gang auf vier Beinen angelegt war. Denn das ganze Gewicht des Oberkörpers lastet auf Lenden und Wirbelsäule.

Da Eingeweidebrüche oder Rückenschmerzen aber nur selten die Fortpflanzung beeinträchtigen, bestand aus evolutionärer Sicht wenig Grund, diese Mängel zu beheben. Ohnehin kommt es selten vor, dass die Natur bewährte Konstruktionen aufgibt und gänzlich neu ansetzt – selbst wenn die Probleme gravierend sind.

Dass etwa Frauen Babys durchs Becken gebären, ist aus heutiger Perspektive unklug. Denn der Kopf des



**DAS AUGE** hat kein ideales Design: Dort, wo der Sehnerv durch den Augenhintergrund dringt (oben rechts), befinden sich keine Sinneszellen auf der Netzhaut – ein blinder Fleck entsteht, den unser Gehirn ständig mit komplexen Simulationen ausgleichen muss

durch die Beckengeburt darin ein „Gipfel der Fitness“: ein optimaler Kompromiss zwischen den Vorteilen eines großen Gehirns und den Nachteilen einer risikanten Niederkunft. Selbst wenn es einen möglicherweise noch höheren Gipfel gäbe – eine Geburt aus dem Bauchraum etwa –, könnte unsere Spezies ihn nicht erreichen.

Denn während der Veränderung müssten wir erst einmal ein „Tal der Unfitness“ durchwandern, auf dessen Stationen es dazu kommen könnte, dass wir infolge körperlicher Schwächung schlicht aussterben.

**UND SO LEBEN WIR** mit vielen Lösungen, die ungünstig oder regelrecht überholt sind – etwa mit den Weisheitszähnen: Für unsere Urahnen, die sich überwiegend von faserig-zäher Pflanzenkost ernährten, war jeder Zahn wichtig. Heute aber kochen wir unser Essen, es ist dementsprechend weich. Wir brauchten also gar nicht mehr so viele Zähne.

Inzwischen überwiegen sogar die Nachteile: Unser Kiefer hat sich verkleinert, das Gebiss rückte enger zusammen, und die verbliebenen Weisheitszähne schieben nun die schon vorhandenen noch stärker zusammen. Ist für sie nicht mehr genügend Platz, können Entzündungen und schiefe Zähne die Folge sein.

Oder der Blinddarm mit seinem Wurmfortsatz. Dieser half einst dabei, die Zellulose faseriger Pflanzen

Menschen ist durch sein mächtiges Gehirn so groß geworden, dass er kaum noch durch den Geburtskanal passt. Um sich überhaupt hindurchzuschieben zu können, müssen sich Babys korkenzieherartig durch die enge Passage winden, sodass sie mit dem Rücken zur Bauchdecke der Mutter liegend geboren werden. Anders als andere Primaten kann eine Menschenmutter ihr Kind deshalb nicht selbst herausziehen – sie würde ihm sonst womöglich das Rückgrat brechen.

Läge die Öffnung der Vagina außerhalb des Beckens, etwa im Bauch, wären Geburten weitaus einfacher. Und gäbe es tatsächlich einen Ingenieur für menschliches Design, könnte er eine solche Innovation in einem Schritt verwirklichen. Doch in der Natur muss jede Änderung viele Zwischenstadien durchlaufen.

Stellt man sich die evolutionäre Entwicklung als eine Landschaft vor, dann wäre die Erhaltung der Art



# Erst heute werden Menschen alt genug, um ihren Körper zu verschleissen

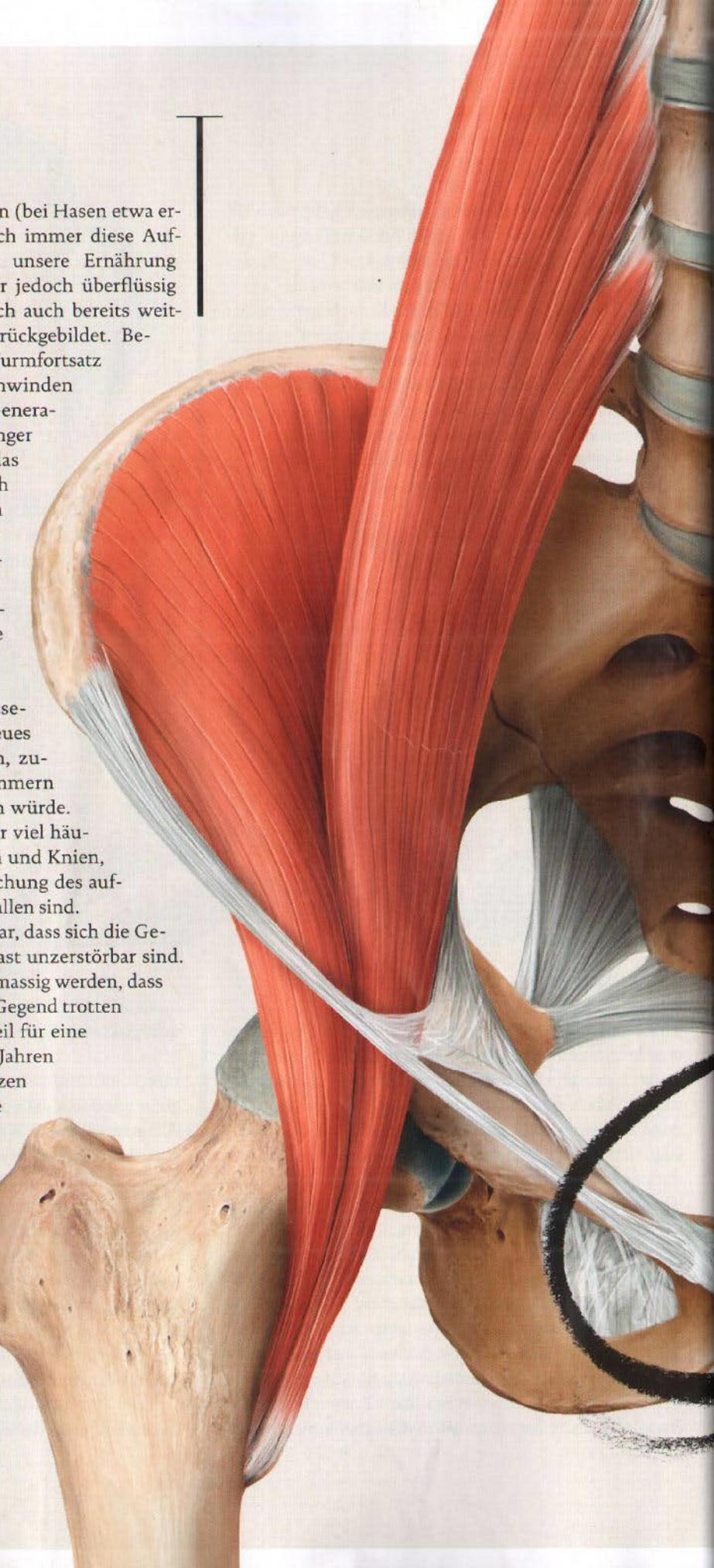
zu verdauen (bei Hasen etwa erfüllt er noch immer diese Aufgabe). Für unsere Ernährung heute ist er jedoch überflüssig und hat sich auch bereits weitgehend zurückgebildet. Bevor der Wurmfortsatz ganz verschwinden

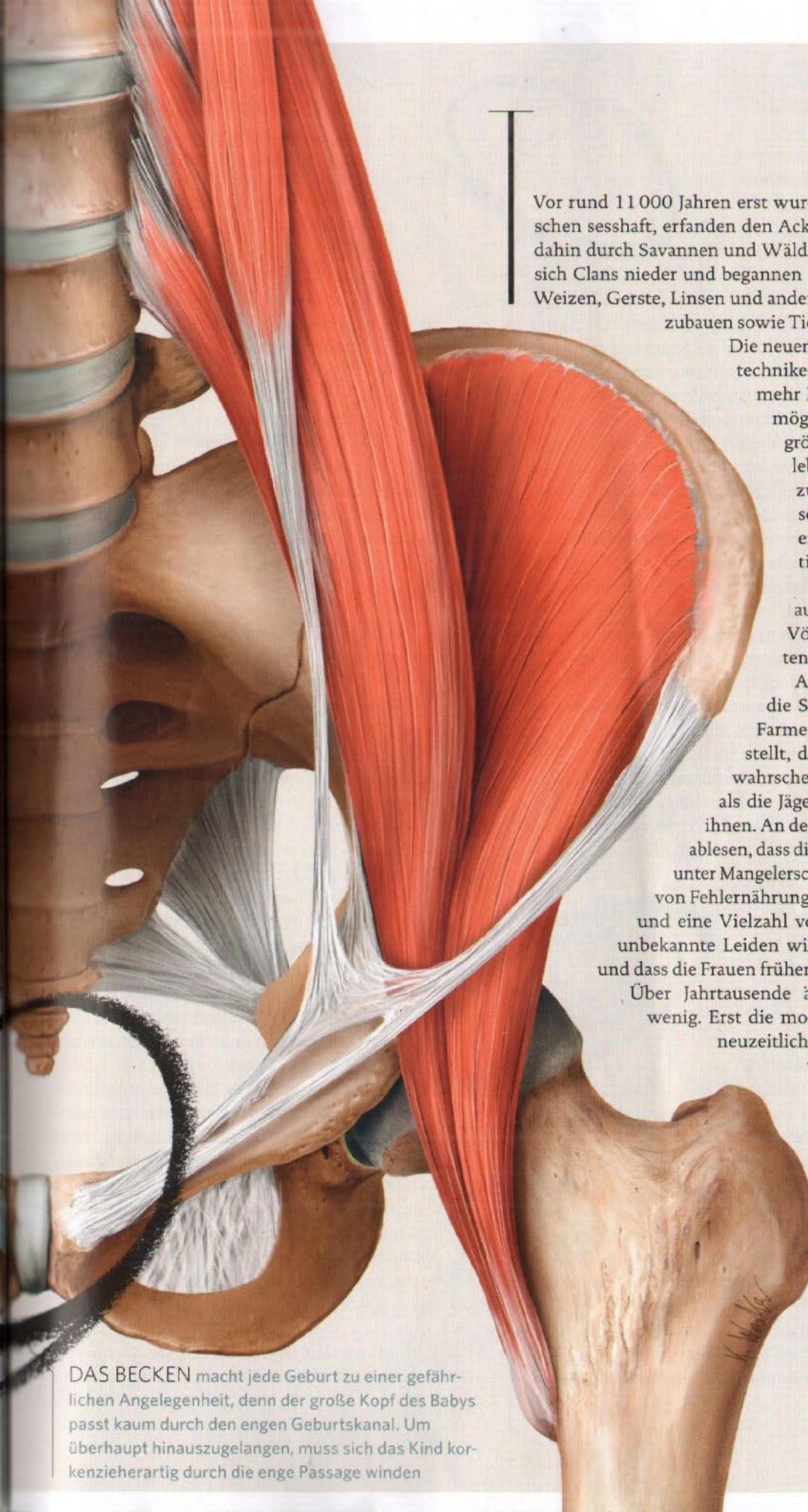
kann, müsste er über viele Generationen noch kleiner und damit enger werden. Dabei aber könnte sich das Risiko enorm erhöhen, dass sich Nahrungsreste in ihm verfangen und bedrohliche Entzündungen auslösen. Dies, glauben Evolutionsmediziner, wirkt wie eine Schranke. So wird uns der Wurmfortsatz vermutlich noch lange erhalten bleiben.

**MANCHMAL** scheitern Verbesserungen auch daran, dass ein neues Design zwar ein Problem lösen, zugleich aber ein anderes verschlimmern oder überhaupt erst hervorrufen würde. So verletzen Menschen sich sehr viel häufiger als Vierbeiner an Knöcheln und Knien, weil die für die harte Beanspruchung des aufrechten Gangs zu zierlich ausgefallen sind.

Theoretisch wäre es vorstellbar, dass sich die Gelenke derart verdicken, bis sie fast unzerstörbar sind. Doch dabei würden sie wohl so massig werden, dass wir nur noch behäbig durch die Gegend trotten könnten – ein zu großer Nachteil für eine Spezies, die noch vor 12 000 Jahren dem Wild über weite Distanzen folgte und unterwegs Früchte und Knollen sammelte.

Zu jener Zeit offenbarte sich das zweite große Dilemma in der menschlichen Evolution: Durch die Erfindung der Kultur und die Entwicklung einer modernen Zivilisation änderte sich unsere Lebenswelt so schnell, dass *Homo sapiens* sich körperlich dem Wandel kaum noch anpassen konnte.





Vor rund 11 000 Jahren erst wurden die ersten Menschen sesshaft, erfanden den Ackerbau. Statt wie bis dahin durch Savannen und Wälder zu ziehen, ließen sich Clans nieder und begannen die Prototypen von Weizen, Gerste, Linsen und anderen Feldfrüchten anzubauen sowie Tiere zu züchten.

Die neuen Anbau- und Zuchtechniken brachten ihnen mehr Kalorien ein und ermöglichen es, in immer größeren Gruppen zu leben, Arbeitsteilung zu praktizieren, Häuser und Städte zu bauen. Kurzum: Zivilisationen zu erschaffen.

Doch sie forderten auch einen Tribut: Völlig neue Krankheiten kamen auf.

Anthropologen haben die Skelette jener ersten Farmer studiert und festgestellt, dass die Bauern sehr wahrscheinlich kleiner waren als die Jäger und Sammler vor ihnen. An den Knochen lässt sich ablesen, dass die Menschen häufiger unter Mangelerscheinungen aufgrund von Fehlernährung litten, mehr Infekte und eine Vielzahl von Parasiten hatten, unbekannte Leiden wie Karies bekamen – und dass die Frauen früher starben.

Über Jahrtausende änderte sich daran wenig. Erst die moderne Medizin und neuzeitliche Errungenschaften wie strenge Hygiene standards ließen die Lebenserwartung wieder deutlich steigen. Doch dafür leiden insbesondere die Bewohner der Industriennationen heute verstärkt an Zivilisationskrankheiten.

**DAS BECKEN** macht jede Geburt zu einer gefährlichen Angelegenheit, denn der große Kopf des Babys passt kaum durch den engen Geburtskanal. Um überhaupt hinauszugelangen, muss sich das Kind korkenzieherartig durch die enge Passage winden

DER NACKEN muss den mehrere Kilogramm schweren Kopf balancieren und bedarf daher kräftiger Muskeln. Die heutige Lebensweise, etwa die Arbeit im Sitzen, unterstützt ihn zu wenig. Die Folge: schmerzhafte Verspannungen

Zum einen liegt diese Entwicklung daran, dass die Menschen nun überhaupt alt genug werden, um ihren Körper zu verschleissen. Mehr noch aber hat es vermutlich damit zu tun, dass sie ihn Belastungen aussetzen, für die er nicht ausgelegt ist. Weil er sich nicht schnell genug verändert.

Genetiker schätzen, dass es in der Regel mindestens 50 000 Jahre dauert – also etwa 2000 Generationen –, ehe sich eine Mutation im Erbgut gefestigt hat. Demnach sind 10 000 Jahre eine bei Weitem zu kurze Zeit für fundamentale Veränderungen unseres Körpers.

Zwar geht die menschliche Evolution unentwegt weiter – und zuweilen auch rasant. So haben sich etwa in Europa, dem Vorderen Orient und in Ostafrika seit Erfindung der Sesshaftigkeit binnen weniger Generationen Genmutationen verbreitet, die Erwachsenen eine besondere Fähigkeit verleihen: Sie können Milch und Käse verzehren, ohne Darmkrämpfe oder Durchfall ertragen zu müssen – eine Eigenschaft, die zuvor im Kindesalter verloren ging.

Und unter den Bewohnern hoch gelegener Dörfer in Tibet hat sich binnen 3000

DAS RÜCKGRAT haben wir mit Fischen gemein. Doch während Wirbel im Wasser kaum belastet werden, müssen sie an Land der Schwerkraft trotzen. Besonders beim Menschen drückt das Gewicht des Oberkörpers auf die Lendenwirbel, was nicht selten Bandscheibenschäden hervorruft

Jahren eine Erbgutveränderung etabliert, die das Atmen in dünner Luft erleichtert. Nach evolutionären Maßstäben haben sich beide Mutationen damit erstaunlich schnell durchgesetzt.

Doch meist brauchen genetische Veränderungen sehr viel mehr Zeit – zu lange, um mit dem Entwicklungstempo moderner Zivilisationen Schritt zu halten.

Bluthochdruck etwa tötet heute mehr Menschen in der Welt als jedes andere medizinische Pro-



blem. Er erhöht das Risiko von Gefäßverschlüssen und ist ein Hauptgrund für Schlaganfälle, Herzinfarkte und Nierenversagen. „Allein in den Industriestaaten hat jeder zweite Erwachsene einen zu hohen Blutdruck“, so der Evolutionsforscher Detlev Ganten.

Umgekehrt diagnostizieren Mediziner bei traditionellen Indianerkulturen, die noch heute wie Jäger und Sammler leben, äußerst selten einen solchen Überdruck.

Schon lange vermuten Wissenschaftler, dass dies mit zwei Faktoren zusammenhängt: Ernährung und Bewegung. Und mittlerweile verstehen sie immer besser, wie die Verbindung evolutionsär zu deuten ist.

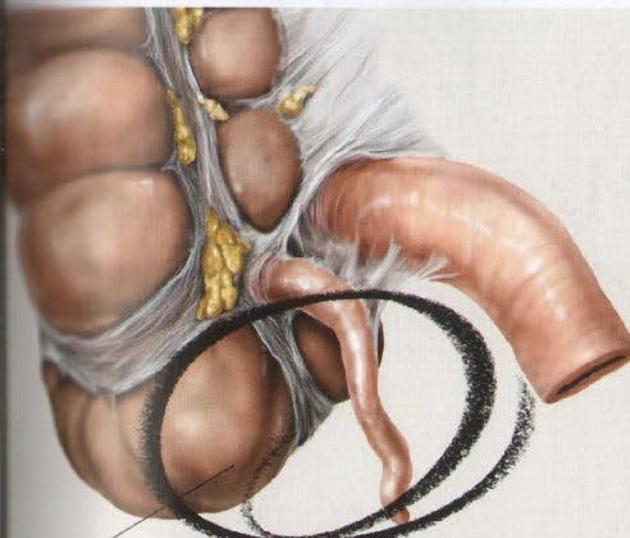
Bei den urzeitlichen Jägern und Sammlern war Salz knapp; Paläoanthropologen haben hochgerechnet, dass sie weniger als zwei Gramm pro Tag mit der Nahrung aufnahmen. Und einen Teil schwitzten sie bei anstrengenden Märschen gleich wieder aus. In Jahrtausenden entwickelten ihre Körper deshalb Strategien, um Salz zurückzuhalten.

Denn Salz hat eine wichtige Funktion: Es bindet Wasser im Blut. Ohne Wasser und Salz verringert sich das Blutvolumen – und damit der Blutdruck. Wenn dieser zu sehr absackt, wird man ohnmächtig, fällt um und ist mitunter in Lebensgefahr.

Menschen in Industrienationen aber schwitzen in ihren Berufen kaum noch. Auch in ihrer Freizeit bewegen sie sich wenig – und behalten unter anderem deshalb zu viel Salz im Körper.

Zudem genießen sie Lebensmittel, die für ihren urzeitlichen, noch nicht weiterentwickelten Stoffwechsel fremd sind. „Rund 70 Prozent von dem, was wir im Schnitt essen, war bis vor wenigen Jahrhunderten nur selten Bestandteil unserer Ernährung, darunter Kristallzucker, Fett und eben das Salz“, so Detlev Ganten. Deutsche Männer etwa nehmen mehr als neun Gramm Salz pro Tag auf.

Deshalb ist zu viel Blut in den Adern – der Druck steigt.



**DER BLINDDARM** half unseren Vorfahren, Zellulose aus Pflanzen zu verdauen. Im Laufe der Evolution hat er sich zurückgebildet, ist aber nicht ganz verschwunden. Heute ist sein schlauchförmiger Anhang ein Problem: Er kann sich lebensbedrohlich entzünden

Zudem überflutet die moderne Ernährung den Körpersaft zumeist mit Zucker, den ruhende Muskeln nicht abbauen. Dieser ursprünglich sinnvolle Mechanismus, der dabei half, den kostbaren, energiereichen Stoff nicht in Zeiten der Rast zu verschwenden, hat heute verheerende Folgen. Wer sich kaum bewegt, weist einen hohen Blutzuckerspiegel auf, der auf Dauer Diabetes oder Fettleibigkeit auslösen kann.

Auch sonst überfordert die moderne Lebensführung den menschlichen Körper. So schwächt etwa der Mangel an Bewegung unsere Knochen – deren Zellen sich vornehmlich unter Belastung und Erschütterungen teilen und Skelettteile erneuern.

Und so kommt es dazu, dass in unserer Zivilisation Knochenschwund und Osteoporose so weit verbreitet sind wie nie zuvor. Dass Augen ihre Schärfe für die Ferne verlieren, weil sie im Kindesalter zu oft auf Bücher und Monitore gerichtet worden sind. Dass kindliche Kiefer nicht genug stimuliert werden, weil die moderne Nahrung weich ist. Die Folge: Sie bleiben schmächtig, Zähne wachsen in der Enge schief heran, Zahnpfosten sind nötig.

Weil unser Essen zu wenige Ballaststoffe enthält, ist unser Stuhl oft so hart, dass viele Senioren vom jahr-

zehntelangen Pressen einen ausgeleierten Darm haben (dessen Beulen sich häufig entzünden). Auch für Hämorrhoiden ist Verstopfung die Hauptursache. Zudem trägt langes Sitzen dazu bei – das Blut sackt in die Gesäßadern und lässt sie nach unten sinken.

Die Haut verbrennt, weil sie in Regionen der Sonne ausgesetzt wird, für die sie zu bleich ist. Füße verkrüppeln, eingezwängt in schmale Schuhe. Eine hygienisch überreine Lebensweise verwirrt das Immunsystem, sodass es vermeintliche, tatsächlich aber harmlose Gegner attackiert (siehe Seite 84).

Und die heutige Familienplanung könnte ein wichtiger Grund dafür sein, dass eine von zehn Frauen an Brustkrebs erkrankt. Denn während eine Frau vor 10000 Jahren vermutlich nur 150 bis 200 Regelblutungen in ihrem Leben hatte (da sie meist entweder schwanger war oder stillte), erlebt der Körper moderner Frauen davon oft mehr als 400 – bei denen das empfindliche Brustgewebe jedes Mal mit Hormonen überschwemmt wird, die Tumore maßgeblich begünstigen können.

Gerade die Nachfahren jener Urmenschen, die einst am besten an ihre ursprüngliche Umwelt angepasst waren, leiden jetzt wohl am stärksten. Wer etwa früher

besonders gut Salz zurückhalten konnte, überlebte die häufigen Dürreperioden – wer dagegen heute besonders gut Salz im Körper bewahrt, leidet häufiger an Bluthochdruck.

„Unsere alten evolutionären Vorteile kehren sich um in Nachteile, weil sie für das derzeitige Leben nicht geschaffen wurden“, sagt Detlev Ganter.

Allerdings lassen sich

einige der Zivilisationskrankheiten mit einem simplen Mittel entschärfen, wie eine groß angelegte Langzeitstudie unter mehr als 5200 Bewohnern eines Ortes an der Ostküste der USA ergeben hat: Wer seinen Urzeitkörper beispielsweise fünfmal wöchentlich nur eine halbe Stunde marschieren lässt, lebt mit etwas Glück 18 Monate länger als ein gehfauler Nachbar. □

Die Wissenschaftsjournalistin **Ute Eberle**, 39, lebt in Leiden, Niederlande, und schreibt regelmäßig für GEOkompass. **Karl Wesker**, Jahrgang 1953, arbeitet als Illustrator in Berlin. Er zeichnet seit 1996 Details des menschlichen Körpers und hat den „Prometheus“ bebildert, einen Anatomie-Atlas, der zu einem Standardwerk für Mediziner geworden ist.

**Literaturempfehlung:** Neil Shubin, „Der Fisch in uns“, Fischer; eine spannende, gut verständliche Reise durch die mehr als 3,5 Milliarden Jahre alte Geschichte unseres Körpers.



## Dietmar Wolff, 47

### Chefpilot bei Condor

Wer 13 Stunden lang ein Flugzeug steuert und dabei zehn Zeitzonen überwindet, muss lernen, die innere Uhr »auch mit Gewalt« umzustellen. Um so schnell wie möglich in der Ortszeit anzukommen, lässt Wolff im Hotel am Ziel die Rollläden runter und schläft auch tagsüber – schon eine Stunde hilft. Bis zu drei Tage müssen Piloten nach einem Langstreckenflug pausieren.



Biorhythmus

# DIE ZEITMASCHINE IN UNS

Text: Ralf Berhorst

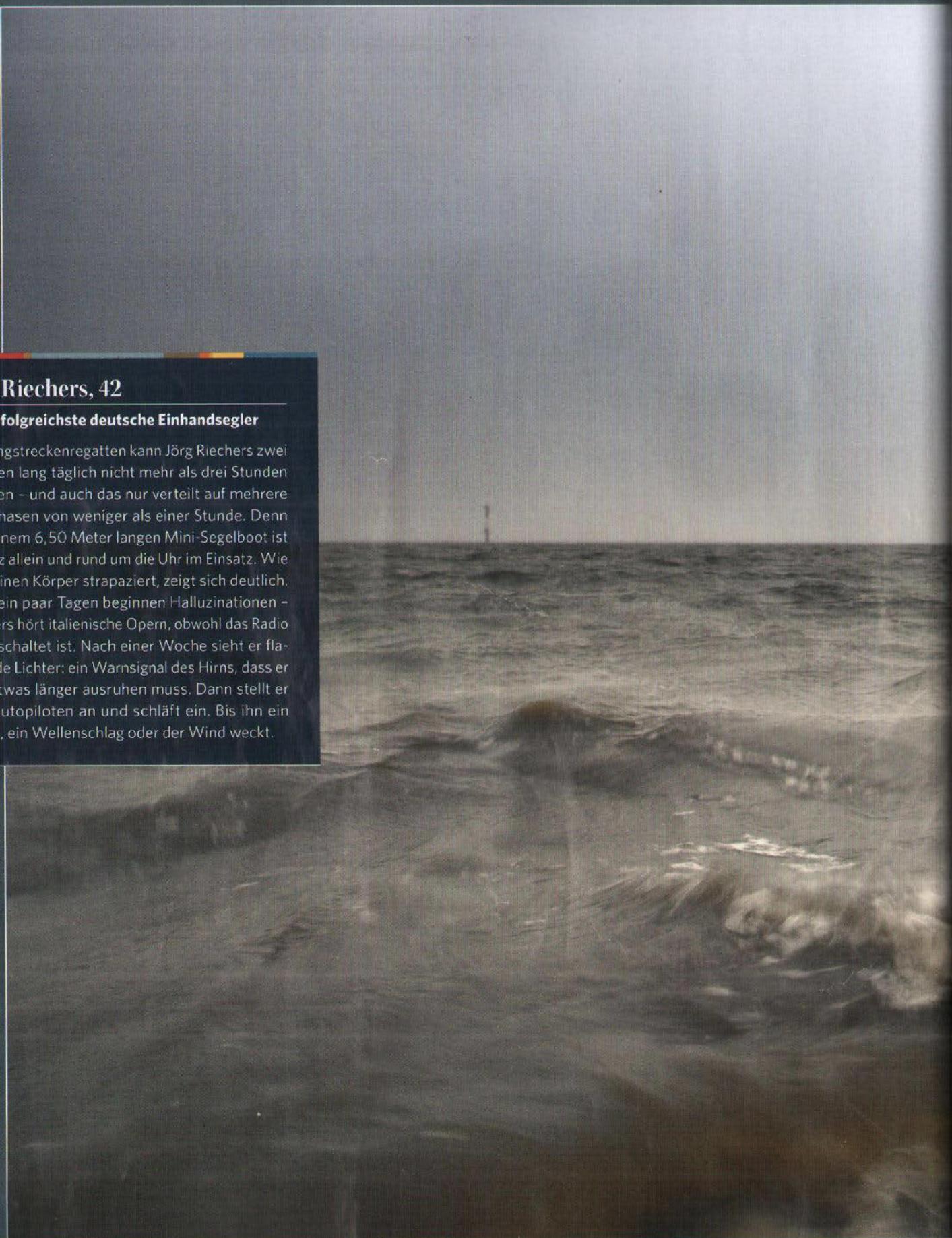
Fotos: Heiner Müller-Elsner

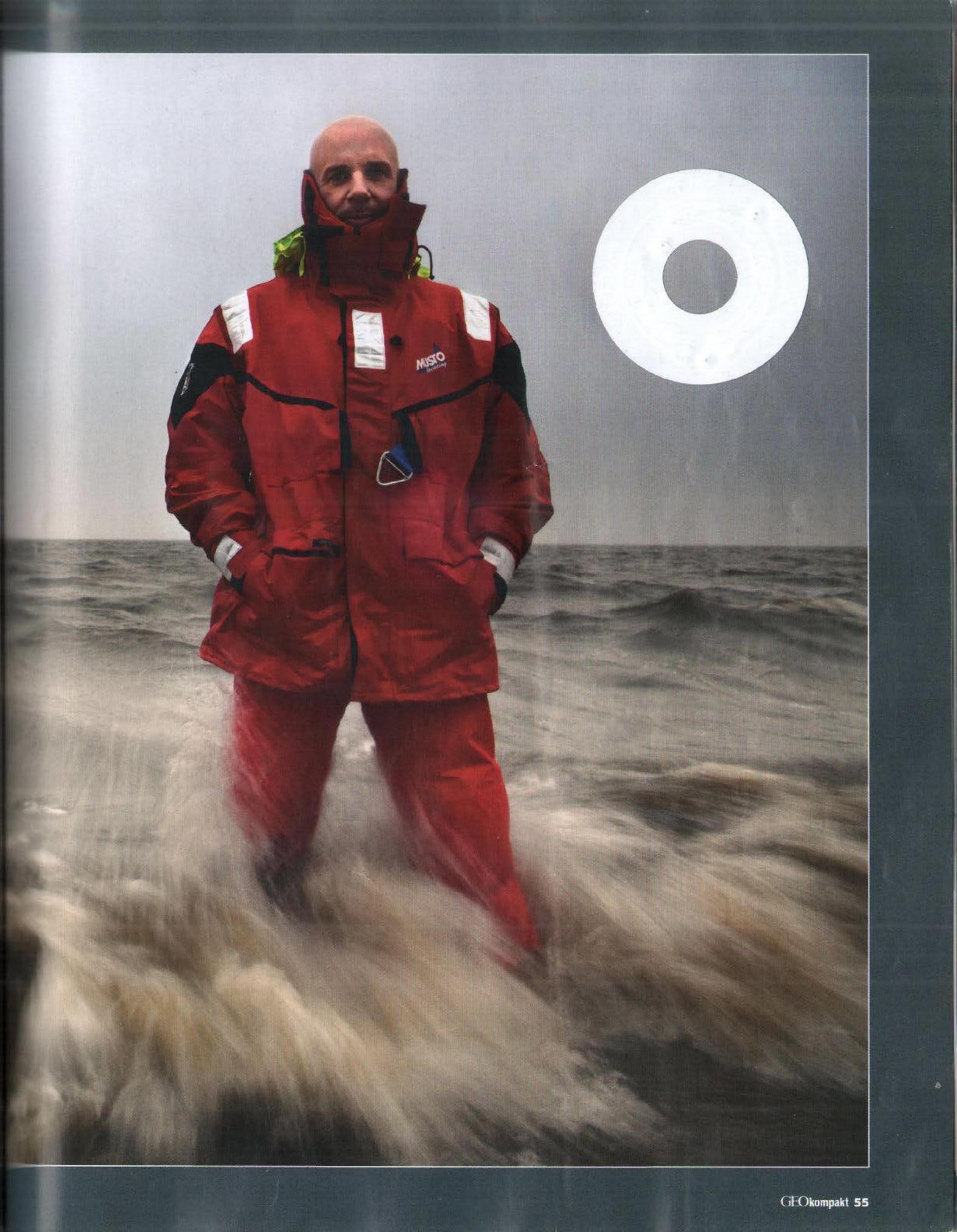
Damit der Körper stets im richtigen Moment Optimales leisten kann, ist sein biologischer Rhythmus an den Verlauf von Tag und Nacht gekoppelt. Dafür sorgen Billionen winziger biochemischer Uhren in den Zellen, die mithilfe von Nervenzellen und Sonnenlicht synchronisiert werden. Gefährlich werden aber kann es, wenn der innere Takt aus der Balance gerät

## Jörg Riechers, 42

### Der erfolgreichste deutsche Einhandsegler

Bei Langstreckenregatten kann Jörg Riechers zwei Wochen lang täglich nicht mehr als drei Stunden schlafen - und auch das nur verteilt auf mehrere Kurzphasen von weniger als einer Stunde. Denn auf seinem 6,50 Meter langen Mini-Segelboot ist er ganz allein und rund um die Uhr im Einsatz. Wie das seinen Körper strapaziert, zeigt sich deutlich. Nach ein paar Tagen beginnen Halluzinationen - Riechers hört italienische Opern, obwohl das Radio ausgeschaltet ist. Nach einer Woche sieht er flackernde Lichter: ein Warnsignal des Hirns, dass er sich etwas länger ausruhen muss. Dann stellt er den Autopiloten an und schläft ein. Bis ihn ein Alarm, ein Wellenschlag oder der Wind weckt.





## Thorben Seidler, 35

### Van-Carrier-Führer im Containerterminal Bremerhaven

Wenn früh um halb fünf der Wecker klingelt, muss Seidler sofort aufstehen, sonst schläft er wieder ein. Die Nachschicht ist für ihn ein ständiger Ausnahmezustand. Dann falle es ihm schwerer, sich zu konzentrieren, sagt der Hafenarbeiter. Wenn die Augen brennen, stoppt er das Fahrzeug, um frische Luft zu schnappen. Das bringt ihn wieder in Form.





6|5



## Nico Aissen, 40

### Elblotse

Wie lange ein Lotse arbeitet, entscheidet an der Elbmündung oft der Zufall: je nachdem, ob er auf einem schnellen Kühlsschiff fährt oder auf einem trügen Frachter. Häufig arbeitet Nico Aissen nachts, doch dass er wenig schläft, stört ihn nicht. Die Verantwortung halte ihn wach, sagt er.



# i

Im Körper des Menschen ticken mehr biologische Zeitmesser, als es Uhren auf der Welt gibt – und jemals gegeben hat. Denn fast in jeder seiner rund 100 Billionen Zellen existiert ein inneres Uhrwerk, wahrscheinlich sogar mehrere. Könnte man ihr Ticken hören, so wäre der Lärm infernalisch.

Synchronisiert werden all diese Uhren von einem komplexen körpereigenen Zeitsystem. Etwa beim Übergang vom Tag auf die Nacht: Wird es draußen dunkel, registrieren das Sensoren in der Netzhaut des Auges, die einen zentralen Taktgeber im Gehirn alarmieren; der leitet die Information an die Uhren im Inneren der Körperzellen weiter, die daraufhin ihre Aktivität auf die Außenzeit abstimmen.

Die Fähigkeit des Organismus, Zeit zu messen, zählt zu den erstaunlichsten Erfindungen der Evolution.

Denn eigentlich weiß der Körper nichts von Sekunden, Minuten oder Stunden – all diesen von Menschen gemachten Einteilungen der Zeit. Solche Begriffe existieren ja erst seit wenigen Tausend Jahren. Das Phänomen Zeit hingegen ist mindestens so alt wie das Universum selbst.

Und seit Jahrmillionen müssen sich der Mensch und seine direkten Vorfahren – und mit ihm alle anderen Lebewesen – in einer Welt behaupten, die bestimmt wird von natürlichen Rhythmen: etwa dem Wechsel von Tag und Nacht und damit von Licht und Finsternis; aber auch von den Mondphasen sowie den vier Jahreszeiten; und von den Gezeiten an den Küsten großer Meere. Zudem schwankt

die Temperatur an manchen Orten des Globus binnen eines Tages zwischen extremer Hitze und Kühle in der Nacht.

Verfügte der Mensch über kein inneres Zeitsystem, zu dem die Billionen Zelluhren sowie der zentrale Taktgeber im Hirn gehören, könnte er in dieser Umwelt nicht überleben.

Das hat vor allem zwei Gründe. Zum einen ist der *Homo sapiens* selbst ein zeitliches, ein getaktetes Wesen: Alle Funktionen seines Körpers unterliegen einem Auf und Ab, einem Rhythmus.

Der auffälligste davon ist der Wechsel zwischen Schlafen und Wachen – länger als ein paar Tage kann der Mensch nicht ohne Schlaf bleiben.

Aber auch Hungergefühl, Verdauung und Konzentrationsfähigkeit folgen eigenen Rhythmen – wie letztlich alle Vorgänge im Körper. Gäbe es keine Instanz, die all diese Prozesse steuert und aufeinander abstimmt, herrschte Chaos.

Zudem – und das ist der zweite Grund, weshalb es eine innere Uhr geben muss – bieten die Rhythmen der Außenwelt dem Organismus keine verlässliche zeitliche Orientierung. Denn sie bedeuten ständige Veränderung.

Weil aber diese Achse geneigt ist und sich die Erde zugleich um die Sonne bewegt, verschiebt sich mit jedem Tag der Zeitpunkt von Sonnenaufgang und Abenddämmerung. Nur in den Gegenden um den Äquator sind alle Tage und Nächte ungefähr gleich lang.

Würde der Mensch immer dann ermüden, wenn es dunkelt, und erwachen, sobald es wieder hell wird, würde er im Dezember 16 Stunden täglich verdämmern – doppelt so viele wie im Durchschnitt biologisch nötig.

Umgekehrt wäre es unvorteilhaft, ausgerechnet in den hellen acht Stunden des Tages zu schlafen.

Die innere Uhr ist also notwendig, um die natürliche Schlafdauer zu begrenzen; sie muss ein Signal geben, sobald sieben oder acht Stunden abgelaufen sind und es Zeit ist, mithilfe von Hormonkaskaden den Körper zu wecken. Zugleich passt sie das Ruhebedürfnis eines Lebewesens dem äußeren Hell-Dunkel-Wechsel an und verlegt den Schlaf in die Nacht.

ALLE TEILE des körpereigenen Zeitsystems greifen so perfekt und selbstverständlich ineinander, dass Forscher lange bezweifelt haben, dass der Mensch überhaupt eine innere Uhr besitzt. Sie glaubten vielmehr, dass Schwankungen wie die des Pulses und der geistigen

## EXPERIMENTE IN DER ISOLATION WIR MENSCHEN BESITZEN

Zwar ist etwa die Länge eines Tages astronomisch gesehen nahezu konstant. Sie entspricht der Dauer, die der Erdball benötigt, um sich einmal um die eigene Achse zu drehen: 24 Stunden (mit wenigen Sekunden Abweichung).

Leistungsfähigkeit lediglich Reaktionen auf äußere Einflüsse seien.

Dabei war ja unübersehbar, dass es überall in der Natur Rhythmen gibt: Gewächse blühen zu bestimmten Tageszeiten, zahlreiche warmblütige Tiere



wie Fledermaus oder Igel halten Winterschlaf.

Im Jahr 1729 gelang einem Außensteiter der erste Nachweis, dass Pflanzen einen inneren Zeitmesser besitzen. Der französische Astronom Jean-Jacques

heit – doch auch dann bewegte sie zu den gleichen Tageszeiten ihre Blätter. Der Rhythmus konnte nicht vom Licht ausgelöst sein, offenbar wurde er von einem eigenen Mechanismus gesteuert.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelang es Biologen, solch einen inneren Taktgeber auch bei Tieren nachzuweisen. Sie zeigten, dass die Körpertemperatur bei Affen im Laufe eines Tages in einem bestimmten Rhythmus schwankt, auch dann, wenn die Außentemperatur und das Sonnenlicht konstant bleiben.

Versuche am Menschen waren dagegen schwieriger – man musste ihn dazu völlig von der Außenwelt isolieren. In den 1960er Jahren begannen deutsche Forscher mit einem heute berühmten Experiment der damals noch jungen Chronobiologie (der Wissenschaft von den inneren Uhren): Im bayerischen Andechs ließen sie zwei Apartments in einen Hügel bauen, eine

## Dirk Wegener, 42

### Techniker in der Kupferschmelze Aurubis

Wegener, der darauf achten muss, dass die Temperatur in den Schmelzöfen konstant bleibt, arbeitet in drei Schichten: von 6 bis 14 Uhr, 14 bis 22 Uhr oder 22 bis 6 Uhr. Das Einschlafen nach dem Nachtdienst falle ihm, sagt er, nach 20 Jahren im Schichtbetrieb immer schwerer. Deshalb muss Wegener dann die Rolläden zuziehen.

## BEWIESEN: EINE INNERE UHR

d'Ortous de Mairan studierte die Mimose, ein Gewächs, das seine Blätter nachts verschließt, morgens wieder entrollt und dem Sonnenlicht zuwendet.

De Mairan stellte ein Exemplar der Pflanze für einige Zeit in die Dunkel-

Art Bunker. Dort sollten Freiwillige mehrere Wochen verbringen.

Eine Eingangsschleuse, fensterlose Wände und ein Mantel aus Kupferdrähten schirmten sie von allen äußeren Zeitgebern ab. Die Versuchsteilnehmer konnten frei über ihren Tagesablauf entscheiden.

Das Resultat: Selbst im Bunker schließen die Probanden im Schnitt sieben bis acht Stunden und waren 17 bis 18 Stunden wach. Ihre Tage pendelten sich nach und nach auf einen 25-Stunden-Rhythmus ein. Über eine Sonde maßen die Forscher die Körpertempe-



ratur der Bunkerbewohner und analysierten in Urinproben den Gehalt von Stoffwechselprodukten und Hormonen. Auch deren Schwankungen folgten dem 25-Stunden-Muster.

Das war der Beweis: Auch in der Isolation unterliegt der menschliche Orga-

nismus einem Rhythmus, den die Wissenschaftler *circadian* (lat. für „ungefähr ein Tag“) nannten. Demnach verfügen nicht nur Pflanzen und Tiere, sondern auch Menschen über eine Uhr, die einen inneren Tag erzeugen kann, der etwa der Dauer einer Erdrotation entspricht.

Inzwischen weiß man, dass die unnatürliche Versuchssituation das Ergebnis minimal beeinflusst hatte. Im Schnitt ist die innere Uhr des Menschen auf einen Rhythmus von 24 Stunden und 20 Minuten getaktet. Damit war belegt: Es gibt ein geheimnisvolles Uhrwerk im



menschlichen Körper. Drei wichtige Fragen blieben jedoch unbeantwortet:

- Wo sitzt dieses innere Uhrsystem?
- Wie misst es die Zeit?
- Auf welche Weise passt es sich dem äußeren Tagesverlauf an und steuert den menschlichen Körper?

BEREITS IM JAHR 1972 lokalisierten Wissenschaftler den zentralen Taktgeber, den das Zeitsystem besitzen musste – bei einem Tier. Sie entdeckten im Zwischenhirn von Ratten feine Nervenfasern, die von den Augen ausgehen und sich bündeln, oberhalb der

Stelle, an der sich die beiden Sehnerven kreuzen.

Wegen seiner Lage über (lat. *supra*) dieser Kreuzung (*chiasma*) nannten die Forscher den Zellhaufen „Suprachiasmatischer Nucleus“ (SCN). Er musste die Verbindung sein zwischen der Außenwelt und dem inneren Uhrsystem.

Entfernte man ihn aus dem Gehirn einer Ratte, blieb das Tier zwar am Leben, verlor aber jede zeitliche Orientierung. Offenbar war ein Hauptbestandteil der inneren Uhr von Säugetieren gefunden: ein zentraler Rhythmusgeber.

Im Jahr 1990 gelang einem US-Forscher ein noch eindrucksvollerer Beweis: Er untersuchte Hamster, die in der Isolation einen konstanten 24-Stunden-Rhythmus aus Ruhe und Aktivität einhielten. Nur bei einigen Exemplaren war der Tageszyklus – offenbar durch einen fehlerhaften SCN – um zwei Stunden verkürzt.

## Dr. Oliver Born, 42

### Unfallchirurg, Marienkrankenhaus Hamburg

Wenn er Rufbereitschaftsdienst hat, arbeitet Oliver Born 80 bis 90 Stunden pro Woche. Dabei kann es vorkommen, dass er nach einer Tagschicht nachts zu einem Notfall in den OP gerufen wird, bis vier Uhr operiert, kurz schläft und dann um zehn Uhr zur nächsten Schicht antreten muss. Manchmal fühlt er sich dann so gerädert, dass ein anderer Arzt den Dienst für ihn übernimmt: »Ein Krankenhaus lebt von der Kollegialität.« Doch auch wenn er durcharbeiten muss: Sobald er den ersten Schnitt setzt, sei er hochkonzentriert, sagt Born.

Der Wissenschaftler verpflanzte daraufhin den SCN eines dieser Tiere in das Gehirn eines normalen Hamsters, dem zuvor der eigene Nervenknoten entfernt worden war. Danach lebte das operierte Tier ebenfalls nach dem 22-Stunden-Rhythmus.

Auch der Mensch besitzt das rätselhafte Neuronenbündel hinter den Augen, wie Forscher schon 1927 nachgewiesen haben – ohne damals freilich dessen Funktion entschlüsseln zu kön-

nen. Beim *Homo sapiens* ist der SCN aus einem Gewebe von rund 20000 Nervenzellen gebildet und etwa so groß wie ein Stecknadelkopf.

Mehrere Jahrzehnte nach der Entdeckung des SCN stellte sich heraus: Patienten, bei denen diese Hirnzone verletzt ist, können keinen regelmäßigen Schlaf-Wach-Rhythmus mehr einhalten.

Ein wichtiges Element des inneren Uhrsystems von Mensch und anderen Säugetieren war damit lokalisiert.

Aber es blieb noch immer unklar, ob es weitere gab und auf welche Weise das gesamte System eigentlich funktionierte. Und vor allem: wie der Organismus das Wunder vollbringt, vergehende Zeit zu messen, und selbstständig einen circadianen Rhythmus zu erzeugen, der ungefähr den 24 Stunden der Erdrotation entspricht.

**CHRONOBIOLOGEN** vermuteten schon lange, dass es dafür neben dem SCN im Gehirn einen besonderen Mechanismus in den einzelnen Körperzellen geben muss. Und Anfang der 1990er Jahre fanden sie einen solchen molekularen Mechanismus, der in jeder Zelle ein inneres Uhrwerk ticken lässt. Es ist eine ebenso einfache wie geniale Erfindung der Natur.

Das Prinzip dieser Zeitmessung ist eine Art Kreislauf, eine Rückkopplungsschleife. Man kann sich den Vorgang in

Zellplasma dient sie als Bauplan für die Bildung eines Eiweißmoleküls. Da ständig weitere Abschriften des Gens aus dem Kern gelangen, nimmt die Menge dieses Proteins kontinuierlich zu.

Ist aber eine bestimmte Konzentration erreicht, so wandert das Eiweißmolekül aus dem Plasma in den Zellkern. Dort blockiert es das Ablesen des Gens – also seines eigenen Bauplans.

Die Produktionskette ist damit unterbrochen, das Fließband steht still: Es gelangen keine weiteren Abschriften ins Plasma. Außerhalb des Zellkerns können keine Proteine mehr gebildet werden; die bereits vorhandenen werden nach und nach abgebaut.

Irgendwann aber ist ihre Anzahl derart gering, dass sie das Ablesen des Gens im Zellkern nicht mehr blockieren können. Damit beginnt der Zyklus von Neuem, das Fließband rollt wieder an.

Dieser Prozess ist so getaktet, dass bei einem Durchlauf jedes Mal ungefähr 24 Stunden vergehen: ein Erdtag.

Durch einen molekularen Mechanismus erzeugen Organismen in jeder ihrer Zellen also einen Rhythmus, der auf die Rotation der Erde abgestimmt ist – obwohl sie von dem Prinzip Zeit natürlich nichts „wissen“.

Mithilfe eines solchen Taktgebers reguliert etwa die Niere den Wassergehalt unseres Körpers, der jeden Tag im gleichen Maß schwankt.

„bändern“ stets mehrere Gene beteiligt, die ein komplexes Netz an Rückkopplungen erzeugen.

Gemeinsam sorgen sie dafür, dass in nahezu allen Zellen des menschlichen Körpers mindestens eine circadiane Uhr tickt: Billionen Zeitmesser, die von dem SCN im Hirn ungefähr im gleichen Takt gehalten werden müssen.

Der grundlegende Mechanismus, mit dem Pflanzen, Tiere und der Mensch einen inneren 24-Stunden-Tag erzeugen und so die vergehende Zeit messen, ist dabei immer gleich. Selbst bei Bakterien, den ältesten Organismen wurde er inzwischen nachgewiesen.

Wahrscheinlich ist dieses elementare Prinzip der inneren Uhr so alt wie das Leben selbst – mehr als 3,5 Milliarden Jahre. Denn die Fähigkeit, vergehende Zeit zu messen, bedeutete in einer von zyklischen Ereignissen wie Tag und Nacht, Gezeiten- und Jahreszeitenwechseln geprägten Umwelt von Beginn an einen Überlebensvorteil: Sie erlaubte nicht nur, sich dem Wandel der äußeren Bedingungen anzupassen, sondern auch, ihn vorherzusehen.

Von den primitiven Organismen vererbte sich das Prinzip auf höhere Lebewesen und verfeinerte sich im Laufe der Evolution immer weiter.

**DAMIT WAR** den Forschern neben dem Nervenknoten SCN ein weiteres, abermillionenfach vorhandenes Element der inneren Uhr bekannt. Doch wie wird das Netzwerk gesteuert?

Klar war: Das Gesamtsystem benötigt ein Korrektiv: Denn die circadianen Uhren in den Zellen gehen nicht immer ganz genau, die Natur leistet sich kleine Ungenauigkeiten; einzelne

## DAS AUGE VERBINDET DIE UHR MIT DER AUSSENWELT

den Zellen wie eine Fließbandproduktion in einer Fabrik vorstellen:

Ausgangspunkt ist ein Gen, das in jedem Zellkern des Menschen vorhanden ist. Dort wird es abgelesen und dabei in eine Kopie übersetzt.

Diese Abschrift wird aus dem Zellkern herausgeschleust; im umgebenden

Im menschlichen Erbgut sind inzwischen mehrere „Uhren-Gene“ bekannt. Der Berliner Chronobiologe Achim Kramer schätzt ihre Gesamtzahl auf etwa 25 – offenbar sind an den „Fließ-

## DER TAGESPLAN DES KÖRPERS

Ob Verdauung, Kraft, Gedächtnis, Abwehr oder Wachstum - die Leistungen unseres Organismus schwanken zyklisch

**A**n einem arbeitsfreien Tag erwachen die Deutschen im Durchschnitt um etwa 8.30 Uhr; dann haben sie rund acht Stunden geschlafen.

Schon ein bis zwei Stunden vorher bereitet das innere Uhrwerk den Körper auf das Erwachen vor: Der Suprachiasmatische Nucleus in unserem Hirn, die Schaltzentrale aller inneren Uhren (siehe Haupttext), setzt eine Signalkaskade in Gang. Botenstoffe wie etwa Cortisol schießen ins Blut. Dieses Stresshormon fördert die Durchblutung der Muskeln, damit der Schlafende sich später besser aufrichten kann.

Und sie regen die Leber an, Zucker auszuschütten. Ohne diese schnell verfügbare Energiequelle könnte der Organismus nach der langen Zeit ohne Nahrung beim Aufstehen einen Schwächeanfall erleiden. Zugleich sinkt der Spiegel des Schlafhormons Melatonin ab.

Mit dem Aufstehen steigt die Körpertemperatur von einem nächtlichen Minimum (rund 36,5 Grad Celsius) auf etwa 37 Grad an; das führt dazu, dass nun auch das Gehirn auf volle Aktivität schaltet. Puls, Atemfrequenz und Blutdruck steigen ebenfalls. Ein weiterer Botenstoff löst Hungergefühle aus und signalisiert dem Organismus, dass es Zeit ist, Nahrung zu sich zu nehmen.

Nach dem Frühstück erreicht die geistige Aufmerksamkeit ab zehn Uhr (im Durchschnitt) für Stunden ein konstant hohes Niveau - unser inneres Uhrwerk ist nun auf Leistung eingestellt. Auch das Kurzzeitgedächtnis funktioniert am Vormittag besonders gut; nur etwa alle 90 Minuten verlangt der Körper nach einer Ablenkung oder Pause.

Gegen Mittag meldet sich erneut ein Hungergefühl, die Leber produziert im Voraus Verdauungsenzyme. Nur Alkohol vermag sie um diese Zeit noch nicht in großen Mengen abzu-

bauen, das dafür erforderliche Enzym wird gewöhnlich erst gegen Abend hergestellt.

Nach dem Essen um 13 Uhr fällt die Aufmerksamkeitskurve gegen 14 Uhr stark ab - hier gibt unser Taktmesser einen Tiefpunkt vor. Der Organismus braucht jetzt, je nach Chronotyp von Mensch zu Mensch variierend, einen kurzen Erholungsschlaf. Auf den Straßen verursachen Autofahrer zu dieser Zeit besonders viele Unfälle.

Gegen 15 Uhr ist das Mittagstief überwunden, der Körper wieder zu anstrengender körperlicher oder geistiger Arbeit bereit. Am späten Nachmittag und frühen Abend erreichen Muskelkraft, Ausdauerfähigkeit und Kreislauf ein Tageshoch. Erst gegen 19 Uhr lässt unsere Leistungsfähigkeit allmählich nach.

Etwa drei Stunden später steigt im Blut der Spiegel des Hormons Melatonin wieder an; es beruhigt den Körper und signalisiert ihm, dass bald die Zeit zum Schlafen gekommen ist. Um 0.30 Uhr sinkt die Körpertemperatur deutlich ab - normalerweise der Zeitpunkt des Einschlafens. In Schlafzyklen von jeweils 90 Minuten erholt und regeneriert sich nun der Organismus (siehe Seite 30); Haut und Haare wachsen besonders stark nach, Immunzellen werden gebildet.

Gegen 4.30 Uhr erreicht die Körpertemperatur ihr Minimum, auch der Spiegel des Aktivitätshormons Cortisol ist am niedrigsten, die Müdigkeit daher nun nahezu unüberwindlich. Jetzt mit dem Auto auf der Straße unterwegs zu sein, wäre besonders gefährlich: Im Verhältnis zum Verkehrsaufkommen ereignen sich noch mehr Unfälle als am frühen Nachmittag.

Doch wenig später beginnt die Körperuhr schon wieder mit den Aufwachvorbereitungen. Der innere Tag beginnt von Neuem.

Ralf Berhorst

Zellen in der Leber sind manchmal auf einen Zyklus von 22,5 oder 26,5 Stunden getaktet. Die Billionen Zelluhren des Körpers gehen alle etwas unterschiedlich schnell. Mit jedem Tag würden sie weiter auseinanderlaufen - die Organe wären bald nicht mehr funktionsfähig.

Wie aber verhindert der Organismus, dass es zu einer Kakophonie der eigenen Zeitmesser kommt?

Und noch entscheidender: Wie synchronisiert er seine Innenzzeit mit dem

24-Stunden-Rhythmus der Erdrotation, sodass alle Körperfunktionen wie Schlafen und Wachen an den Hell-Dunkel-Wechsel der Außenwelt angepasst sind?

Hier kommt der Suprachiasmatische Nucleus (SCN) ins Spiel: jenes Neuronenbündel über der Sehnervkreuzung, das der Münchener Chronobiologe Till Roenneberg - angelehnt an die berühmte Uhr in London - den „Big Ben“ des inneren Zeitsystems nennt und das über feine Nervenfortsätze mit der Netzhaut der Augen verbunden ist.

Genau dort, bei der Netzhaut, liegt die Eingangspforte des gesamten Sys-

tems. Dort beginnt die Synchronisation mit der Außenzeit: Denn über die Netzhaut sind Lichtrezeptoren verteilt; sie registrieren, wie hell oder dunkel es draußen ist. Sogar viele Blinde verfügen über diese Rezeptoren und können, wenngleich unbewusst, mit ihnen wahrnehmen, ob es Tag oder Nacht ist.

Die Lichtrezeptoren melden dem SCN, wann der äußere Tag beginnt und endet. Über chemische Botenstoffe und Nervensignale teilt der „Big Ben“ dann den Billionen Uhren in den Zellen des gesamten Körpers mit, welche Stunde es geschlagen hat.



## Oliver Wendler, 46

### Maschinenführer, Druckerei in Itzehoe

Wenn Oliver Wendler bis 22 Uhr Spätschicht hat, steht er dennoch morgens um sechs auf, um mit den Kindern zu frühstücken. Er braucht mehrere Tage, um sich nach einem Schichtwechsel an die Umstellung zu gewöhnen. »Am schlimmsten ist es im Sommer, wenn die Nachbarn ein Grillfest feiern und ich zur Nachtschicht muss.«

Mittels biochemischer Signale kann er die Rückkopplungsschleife in den Zellen beschleunigen oder verlangsamen. Auf diese Weise bewirkt er, dass sie nicht zu weit auseinanderlaufen. Und er stimmt den circadianen Rhythmus der inneren Uhr auf den 24-Stunden-Takt der Erdrotation ab.

Wenn es beispielsweise dunkel wird, signalisiert er der Zirbeldrüse in der Gehirnmitte, das Hormon Melatonin auszuschütten. Jede Zelle erfährt so, dass es Nacht wird. Das Hormon bewirkt eine Absenkung der Körpertemperatur und

macht müde. Ist es draußen hell, unterbleibt seine Ausschüttung. Daher schläft der Mensch gewöhnlich nachts und ist tagsüber wach (siehe Kasten Seite 65).

Der SCN reguliert über Nervensignale auch den Blutdruck und die Aktivität aller Organe. Er dirigiert fast den gesamten Stoffwechsel. Zudem schaltet das innere Zeitsystem bis zu 40 Prozent unserer Gene an oder ab, schätzt Till Roenneberg.

Vor allem aber überwacht der SCN das Ticken der unzähligen Uhren in den einzelnen Zellen, in denen die Produktion von Proteinen rhythmisch auf- und abschwankt. Davon gesteuert, produziert beispielsweise die Bauchspeicheldrüse Verdauungsenzyme, welche die Nahrung zerlegen. Aus den Zellen erhält der SCN zudem Informationen über die Proteinmengen – als ständige Antwort.

Gäbe es in den Zellen keine circadianen Uhren, wäre der Körper nicht

steuerbar, er würde zusammenbrechen. Jeden Tag muss der SCN, das Korrektiv des Zeitsystems, sie zudem aufs Neue ausgleichen: Er stellt die Billionen Uhren des Körpers, die etwas zu schnell oder zu langsam laufen, durch Signale zurück oder vor, sodass sie sowohl untereinander als auch mit dem 24-Stunden-Tag der Außenwelt harmonieren.

Die kleinen Unstimmigkeiten haben gleichwohl Auswirkungen.

Diejenigen Menschen, deren Zelluhren aufgrund angeborener Unterschiede insgesamt etwas zu schnell gehen, sind immer etwas früher dran, was auch der SCN nicht beeinflussen kann: Sie werden morgens eher wach und sind schnell aufnahmefähig, ermüden abends aber früher. Bei Individuen mit einem etwas verlängerten Tageszyklus ist es genau umgekehrt.

Die Forscher sprechen von „Chronotypen“: von Früh- und Spättypen. Tat-

sätzlich aber gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Chronotypen.

Entscheidend für die Einteilung ist auch die Dauer der Nachtruhe. Einige Menschen kommen mit fünf Stunden Schlaf oder weniger aus, andere benötigen mehr als zehn Stunden.

Diese Unterschiede sind durch genetische Mutationen bedingt – Kurzschläfer etwa haben eine Veränderung in einem bestimmten Uhren-Gen.

Und je nachdem, wann Menschen zu Bett gehen, verschieben sich zudem die individuellen Hochs und Leistungstiefs im Tagesverlauf.

Insgesamt gibt es in Westeuropa mehr Spät- als Frühtypen.

**DAS INNERE ZEITSYSTEM** ist derart mächtig, dass es nahezu unmöglich ist, gegen den eigenen Chronotyp zu leben, ihn etwa durch feste Lebensgewohnheiten zu beeinflussen.

Es gibt nur einen einzigen äußeren Faktor, der Einfluss auf den Gang der inneren Uhr hat: Licht.

Das zeigt sich besonders exemplarisch beim Phänomen des Jetlags. Die Einteilung der Erde in 24 unterschiedliche Zeitzonen geht auf das Jahr 1884 zurück – auch dies eine willkürliche Konvention: Jahrtausendelang war die Ortszeit über den astronomischen Mittag definiert, jenen Zeitpunkt, an dem die Sonne den Längengrad eines Ortes passiert, im Zenit steht.

Eigentlich müsste jede Stadt, jedes Dorf eine eigene Zeit haben – im Zeitalter moderner Kommunikation und Verkehrsmittel undenkbar. Andererseits wäre es natürlich unpraktikabel, auf der gesamten Erdkugel dieselbe Uhrzeit gelten zu lassen. (Nur in China wurde dies politisch erzwungen; so gilt in dem Riesenreich, das sich über ein Sechstel des Erdumfangs erstreckt, Beijinger Ortszeit.)

Gleichsam als Kompromiss wurden die Zeitzonen geschaffen: Alle 15 Län-

gengrade in westliche oder östliche Richtung nimmt die Uhrzeit um eine Stunde ab oder zu (dabei werden jedoch auch politische und topografische Gegebenheiten berücksichtigt).

Tickte die innere Uhr völlig unflexibel, wäre es unmöglich, von Berlin nach New York zu fliegen und sich an die neue Ortszeit zu gewöhnen. Anfangs läuft die Uhr ja auch im gewohnten Takt weiter: Der Körper sehnt sich nach Schlaf, obwohl am neuen Ankunftsplatz Aktivität von ihm gefordert wird, und er hat Hunger, wenn er ruhen soll.

Doch das Tageslicht (das selbst an düsteren Wintertagen hell genug ist zur Synchronisation) signalisiert dem SCN im Gehirn früher oder später die veränderten Zeitverhältnisse. Nach und nach passt sich die innere Uhr an.

Pro überflogene Zeitzone – also für jede Stunde Zeitdifferenz – benötigt sie etwa einen Tag Umstellungszeit.

Dabei kann man sich einen besonderen Effekt zunutze machen: Der SCN reagiert je nach innerer Tageszeit unterschiedlich auf Licht. Morgens beschleunigt er den Gang der inneren biologischen Uhr, nachmittags und abends verlangsamt er ihn.

Besonders vorteilhaft ist es daher, bei Reisen in westliche Richtung, also etwa

Denn das Sonnenlicht ist ungleich stärker als elektrische Lampen, es ist der entscheidende Zeitgeber. Selbst in einem gut beleuchteten Zimmer herrschen allenfalls einige Hundert Lux (eine Maßeinheit für Lichtstärke), draußen sind es dagegen auch bei bedecktem Himmel im Sommer 10 000 und an wolkenfreien Tagen 100 000 Lux.

Wie macht voll das natürliche Licht auf die innere Uhr einwirkt, zeigt sich auch ohne Fernreisen: Da sich Deutschland von Ost nach West über neun Längengrade erstreckt, geht am östlichsten Punkt des Landes die Sonne 36 Minuten früher auf als im äußersten Westen. Und Statistiken zeigen, dass sich die Schlafmitte – der mittlere Zeitpunkt zwischen Einschlafen und Aufstehen, der Forschern dient, um Chronotypen möglichst genau zu beschreiben – tatsächlich mit jedem Längengrad von Ost nach West um exakt vier Minuten verschiebt, so wie es der Wanderung der Sonne entspricht.

In der zeitlichen Isolation wiederum, so wie in dem Andechser Bunkerexp-

## MORGENS BESCHLEUNIGT DAS TAGESLICHT DEN INNEREN TAKT

von Berlin nach New York, sich am Zielort vormittags (dem inneren Nachmittag) dem Tageslicht auszusetzen. Bei der Reise in Gegenrichtung nach Berlin ist es hingegen empfehlenswert, sich nachmittags viel in der Sonne aufzuhalten.

Nach einiger Zeit stimmen der innere Tag und die Außenzeit wieder überein. Künstliches Licht vermag dagegen nur wenig auszurichten – die innere Uhr lässt sich dadurch kaum überlisten.

periment, besteht keinerlei Notwendigkeit, sich mit der Außenzeit zu synchronisieren. Die Rhythmen des Körpers können frei laufen: Sie folgen ihrem eigenen circadianen Zyklus mit den individuell angeborenen Abweichungen von einigen Minuten oder gar Stunden.

Der SCN muss sie zwar weiterhin untereinander abstimmen – aber eben nicht mehr mit der äußeren Sonnenzeit.

Gleichwohl sind viele Menschen gezwungen, gegen die eigene innere Uhr zu leben: weil etwa Arbeitszeiten sie zu einem früheren Tagesbeginn zwingen, als es ihrem Chronotyp entspricht.

So stehen die Deutschen im Schnitt täglich um 6.23 Uhr auf – rund zwei Stunden eher als an ihren freien Tagen. Die Forscher sprechen deshalb von einem „sozialen Jetlag“.

Der Chronobiologe Till Roenneberg schätzt, dass bis zu 66 Prozent der Bevölkerung in Mitteleuropa von diesem sozialen Jetlag betroffen sind. „Mit dem Frühauftreten tun wir so, als ob wir für eine Firma arbeiten würden, die mehrere Zeitzonen östlich von unserem Wohnort entfernt liegt“, sagt Roenneberg.

Vor allem Schichtarbeiter sind gezwungen, gegen den Takt ihres Körpers zu leben – immerhin rund jeder fünfte Erwerbstätige in den Industrieländern. Sie leiden häufiger als der Durchschnitt an Schlafstörungen, Depressionen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes, Fettsucht und womöglich sogar an Krebs.

Zahlreiche Unfälle der vergangenen Jahrzehnte, so das Reaktorunglück von Tschernobyl und die Havarie des Öltankers „Exxon Valdez“, wurden von übermüdetem Personal ausgelöst, das am frühen Morgen arbeiten musste.

Forscher wie Till Roenneberg träumen von einem „Leben ohne Wecker“, von flexiblen Arbeitszeiten, die es jedem Chronotypen erlauben, erst dann ins Büro zu gehen, wenn Geist und Körper wirklich wach sind – in der stark vernetzten Arbeitswelt vermutlich eine schwer erfüllbare Utopie.

Vergebens weisen Experten auch immer wieder darauf hin, dass die Schulen morgens chronobiologisch gesehen viel zu früh mit dem Unterricht beginnen.

Aber sie versuchen neuerdings, ihre Erkenntnisse für die Medizin nutzbar zu machen. Längst ist bekannt, dass der Körper je nach Tageszeit unterschiedlich auf Medikamente reagiert.

So ließen sich durch die Wahl bestimmter Zeitpunkte und die Berücksichtigung des individuellen Chronotyps durch den Arzt Arzneidosierungen verringern und damit auch Nebenwirkungen eingrenzen.

**WAHRSCHEINLICH** reicht der Einfluss der inneren Uhr weit über den Tag hinaus.

Infektionskrankheiten etwa scheinen einem Sieben-Tage-Muster zu folgen, die weibliche Menstruation wiederholt sich im Mondmonatsabstand. Und Geburtenraten folgen einem saisonalen Rhythmus: Der Höhepunkt der

Sicher hingegen ist, dass es eine Chronobiologie der Lebensalter gibt: Der Tag von Neugeborenen ist in einen drei- oder vierstündigen Wechsel aus Schlafen und Wachsein gegliedert – offenbar muss die circadiane Uhr erst reifen. Fünfjährige leben dagegen bereits nach dem 24-Stunden-Rhythmus.

Teenager werden in der Pubertät und Adoleszenz vorübergehend zu späten Chronotypen, sie können lange aufbleiben und Tags darauf ausgiebig schlafen – vielleicht ein Relikt aus der Steinzeit, als es vorteilhaft war, lange und ausdauernd jagen zu können, auch in den Abendstunden und der Nacht. Womöglich vererbten besonders erfolgreiche Jäger, die damals im Alter heutiger Heranwachsender bereits Nachkommen versorgen mussten, diese Eigenschaft auf den modernen Menschen.

Mit etwa 20 Jahren endet das Nachteulen-Intermezzo.

Im Alter schließlich, vor allem jenseits des 70. Lebensjahres, verliert das innere Zeitsystem an Flexibilität und Kontur. Physiologisch gesehen ebnen sich die Unterschiede zwischen Tag und Nacht ein. Bei über 80-Jährigen schrumpft sogar der SCN, der zentrale Taktgeber im Gehirn.

Möglicherweise ist unser ganzes Leben von einem inneren Zeitprogramm getaktet – also die Entwicklung der befruchteten Eizelle zum Embryo, das Heranwachsen des Kindes, das Altern des Erwachsenen zum Greis. Wie Forscher vermuten, ist die maximale Lebensspanne des Menschen auf etwa 120 Jahre begrenzt (siehe Seite 118).

Ist die Zeit abgelaufen, scheint unsere biologische Uhr einfach stehen zu bleiben. □

**Dr. Ralf Berhorst**, 43, ist Autor in Berlin.  
**Heiner Müller-Elßner**, 52, lebt als Fotograf in Hamburg.  
Bildtexte: Jan Ludwig und Jochen Pioch.

**Literaturempfehlung:** Till Roenneberg, „Wie wir ticken“, Dumont; fundiert und mit anschaulichen Beispielen macht der Autor das Thema Chronobiologie für jeden Leser verständlich.

#### Memo: BIORHYTHMUS

- **Vermutlich ist das Prinzip** der inneren Zeitmessung so alt wie das Leben selbst.
- **Im Experiment ohne Tageslicht** pendelt sich die Aktivität auf einen 25-Stunden-Rhythmus ein.
- **Ein Neuronenbündel** aus 20 000 Nervenzellen synchronisiert das innere Uhrsystem.
- **Neugeborene** haben einen drei- bis vierstündigen Rhythmus – ihre innere Uhr muss erst reifen.
- **Geschätzte zwei Drittel** der Mitteleuropäer stehen zu früh auf und sind von „sozialem Jetlag“ betroffen.

Empfängnis liegt in allen Erdregionen um die Tagundnachtgleiche im jeweiligen Frühling – die monatliche Durchschnittstemperatur von zwölf Grad Celsius scheint dem förderlich zu sein.

Die biologische Uhr einiger Pflanzen und Tiere kann sogar Jahre messen. So besitzen Zugvögel offenbar eine Art inneren Kalender, der ihnen signalisiert, wann es Zeit ist, in wärmere Regionen zu fliegen – noch bevor es im Norden kalt wird. Doch bislang ist es Forschern nicht gelungen, die Funktionsweise dieser Kalender zu entschlüsseln.

# Der Hunger nach Erkenntnis

Weshalb das Fragen nie aufhört

Wäre Henning Engeln als Junge nicht jedes Mal beim Betreten eines Schiffes speiübel geworden, hätte er sein Leben wohl als Meeresforscher auf den Spuren der Haie verbracht. So aber beschränkte sich der Heranwachsende darauf, mehr als 20 Schildkröten im heimischen Garten zu halten – und später als Wissenschaftsjournalist zu arbeiten. Denn ab 1990 fand der promovierte Biologe in der GEO-Redaktion die ideale Möglichkeit, Erkenntnisgewinn und Brotgewinn zu vereinen: „Man lernt ständig Neues und wird dafür auch noch bezahlt“, brachte es einer seiner Kollegen auf den Punkt.

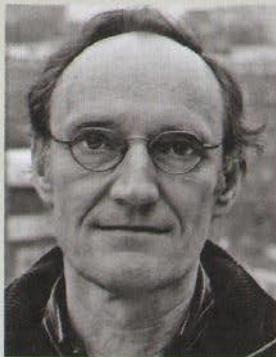
Die Arbeit eines Wissenschaftsjournalisten spielt sich dabei meist am Schreibtisch ab, die Abenteuer geschehen eher im Kopf: als Aha-Erlebnis bei der Recherche, als Stauen darüber, was die Welt alles an Phänomenen hervorgebracht hat, in

Gesprächen mit genialen, zuweilen skurrilen Forschern.

Doch es gibt auch andere Höhepunkte, etwa auf Reportagereisen: jene Tour 1998 zu den eingestürzten Resten einer Höhle bei Beijing etwa, in der einst, vor vielen Jahrhunderttausenden Urmenschen gelebt haben. Oder der Moment im Sommer 2000, als Engeln auf einem Berg in der marsähnlichen Landschaft der chilenischen Atacama-Wüste stand, neben sich die Kuppeln des größten Teleskops der Welt, über

sich die Sterne, so nah wie nie zuvor.

Es geht dem Vater dreier erwachsener Söhne darum, die Faszination der Natur und die wissenschaftlichen Erkenntnisse in Geschichten zu verdichten und seine Begeisterung auf den Leser zu übertragen. Doch eines ist ihm heute klarer denn je: Jede Antwort auf eine Frage offenbart neue Rätsel.



GEOkompakt-Redakteur  
Dr. Henning Engeln, 56

## BILDNACHWEIS/COPYRIGHT-VERMERKE

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

**Die Pille nach Maß:** Eric Tscherne, 78-83, Patrik Giardino/Corbis: 81; Gabriele Galimberti/Anzenberger: 82

**Krieg gegen die Mikroben:** Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 84/85; Eric Tscherne f. GEOkompakt: 87 o., 88 o., 90 o., 94 o., 96 o., 100 o.; Martin Künsting: 87 (5), 88-91, 94-97, 100/101; CDC/SPL/Agentur Focus: 92 l.; Scimat/Photo Researchers/Agentur Focus: 92 r.; Scharf/SPL/Agentur Focus: 93 l., 96 r.; Gschmeissner/SPL/Agentur Focus: 93 r.; Berger/SPL/Agentur Focus: 98 l.; NIBSC/SPL/Agentur Focus: 99 l.; CNR/SPL/Agentur Focus: 99 r.

**Ein Leben unter Druck:** Lars Tunbjörk/Agence VU/Laif: 104 o. l., 105 o. + u. l., m. r., 106; Bertrand Desprez/Agence VU/Laif: 104 u. l.; Jan Teh/Agence VU/Laif: 104 o. + u. r., 105 o. + u. r., 105 u. + u. r.; Rip Hopkins/Agence VU/Laif: 105 m. l.

**Die Kraft der Erneuerung:** Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 108-116

**Die Uhr des Lebens:** Photolibrary.com: 118/119; David Gifford/SPL/Agentur Focus: 118-129; Sophie Chivet/Agence VU/Laif: 121 (4); Photo Researchers/Agentur Focus: 122/123 (8); John/Plainpicture: 124; Nicholas Rigg/Getty Images: 125; Age/Mauritius Images: 126; Annet van der Voort/Anzenberger: 127

**Das Wunderwerk Mensch:** Passeka/SPL/Agentur Focus: 131; Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 132; DK Images: 133 l.; Eric Tscherne f. GEOkompakt: 133 r. (3); DK Images: 134-135; DK Images: 136-137; DK Images: 138-139; DK Images: 140-141; DK Images: 142

**Die Medizin von morgen:** Mark Thiessen/National Geographic Stock: 144/145, 147; Siemens AG: 148; Erik Viktor/Laif: 149 o.; Erich Schlegel/Corbis: 149 u.; Fred Guerlin/Reporters/Laif: 150; 2009 Augusto Brázio/Picturetank/Agentur Focus: 151

**Vorschau:** Martin Roemers/Laif: 154/155; Magda Indigo/Getty Images: 155 o.; George Steinmetz/Corbis: 155 m.; Jaeger-LeCoultre: 155 u.

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung. © GEO 2011, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

## GEOkompakt

Gruner + Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg. Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg, Telefon 040/37 03-0, Telefax 040/37 03 56 47, Telex 21 95 20. Internet: www.GEOkompakt.de

### CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

### KONZEPT DIESER AUSGABE

Jörn Auf dem Kampe

### ART DIRECTOR

Torsten Läker

### TEXTREDAKTION

Dr. Henning Engeln, Rainer Harf

### BILDREDAKTION

Lars Lindemann

Freie Mitarbeit: Katrin Kaldenberg, Katrin Trautner

### VERIFIKATION

Susanne Gilges, Bettina Süssmilch

Freie Mitarbeit: Regina Franke, Tobias Hanelemann, Kirsten Millahn, Dr. Arno Nehlsen

### MITARBEITER DIESER AUSGABE

Ines Possemeyer

Freie Mitarbeit: Dr. Ralf Berhorst, Jürgen Bischoff, Ute Eberle, Jan Ludwig, Heiner Müller-Elsner, Linus Müller-Elsner, Martin Paetsch, Jochen Pioch, Alexandra Rigos, Laura Rodewoldt, Johannes Schneider, Thomas Salter, Julia von Sengbusch, Bertram Weiß, Sebastian Witte

### ILLUSTRATION

Freie Mitarbeit: Jochen Stuhmann, Eric Tscherne, Tim Wehrmann

### CHEFS VOM DIENST

Dirk Krömer

Rainer Drost (Technik)

### SCHLÜSSERDAKTION

Ralf Schulte

REDAKTIONSSISTENZ: Ursula Arens, Sabine Stünkel

### HONORARE: Angelika Györfy

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

### HERAUSGEBER: Peter-Matthias Gaede

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gernot Brink, Thomas Lindner

GESAMTANZEIGENLEITUNG: Heiko Hager, G+J Media Sales

VERTRIEBSELEITUNG: Ulrike Klemmer, Deutscher Pressevertrieb

MARKETING: Antje Schlünder (Ltg.), Patricia Korrell

### HERSTELLUNG: Oliver Fehling

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: G+J Media Sales/Direct Sales

Sabine Plath, Tel. 040/37 03 38 89, Fax: 040/37 03 53 02; Anzeigen-

disposition: Anja Mordhorst, Tel. 040/37 03 23 38, Fax: 040/37 03 58 87

Es gilt die GEO-Sonderheft-Anzeigenpreisliste Nr. 7/2011

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages in Lesezirkeln geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg, Konto 032 2800, BLZ 200 700 00  
Heft-Preis: 8,50 Euro (mit DVD: 15,90 Euro)

ISBN 978-3-652-00023-9 (978-3-652-00049-9)

© 2011 Gruner + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: 4mat Media, Hamburg

Druck: Mohn Media MohnDruck GmbH, Gütersloh

Printed in Germany

## GEO-LESERSERVICE

### FRAGEN AN DIE REDAKTION

Tel.: 040/37 03 20 73 Fax: 040/37 03 56 48, E-Mail: briefe@geo.de

### ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

### KUNDENSERVICE UND BESTELLUNGEN

Anschrift:  
GEO-Kundenservice  
20080 Hamburg

pers. erreichbar:  
Mo.-Fr. 7.30 bis 20.00 Uhr  
Sa. 9.00 bis 14.00 Uhr

E-Mail: geo-service@gui.de  
Tel. innerhalb Deutschlands: 01805/86180 00\*

Tel. außerhalb Deutschlands: +49/1805/86100 00

Telex: +49/1805/86180 02

24-Std.-Online-Kundenservice: www.meinabo.de/service

Preis Jahresabonnement 31,00 € (D) / 35,80 € (A) / 64,00 CHF (CH)

Preise für weitere Länder auf Anfrage erhältlich

### BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

### KUNDENSERVICE UND BESTELLUNGEN

Anschrift: GEO-Versand-Service, Werner-Haas-Straße 5, 74172 Neckarsulm

Tel.: +49/1805/06 20 00\*

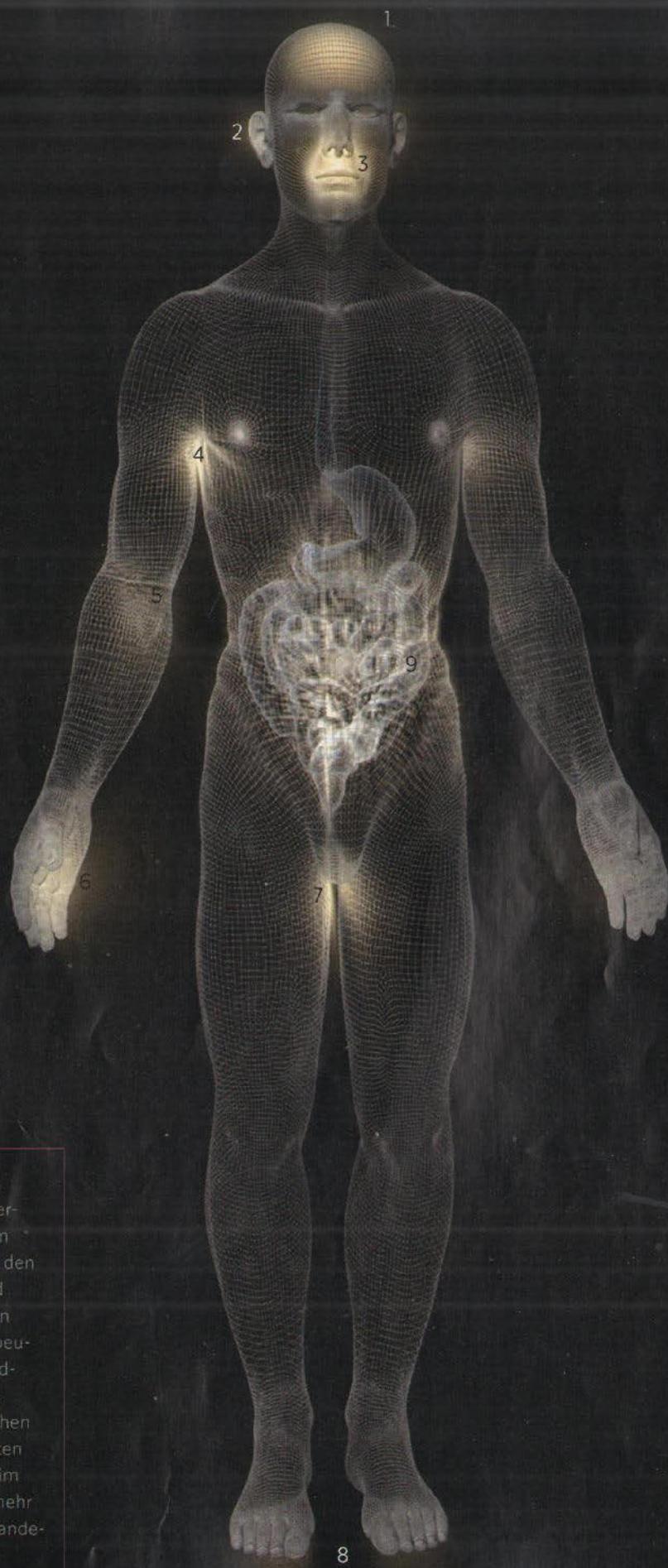
Fax: +49/1805/08 20 00\*

E-Mail: service@gui.de

14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz. Mobilfunkpreis max. 42 Cent/Min.

# Die heimlichen SCHÄLER

Von Geburt an sind wir ein Biotop, dessen Bewohner sich nach und nach vermehren: Jeder Mensch bietet bis zu 100 Billionen Mikroben Nahrung, Wärme und Schutz. Im Gegenzug helfen uns die Einzeller, Nährstoffe aufzunehmen, versorgen uns mit lebenswichtigen Stoffen und senden Signale, wenn der Körper aus dem Gleichgewicht gerät. Kurz: Die winzigen Lebewesen tun uns gut



Die Untermieter des Menschen leben fast überall auf der Haut, vor allem aber auf dem Kopf (1), in den Ohren (2), in Nasen- und Mundhöhle (3), unter den Achseln (4), in den Armebeugen (5) und auf den Handflächen (6) sowie an den Genitalien (7) und zwischen den Zehen (8). Die meisten Einzeller aber existieren im Darm (9): Dort siedeln mehr Lebewesen als in jedem anderen Ökosystem der Erde

# D

er Mensch ist mehr als nur er selbst. Mehr als ein komplexer Organismus aus Zellen, Geweben und Organen. Mehr als das höchstentwickelte Lebewesen, das die Evolution

in Jahrtausenden hervorgebracht hat. Der Mensch ist auch ein Ökosystem, ein vielfältiger Lebensraum, mal karg und trocken wie die Dünen der Sahara, mal schwül und wimmelnd wie der tropische Regenwald – divers, oft extrem und doch immer: besiedelt.

Etwa 100 Billionen Bakterien leben auf und in jedem erwachsenen *Homo sapiens*. Das sind bis zu zehnmal so viele Organismen, wie der Körper an eigenen Zellen besitzt. In ihrer gewaltigen Vielzahl summieren sich die winzigen Einzeller zu einem Gesamtgewicht von drei Kilogramm (ein Bakterium ist in der Regel einen Tausendstel Millimeter dick).

Drei Kilogramm Lebewesen, die streng genommen kein Bestandteil des menschlichen Organismus sind – und die dennoch zu uns gehören. Und uns guttun.

Denn die meisten Bakterien, die wir beherbergen, sind nicht schädlich, nicht bösartig und nicht krankmachend – sie sind vielmehr ausgesprochen nützlich.

Sie helfen uns, Nährstoffe aufzunehmen, und verschaffen uns so Energie. Sie versorgen uns mit lebenswichtigen Vitaminen. Sie beschützen uns vor jenen Formen bakteriellen Lebens, die uns gefährlich werden können. Sie bilden komplexe Gemeinschaften, kommunizieren miteinander. Und sie schicken uns Signale, alarmieren uns beispielsweise, wann immer unser Organismus aus dem Gleichgewicht zu geraten droht.

Im Gegenzug spendet der menschliche Körper ihnen Wärme, bietet ihnen Nahrung und Schutz. Er ist ihre Lebensgrundlage – ihr Biotop.

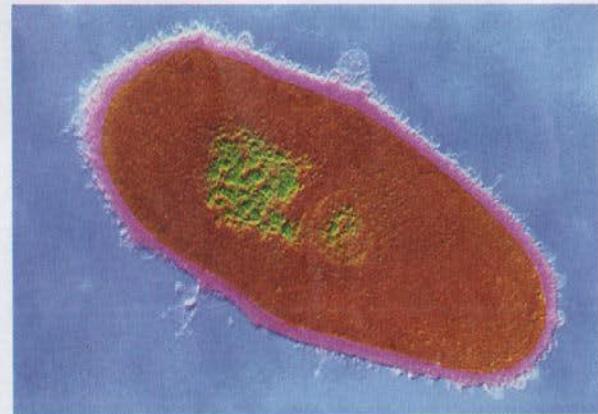
Und wie ein Korallenriff nur durch das Zusammenspiel seiner Nesseltiere, Algen und Schwämme beste-

hen kann, wie ein Waldboden nur wegen seiner laubfressenden Kleinstlebewesen fruchtbar bleibt, so ist auch der Mensch auf seine Bewohner angewiesen.

Von ihnen hängt sein Überleben ab; ohne sie kann er nicht existieren.

**NIRGENDWO WIRD** diese Abhängigkeit so deutlich wie im Verdauungstrakt. Bis zu 1000 unterschiedliche Bakterienarten leben allein im Darm; dieser mit sechs bis acht Meter Länge und einer Fläche von mehr als 200 Quadratmetern größte zusammenhängende Lebensraum des menschlichen Körpers beherbergt den Großteil der rund 100 Billionen Bakterien in unserem Organismus – und ist damit dichter besiedelt als jedes andere bekannte Ökosystem der Erde.

Im Darm ist es warm und feucht, hier herrscht ein Klima, das Bakterien vortrefflich gedeihen lässt. Zudem profitieren sie von dem ständigen Nahrungzufluss, denn regelmäßig kommen im Verdauungstrakt Nährstoffe an – darunter solche, die der Mensch ohne die Hilfe der Mikroben überhaupt nicht verwerten könnte.



Corynebakterien wandeln das Fett von Talgdrüsen zu Fettsäuren und erhalten so den Säureschutzmantel

Zwar verfügt der menschliche Organismus in der Regel über die passenden Werkzeuge, um die Nahrung selbst zu verarbeiten. Bestimmte Eiweiße, die Enzyme, zerlegen die Kost nach und nach in ihre Bestandteile, aus denen der Körper dann Energie gewinnen kann.

Insgesamt  
rund **drei**  
**Kilogramm**  
wiegen alle  
Begleiter des  
Menschen

72 GEOkompakt



Die Mundhöhle zählt neben dem Darm zu den Bakterien-Oasen des Körpers: Zwischen den obersten Hautzellen der Zunge (rot) siedeln sich zuweilen in dichten Teppichen Mikroben (gelb) an und können Mundgeruch verursachen

Doch manche Moleküle in unserer Nahrung sind von den körpereigenen Verdauungshelfern nicht zu spalten, zum Beispiel besonders komplex aufgebaute Zuckerstoffe. Bleiben sie aber unzerstört, sind sie für unseren Körper weitgehend nutzlos.

Deshalb ist es für den Menschen von großem Vorteil, dass spezielle, im Dickdarm lebende Bakterien in der Lage sind, die Moleküle zu zerlegen – in verdaulichen Traubenzucker, mit dem sie sowohl den Wirt als auch sich versorgen.

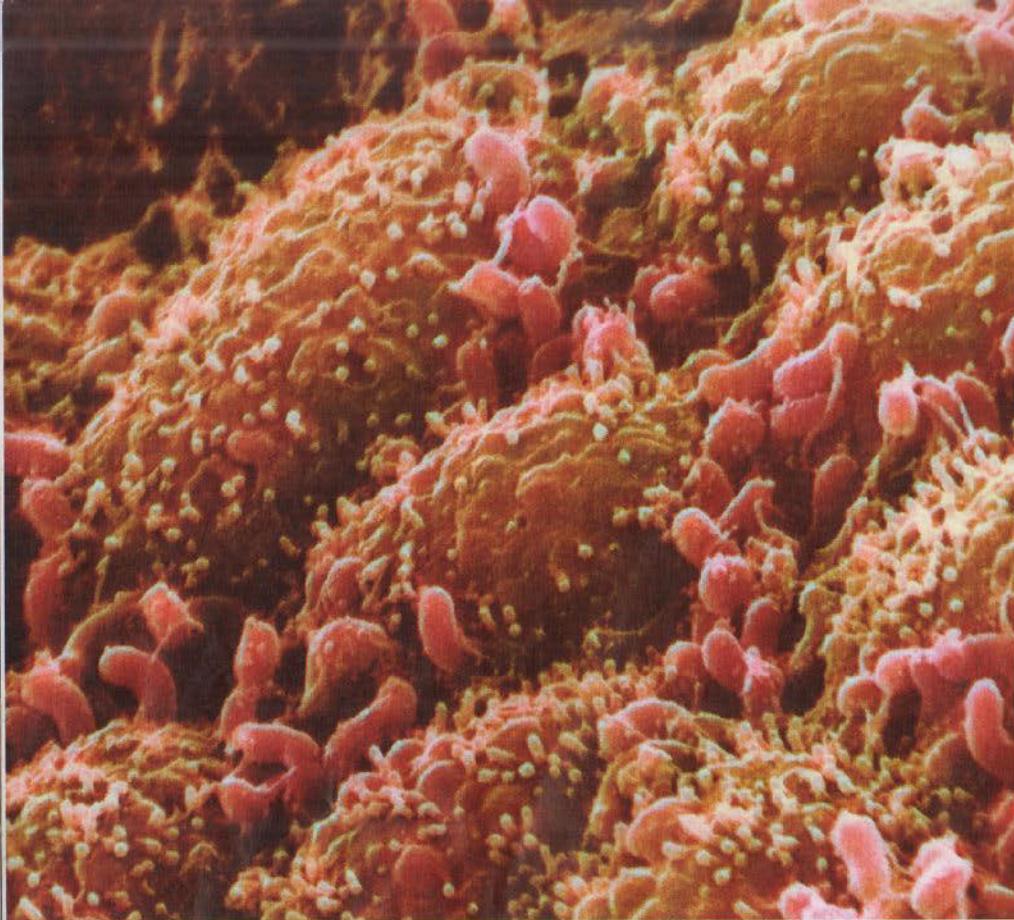
Die Lebensweise dieser Darmbakterien entspricht jenem grundsätzlichen Prinzip, das sich in der Koexis-

tenz von Mensch und Mikrobe billionenfach wiederholt: dem Prinzip vom Geben und Nehmen.

Denn wie so häufig in der Natur – sei es bei Putzefischen, die Haie von ihren Hautparasiten befreien, sei es bei Blütenpflanzen, die von Nektar suchenden Insekten bestäubt werden – ist auch das Zusammenleben des Vielzellers *Homo sapiens* mit dem Einzeller Bakterium vor allem eine Symbiose.

Ein gutes Geschäft auf Gegenseitigkeit.

So liefern weitere Bakterienarten, die im Dickdarm siedeln, dem Menschen eine seiner ergiebigsten Energiequellen: Sie bauen unverdauliche Zuckermoleküle



Erst mithilfe von Bakterien (rot), die sich auf den Zellen der Darmwand (braun) ansiedeln, kann der Körper etliche Substanzen verwerten

radikal um und machen dabei aus langen Zuckerketten kurze Fettsäuren. Dieses Endprodukt nehmen wiederum die Darmzellen des Körpers auf und decken so 70 Prozent unseres Energiebedarfs.

Darüber hinaus hinterlassen viele der mikroskopisch kleinen Lebewesen Abfallprodukte. Für die Bakterien sind diese Reste, die bei ihrem Stoffwechsel entstehen, Müll; für den Menschen aber sind sie lebenswichtig.

Denn unter den bakteriellen Ausscheidungen befinden sich wichtige Stoffe wie Vitamin K, das der Mensch zur Blutgerinnung braucht; oder Folsäure, mit deren Hilfe sich die menschlichen Zellen regenerieren; oder Biotin, ein B-Vitamin, dessen Mangel müde oder sogar depressiv machen kann.

Als Gegenleistung für solch wertvolle Substanzen bietet der Darm den Mikroben einen warmen, nährstoffreichen und beständigen Unterschlupf.

**AUCH IN ANDEREN REGIONEN** des Körpers leben winzige Einzeller, zerkleinern beispielsweise in der Mundhöhle hängen gebliebene Speisereste oder ernähren sich in den Nasenhöhlen und Ohrmuscheln von Hinterlassenschaften der Talgdrüsen.

Vor allem die Haut bietet den Bakterien unterschiedliche Ökosysteme. Und wenn der Darm so etwas wie eine Oase des Biotops Mensch ist, dann entsprechen große Teile der Körperoberfläche eher einer Wüste.

Dort herrscht eine Trockenheit, die für die meisten Bakterien nur schwer zu ertragen ist; so kommt es, dass auf manchen großflächigen Bereichen wie dem Rücken nur etwa 1000 Mikroben pro Quadratzentimeter leben.

Viele dieser Bakterien sind größer und widerstandsfähiger als ihre Artverwandten im Darm; sie haben dicke, mehrschichtige Zellwände und können das extreme Klima auf der Haut besser verkraften.

Doch selbst in dieser Wüste gibt es Wasserstellen: die Armbeuge etwa, die Ohren, Achseln, die Kopfhaut, dazu die Zwischenräume der Zehen, die Genitalien, Handflächen und das Gesicht.

Diese Zonen bieten den Einzellern mehr Feuchtigkeit und Nährstoffe, sie beherbergen bis zu einer Million Bakterien pro Quadratzentimeter. Und sie führen dazu, dass auf den durchschnittlich zwei Quadratmetern Haut des Körpers eines Erwachsenen gut sechs Milliarden Mikroben gedeihen – fast so viele, wie Menschen auf der Erde leben.

So siedeln viele Mikrobenarten in der Nähe von Hautdrüsen und ernähren sich von den Absonderungen dieser winzigen Körperöffnungen. Andere Bakterien vertilgen jene Einzeller, die mit dem Stuhl ausgeschieden werden, aber am Körperausgang haften bleiben. So profitieren sie vom Lebensraum Mensch und agieren gleichzeitig wie eine Art Hygienepolizei.

Auch die Mikroben auf der Haut sind Teil einer Symbiose. Und sie sorgen nicht nur für Sauberkeit; gemeinsam mit den Darmbakterien liefern sie dem Menschen darüber hinaus eine noch weitaus wichtigere Gegenleistung.

Denn die winzigen Lebewesen besetzen all die Plätze, die sonst ihre gefährlichen Verwandten einnehmen würden.

Solche Viren und fremdartigen Bakterien landen unentwegt auf dem Menschen: aus der Luft, von Türklinken oder Computertastaturen. Die meisten der Neuankömmlinge können sich jedoch nicht dauerhaft halten, weil die alteingesessenen Mikroben ihren Lebensraum nicht kampflos aufgeben.

Viele von ihnen fabrizieren beispielsweise Giftstoffe, die für ihre Konkurrenten tödlich sind, für sie selber aber ungefährlich. Oder sie sondern Substanzen ab, die

wie Antibiotika wirken und viele Krankheitserreger vernichten.

Allerdings gibt es auch weite Areale des Lebensraums Mensch, die den Mikroben verschlossen bleiben – sozusagen die Hochsicherheitstrakte des Körpers, in denen der menschliche Organismus keine Eindringlinge duldet: sein Innerstes, die Leber etwa, die Lunge oder das Herz.

Sie bilden das eigentliche Zentrum des Körpers – jenen Bereich, den der Mensch nicht mit seinen Bewohnern teilt. (Anders der Verdauungstrakt: Denn obwohl er scheinbar zum Inneren des Körpers gehört, ist er über den Mund und den Anus doch mit der Außenwelt verbunden; rein biologisch ist er eine nach innen verlagerte Oberfläche, durch Schleimhäute und Darmwand vom Rest des Körpers getrennt.)

**EVOLUTIONÄR BETRACHTET**, bot sich die Symbiose zwischen Mensch und Mikrobe geradezu an.

Denn Bakterien gehörten zu den ersten Bewohnern der Erde, sie entstanden vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren – und sie überlebten überall, egal wie unwirtlich der Lebensraum auch sein mochte, ob an heißen Quellen am Meeresgrund oder in der beißenden Kälte verester Polkappen.

Als sich dann vor etwa 750 Millionen Jahren die Grundlage für komplexe Organismen entwickelte, ergab sich für die Einzeller die Chance, neue Lebensräume mit ergiebigen Nahrungsquellen zu erschließen – und sehr viel später auch jenes Biotop zu besiedeln, das sich nach und nach erfolgreich über die ganze Welt ausbreitete: den Menschen.

Und so erscheint es fast folgerichtig, dass die Evolution einen Mechanismus entwickelt hat, der uns vom



Einige Bakterien (orange- und lilafarben) leben bevorzugt dort, wo es warm und feucht ist, etwa zwischen den Zehen. Vermehren sie sich, entsteht Fußgeruch

ersten Moment an auf unsere Siedler vorbereitet: Denn schon bei der Geburt drückt der Kopf des Babys eine kleine Menge Stuhl aus dem Mastdarm der Mutter; diese Darmbakterien, die so im Gesicht des Neugeborenen landen, sind eine Art Impfung mit schützenden Mikroben (deshalb haben Kinder, die per Kaiserschnitt auf die Welt geholt werden, anfangs eine deutlich weniger schlagkräftige Bakterienflora).

Durch den Trick bei der natürlichen Geburt ist der Säugling von der ersten Sekunde an gut gefeit gegen die bakteriellen Krankheitserreger, die in der Luft, auf der Haut der Mutter, in deren Milch lauern.

Doch nicht nur der sofortige Kontakt mit Darmbakterien an sich ist von Bedeutung; es muss auch die *individuelle Darmflora* der Mutter sein, die dem Baby seine mikrobielle Taufe beschert.

Denn das Immunsystem des Neugeborenen ist auf genau diesen Bakterienmix eingestellt – und zwar durch Antikörper (bestimmte Eiweißmoleküle des Immunsystems), die es zuvor über die Plazenta der Mutter aufgenommen hat. Nur deshalb kommt es nicht zu einer Abwehrreaktion durch die Körperverteidigung.

Anders als bei unseren Genen, die jeder zu gleichen Teilen von beiden Eltern erhält, dominiert also die Mutter das mikrobielle Erbe deutlich.

Und die Bakterien, die sie ihrem Nachwuchs mitgibt, stecken auf dem Säugling sofort ihre Areale ab. Sie

**Schon bei der Geburt erhält der Mensch lebenswichtige Mikroben von der Mutter**

schließen sich in den neuen Lebensräumen zu Gemeinschaften zusammen, reifen beispielsweise im Darm zu dünnen Schleimschichten heran.

Diese bakteriellen Netzwerke brauchen zwei bis drei Jahre, bis sie vollständig entwickelt sind. Innerhalb dieser Gemeinschaften tauschen die Bakterien über biochemische Botenstoffe ständig Informationen aus, machen sich auf diese Weise überlebensfähiger im mikrobiellen Konkurrenzkampf.

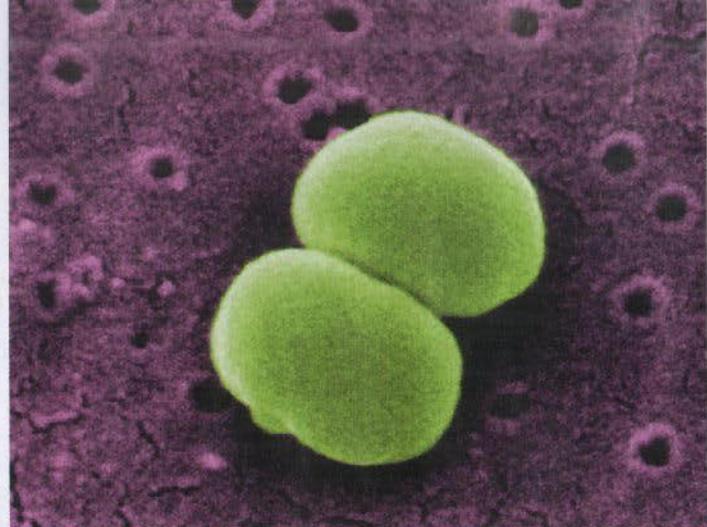
Die Kommunikationsfähigkeit der winzigen Einzeller beschränkt sich aber nicht nur auf ihresgleichen: Die Mikroben treten auch mit ihrem Wirt in Kontakt, dem Menschen. Sie schicken biochemische Botschaften an die Gewebe, auf denen sie siedeln, und machen so auf ihre Bedürfnisse aufmerksam.

So haben beispielsweise schwedische und amerikanische Forscher nachgewiesen, dass ein bestimmtes Darmbakterium die Zellen des Verdauungstraktes beeinflusst: Seine Botenstoffe regen das Gewebe zur Produktion jener Substanzen an, von denen sich die Mikrobe ernährt.

Und mehr noch: Unsere Besiedler können ihre Signale offenbar auch in Areale des Körpers senden, die weit von ihrem unmittelbaren Lebensraum entfernt sind. So finden sich im Urin und im Blut zahlreiche chemische Substanzen, die von Darmbakterien hergestellt werden.

Noch können Forscher die genaue Bedeutung dieser mikrobiellen Botschaften nicht bis ins Detail entschlüsseln. Doch sie vermuten, dass die Nachrichten der Mikroben an den Körper essenziell für unseren Organismus sind.

Und vielleicht verändern die Winzlinge mit ihrer besonderen Art der Kommunikation sogar die biochemischen Abläufe in unserem Gehirn: Nach einer wissenschaftlichen These könnte eine aus dem Gleichgewicht geratene Darmflora zu



In besonders feuchten Bereichen der Haut, etwa in den Achselhöhlen, gedeihen auf wenigen Quadratzentimetern Millionen von Mikroben, darunter das Bakterium *Staphylococcus epidermidis*

neurologischen Störungen wie etwa der Aufmerksamkeits-Hyperaktivitätsstörung führen.

Nach diesen Erkenntnissen über die enge Verflechtung zwischen den Einzellern und dem Menschen ist es nur

folgerichtig, dass sich etliche Wissenschaftler allmählich von der Lehrmeinung verabschieden, der *Homo sapiens* sei ein biologisches Individuum.

Sie definieren unseren Körper stattdessen als eine Gemeinschaft, die nur in der Vielfalt, im Kollektiv aus Abermillionen Wesen funktioniert.

Der Mensch: ein Superorganismus.

**WIE GROSS DER EINFLUSS** der Bakterien in unserem Organismus ist, belegen Laborexperimente. Denn nach jüngsten Erkenntnissen entscheidet die individuelle Zusammensetzung der Darmflora sogar mit über das Körperegewicht.

Dazu untersuchte der amerikanische Mikrobiologe Jeffrey Gordon den Stuhl von zwölf fettleibigen Landsleuten. Ihm fiel auf, dass bei den Probanden Bakterienarten aus dem Stamm Firmicutes ungewöhnlich häufig vorkamen (Firmicutes sind jene Bakterien, die dem Menschen helfen, die für ihn unverdaulichen Zuckermoleküle zu verwerten).

In einem Versuch übertrug Gordon deshalb Proben von Darmbakterien fetsüchtiger Mäuse in den Verdauungsapparat normalgewichtiger Artgenossen – und die schlanken Nager wurden daraufhin tatsächlich immer fettleibiger. Auch bei dicken und dünnen Zwillingen, ein- wie zweieiigen, zeigten Untersuchungen, dass offenbar die verschiedenen Darmflore mitverantwortlich dafür sind, dass sie unterschiedlich viele Fettreserven anlegen.

Doch die dick machenden Mikroben sind kein unausweichliches Schicksal: Als sich die von Jeffrey Gordon untersuchten Amerikaner gesünder ernährten und abnahmen, veränderte sich auch ihre Darmflora: Der Anteil der Firmicutes-Bakterien verringerte sich.

Denn so wie die Bakterien ihr Biotop beeinflussen, so kann auch der Mensch auf seine mikrobielle Flora einwirken; ändert er seinen Lebensstil oder seine Er-

Vermutlich verändern die Einzeller auch die Abläufe in unserem

**GEHIRN**

nahrung, wandelt sich damit die Zusammensetzung seiner Mikroben.

Aber auch die Einzeller selbst senden eindrückliche Signale, wenn es Zeit für eine Veränderung ist. Etwa wenn sich im Mund Bakterien, vor allem die anaeroben (also Einzeller, die zum Leben keinen Sauerstoff benötigen), zu stark vermehren.

Mit seiner Feuchtigkeit, den vielen Nischen und Zwischenräumen ist der Mundraum neben dem Darm die zweite Oase im Biotop Mensch. Täglich wachsen zwischen Lippen und Rachen rund 100 Milliarden Mikroben heran, und ohne gründliche Hygiene bilden sich schnell ausgedehnte Bakterienteppiche.

Besonders die anaeroben Bazillen verpesten dann den Atem des Betreffenden. Sie spalten Eiweißmoleküle, wobei unter anderem schwefelhaltige Gase freierwerden. Die Folge ist Mundgeruch – Stoffwechselprodukt und Signal unserer Bakterien.

Wie alle Menschengerüche.

Denn auch die Gase, die dem Darm entweichen, werden durch die Bakterien olfaktorisch geprägt. Zwar bestehen die Blähungen zu 99 Prozent aus geruchlosem Sauerstoff und Stickstoff, aber einige der Substanzen, die Dickdarmbakterien beim Spalten bestimmter Nährstoffe produzieren, sorgen in dem restlichen Prozent für den übeln Gestank der Darmwinde. Enthält die Nahrung zu viele unverdauliche Zuckermoleküle, nimmt die Zahl dieser Bakterien zu – und mit ihr die Häufigkeit und Geruchsintensität der Blähungen.

**DOCH DIE DURCH** Mikroben verursachten Gerüche haben keineswegs immer nur unangenehme Effekte. Ganz im Gegenteil tragen sie vermutlich auch zu unserer sexuellen Anziehungskraft bei. Denn die Pheromone (sexuelle Botenstoffe, die bestimmte Duftdrüsen ausscheiden) gewinnen ihren Geruch überhaupt erst, wenn sie in Kontakt mit Hautbakterien kommen. Nur dann können sie wirken – und unter anderem mit dafür sorgen, dass sich zwei Menschen attraktiv finden.

Bakterien tragen demnach dazu bei, dass wir uns fortpflanzen.

Vollkommen ohne Mikroben wäre *Homo sapiens* aber nicht nur ärmer an sexuellen Reizen – er wäre ein durch und durch elendes, todgeweihtes Geschöpf: So hat sich bei Versuchen herausgestellt, dass Tiere, die im Labor unter sterilen Bedingungen aufgezogen werden, unterentwickelte Lymphknoten haben, sodass ihre Körper – in normaler Umgebung – kaum noch entgiftet würden; ihre Milz, ein wichtiges Organ für die Infektionsabwehr, ist verkleinert; zudem reifen bestimmte Immunzellen nicht richtig heran.

Das bedeutet, dass der Mensch nur mit einer vollständigen Mikrobenflora in der Lage ist, Infektionen abzuwehren. Denn die Bakterien trainieren das Immunsystem, regen es durch ihre pure Präsenz und ihre Stoffwechselprodukte zur Bildung von Antikörpern an. Gleichzeitig führt die permanente Anwesenheit der Einzeller dazu, dass das Immunsystem bestimmte Mikroben toleriert – eine Voraussetzung dafür, dass der Mensch überhaupt Nahrung zu sich nehmen kann, die ja stets voller fremder Kleinstwesen ist.

Erst seine 100 Billionen Bakterien also machen den Menschen überlebensfähig. Die winzigen Organismen beschaffen ihrem Biotop Energie, versorgen es mit Vitaminen und beschützen es vor Feinden.

**Kurz:** Sie erhalten seine Gesundheit. Aber nur so lange, wie das Kollektiv von Mensch und Mikrobe im Gleichgewicht ist.

Wird die Balance gestört, verändert sich, so vermuten Wissenschaftler, auch die Kommunikation zwischen dem Wirt und seinen Besiedlern und bricht im Extremfall sogar vollkommen zusammen.

Dann aber bröckelt unser bakterieller Schutzschild; dann haben potenziell lebensgefährliche Mikroben, wie etwa Cholera-Erreger, eine größere Chance, sich durchzusetzen und den Körper mit Krankheiten zu überziehen.

Und dann kann es dazu kommen, dass ein 0,000000000001 Gramm leichtes Bakterium einen 100 Kilogramm schweren Menschen umbringt.

**Johannes Schneider.** 29, ist Journalist in Hamburg.



Medikamente der Zukunft:  
Bald schon könnte die DNS jedes Patienten erfasst werden, um maßgeschneiderte Arzneien zu entwickeln

**K**ate Robbins aus dem

US-Bundesstaat Massachusetts lebte vegetarisch, hatte nie geraucht und war erst 44 Jahre alt, als Ärzte bei ihr Lungenkrebs diagnostizierten. Der Tumor hatte bereits gestreut und Metastasen in ihrem Gehirn gebildet. Und obwohl die Mediziner die Geschwulste sofort heraus schnitten, die Patientin bestrahlten und mit Chemotherapeutika behandelten, wuchs der Krebs weiter.

Kurz darauf befiehlt er Bauchspeicheldrüse und Leber. Kate begann, ein „Todesjournal“ zu führen, in dem sie aufschrieb, was ihre Familie erlebte – als Erinnerung für ihre beiden Kinder. Zugleich schluckte sie in einem letzten Versuch einmal täglich ein neues Medikament, das noch im Experimentierstadium war.

Und genau diese Pille – die Signalwege in den Tumor blockierte, die der Krebs brauchte, um zu wachsen – wirkte, was die Ärzte zuvor nicht geschafft hatten: Sie ließ die Tumore schrumpfen. Innerhalb weniger Monate war Kate Robbins so gut wie krebsfrei. Sie ist es bis heute. Und noch immer nimmt sie das Mittel ein.

PERSONLICHES MEDIKAMENT FÜR Michael Scheper. RICHTUNG: GENETISCH ABGESTIMMT.

**K**ate Robbins aus dem  
US-Bundesstaat Massachusetts lebte vegetarisch, hatte nie geraucht und war erst 44 Jahre alt, als Ärzte bei ihr Lungenkrebs diagnostizierten. Der Tumor hatte bereits gestreut und Metastasen in ihrem Gehirn gebildet. Und obwohl die Mediziner die Geschwulste sofort heraus schnitten, die Patientin bestrahlten und mit Chemotherapeutika behandelten, wuchs der Krebs weiter.

Kurz darauf befiehlt er Bauchspeicheldrüse und Leber. Kate begann, ein „Todesjournal“ zu führen, in dem sie aufschrieb, was ihre Familie erlebte – als Erinnerung für ihre beiden Kinder. Zugleich schluckte sie in einem letzten Versuch einmal täglich ein neues Medikament, das noch im Experimentierstadium war.

Und genau diese Pille – die Signalwege in den Tumor blockierte, die der Krebs brauchte, um zu wachsen – wirkte, was die Ärzte zuvor nicht geschafft hatten: Sie ließ die Tumore schrumpfen. Innerhalb weniger Monate war Kate Robbins so gut wie krebsfrei. Sie ist es bis heute. Und noch immer nimmt sie das Mittel ein.



Personalisierte Medizin

# Die PILLE nach Maß

Lange taten Mediziner so, als gäbe es nur eine Sorte Mensch, als ließen sich sämtliche Gebrechen mit den stets gleichen Medikamenten heilen. Das aber ist grundfalsch.

Seit Kurzem betrachten Ärzte den Einzelnen, seine Gene und individuellen Körpersignale – und gewinnen ein völlig neues Bild von Mensch und Kranksein

Eine Geschichte mit Happy End. Doch nach den Regeln, die bislang in der Medizin galten, hätten die Ärzte Kate Robbins die Pille gar nicht verabreichen dürfen.

Denn das Mittel namens „Gefitinib“ hat – rein statistisch gesehen – keine nennenswerte Wirkung. Gäbe man 100 000 Lungenkrebspatienten Gefitinib, wären rund 90 000 ihrem Leiden weiterhin ausgesetzt; nur etwa jeder Zehnte dürfte auf einen Effekt wie im Fall von Kate Robbins rechnen. Nach den Maßstäben der Lehre ist das aber zu wenig.

**DENN SEIT GUT 50 JAHREN** ist die Medizin „evidenzbasiert“; sie fußt – soweit möglich – auf klar ersichtlichen Erkenntnissen. Gemeint ist damit, dass sich Ärzte bei der Behandlung nicht auf Anekdoten oder ihre eigene, eingeschränkte Erfahrung verlassen dürfen, sondern jede Operation und jedes Medikament objektiven Tests unterziehen müssen.

Schließlich können sehr viele Faktoren bewirken, dass es einem Patienten besser geht – möglicherweise

ernährt er sich seit Therapiebeginn gesünder, vielleicht war die Diagnose falsch, womöglich zählt er zu den Glücklichen, deren Körper spontan von selbst heilt.

All diese Folgen können vortäuschen, dass ein Mittel hilft. Doch nur wenn es Kranken in standardisierten Studien im Vergleich zu herkömmlichen Medikamenten nach der Einnahme besser geht, kann sich die Forschung sicher sein, dass es am Wirkstoff liegt – und nicht am Faktor Zufall.

Die evidenzbasierte Medizin ist einer der Triumphe der Moderne. Ihr verdankt die Menschheit ungezählte Fortschritte, sie rettet Millionen von Leben. Aber sie hat bisher einen großen Makel: Sie muss so tun, als gäbe es nur eine Sorte Mensch – für den alle Eingriffe und Therapien gleich gut geeignet sind.

Das aber ist so, als würde die Textilindustrie Tausende Deutsche vermessen und dann Hosen und Pullover in nur einer Durchschnittsgröße schneidern. Diese Hosen und Pullover würden zwar viele kleiden, aber oft eher schlecht. Manchen Kunden würde der Bund knei-

fen, anderen der Kragen hängen, einige würden über ihre Hosenbeine stolpern. Und wieder andere müssten wohl gänzlich nackt gehen.

Denn der Mittelwert aus groß und klein, dick und dünn ist letztlich ein theoretisches Konstrukt. Die Menschen werden zu einem hohen Prozentsatz Maße haben, die nicht weit entfernt sind von der errechneten Größe. Dennoch werden nur wenige genau jene Taillenweite haben, die dem Durchschnitt aller Tailen in Deutschland entspricht. Und dazu Beine, die auf den Zentimeter so lang sind wie das gemittelte Schrittmaß aller Bürger.

Ähnlich ist es in der Medizin. Unsere Körper sind nicht gleich – weder äußerlich noch in ihrem Inneren. Sie haben ihre jeweiligen Charakteristika.

Deshalb setzt sich seit wenigen Jahren eine revolutionäre Sicht durch: Pharmakonzerne entwickeln maßgeschneiderte Arzneien für die Patienten, nach Analyse ihrer einzigartigen Körpersignale. Damit aber stellen sie sich einer der komplexesten Aufgaben der Medizin.

**DASS SICH KÖRPER unterscheiden**, erfahren Ärzte täglich. So können sie sich beispielsweise nicht darauf verlassen, dass ein Präparat einem Patienten auch wirklich hilft.

## Manchmal bewirken Beruhigungsmittel das Gegenteil: Sie wühlen auf

„Von 100 Kranken, welche die richtige Diagnose für ihr Leiden bekommen und dazu die Standarddosis des Mittels, das dafür am besten geeignet ist, werden durchschnittlich 70 oder 80 eine Besserung verspüren“, so Francis Collins, der

Direktor der National Institutes of Health (NIH), der US-Behörde für biomedizinische Forschung.

Das bedeutet: Bis zu 30 Prozent der Patienten geht es *nicht* besser. Und je nach Arzneimittel kann dieser Anteil noch weit höher liegen. Medikamente etwa gegen Arthritis, eine Entzündung der Gelenke, versagen durchschnittlich bei jedem zweiten Kranken. Diabetesmittel bei vier von zehn Betroffenen.

So gut wie kein Medikament hilft allen, so NIH-Chef Collins. Und Vertreter der Pharma industrie räumen ein, dass es jedem achtten Patienten durch die Einnahme herkömmlicher Therapeutika sogar schlechter geht als ohne.

In all diesen Fällen verschreiben Ärzte in der Regel ein zweites Präparat und dann vielleicht noch weitere – bis schließlich eines wirkt.

Auch fällt auf, dass Krankheiten je nach Patient unterschiedlichen Mustern folgen und nicht alle Menschen mit der gleichen Intensität betreffen. Besonders deutlich wird das im Vergleich der Geschlechter: So erkranken zwischen dem 20. und 45. Lebensjahr vorwiegend Männer an Bluthochdruck, Frauen erst in höherem Alter. Männer sind stets anfälliger für Infektionen, Frauen für Herzrhythmusstörungen. Die erkranken auch gut zehnmal häufiger an diversen Autoimmunleiden.

Selbst wenn Frauen und Männer eine identische Krankheit trifft, spüren sie teilweise unterschiedliche Symptome. So löst ein Herzinfarkt bei Männern meist einen schmerhaften Druck unter

dem Brustbein aus; Frauen dagegen (die im Schnitt erst zehn Jahre später Infarkte bekommen) wird häufiger übel, sie klagen über Bauchschmerzen oder schwitzen stark.

Im Grunde ist das wenig erstaunlich, denn weibliche und männliche Körper sind sehr unterschiedlich organisiert.

## Krankheiten folgen je nach Patient ganz unterschiedlichen Mustern

Jeweils andere Hormonkonzentrationen durchspülen die Gewebe, die Organe variieren in der Größe (und die weiblichen sind besser durchblutet). Frauenkörper haben meist einen höheren Fettanteil, Männer mehr Muskeln. Selbst der Magensaft unterscheidet sich – der männliche ist saurer.

Doch auch Geschlechtsgenossen weichen stark voneinander ab. Und seit Forscher begonnen haben, das menschliche Genom zu entschlüsseln, also das Erbgut eines Individuums, beginnen sie zu verstehen, weshalb das so ist.

Zwar weisen Menschen eine verblüffende genetische Ähnlichkeit auf. Unabhängig davon, ob jemand in Asien, Amerika, Afrika, Europa oder anderswo lebt, teilt er 99,5 Prozent seines Erbguts mit dem Rest der Menschheit. Anthropologen vermuten, dass sämtliche fast sieben Milliarden Exemplare von *Homo sapiens* wohl von den gleichen, wenigen Hundert Ahnen abstammen, die eine vor rund 195 000 Jahren beginnende Eiszeit in Afrika überlebten.

Doch da unser Genom aus mehr als drei Milliarden Bausteinen besteht, bedeuten 0,5 Prozent Unterschied, dass jeder von uns in seinem Erbgut im

Schnitt 15 Millionen Elemente aufweist, an denen seine DNS von der anderer abweicht. Diese Variationen können sich zu gewichtigen Unterschieden summieren. Ein Beispiel dafür ist der Stoffwechsel.

Jedes Mal, wenn wir Nahrung – oder ein Medikament – zu uns nehmen, werden in unserem Verdauungstrakt Enzyme aktiv. Diese Proteine (Eiweiße) sind die Werkzeuge des Körpers. Sie werden eigens nach den in den Genen gespeicherten Bauplänen gebildet. Sie steuern unter anderem jene Prozesse, mit denen die Zellen bei der Verdauung Stoffe zerlegen, umwandeln und ausscheiden.

Besonders wichtig für Mediziner ist dabei ein Enzym mit der wissenschaftlichen Bezeichnung „CYP2D6“. Es wirkt in der Leber und bestimmt bei rund einem Viertel der modernen Medikamente, wie schnell sie im Körper abgebaut werden. Je nachdem, welche Genversionen ein Mensch besitzt, variiert auch die Konzentration des CYP2D6-Enzyms – vergleichbar mit der Anzahl von Hungern, die sich über ein Büfett hermachen: Je mehr Menschen schlemmen, umso eher ist es leer geräumt. Je mehr intakte Enzyme ein Mensch besitzt, desto schneller werden die Medikamente abgebaut.

Die Folgen können dramatisch sein. „Nortriptylin“ etwa ist ein Antidepressivum, das gewöhnlich in Tagesdosen von 100 bis 150 Milligramm verschrieben wird. Bei 88 Prozent aller Europäer – die eine spezifische Konzentration des Enzyms CYP2D6 aufweisen – verbleibt diese Menge für eine Zeitspanne im Körper, die es dem

Mittel erlaubt, seine Wirkung bestmöglich zu entfalten.

Mehr als sieben Prozent aller Europäer besitzen dagegen weniger Enzymkopien: Sie brauchen länger, um das Präparat abzubauen. Und weil es mehr Zeit im Körper verbringt, wirkt es stärker. Verabreicht man solchen Patienten 150 Milligramm Nortriptylin, treten Vergiftungen auf. Ihnen genügen zehn bis 20 Milligramm.

Zwei Prozent der Menschen leben wiederum mit einer hohen CYP2D6-Konzentration: Ihre Körper scheiden

tet – oder an einem Schlaganfall stirbt, weil sich die Gerinnsel in seinen Adern noch nicht aufgelöst haben. Er kann tiefer als geplant in eine Narkose fallen oder trotz Schmerzmittelgabe empfindsam sein. Oder ein Tumormedikament wird so schnell abgebaut, dass es nicht wirkt.

Was die Sache noch weiter verkompliziert: Selbst bei einem Individuum arbeitet der Stoffwechsel im Laufe des Lebens nicht immer gleich.

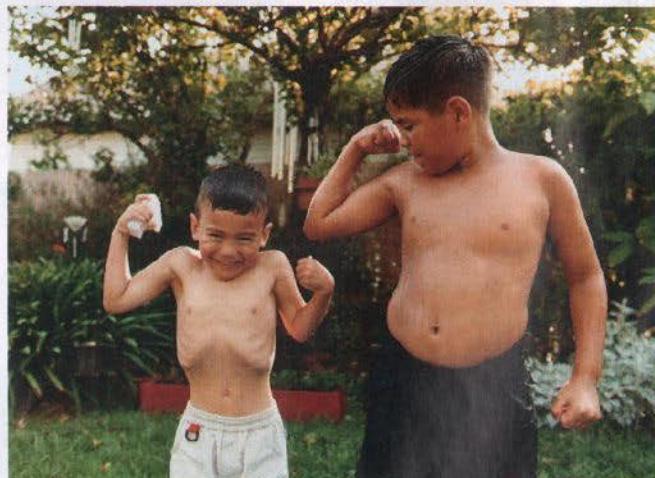
So haben Neugeborene und insbesondere Frühgeborene derart unreife

Organe, dass man ihnen in vielen Fällen eine deutlich geringere Dosis geben muss als Erwachsenen, um sie nicht zu vergiften. Kleinkinder brauchen wiederum je nach Medikament in manchen Fällen das Mehrfache der Menge, die ein Erwachsener nehmen sollte.

Später dann, im Alter, wenn die Organe häufig nicht mehr so gut durchblutet sind, der Darm träge wird, der Fettanteil im Körper steigt und der Wasseranteil sinkt, verändert sich die Verteilung von Arzneistoffen im Organismus wieder. Die Folge: Plötzlich

schlagen manche Medikamente besonders stark an. Oder sie kehren – aus Gründen, die sich bislang niemand erklären kann – ihre Wirkung zuweilen um. Beruhigungsmittel etwa wühlen Senioren gelegentlich geradezu auf.

**DERART GROSSE** individuelle Unterschiede mögen erklären helfen, weshalb Mediziner für zwei Drittel aller Krankheiten noch keine verlässlichen Therapien gefunden haben.



Gene und Umwelt beeinflussen, ob Kinder hochgewachsen sind, untersetzt oder schmächtig. In Zukunft sollen Medikamente dem individuellen Körper der Heranwachsenden angepasst werden

die Standarddosis derart schnell aus, dass sie gar nichts davon spüren. Sie benötigen bis zu 500 Milligramm. Je nach Patient muss die Dosis also um das bis zu 25-Fache angepasst werden, um die gleiche Wirkung zu erzielen.

Nortriptylin ist nur ein Beispiel. Abhängig von den Enzymen, die ein Kranke aufweist (und auch CYP2D6 ist nur eines von vielen), kann es vorkommen, dass er nach der Standarddosis eines gängigen Blutverdünners innerlich blu-

# Forscher sprechen von einem historischen Wendepunkt in der Medizin

Ein besonders augenfälliges Beispiel sind Depressionen. Patienten quälen sich oft noch Monate mit ihrem Lebensüberdruss, mit Antriebsmangel oder durchgrämten Nächten, während sie verschiedene Medikamente probieren.

Forscher am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München haben in einer fast zehn Jahre andauernden Studie entdeckt, dass dies an einer entscheidenden Barriere des Körpers liegen könnte: an der Blut-Hirn-Schranke. Diese Zellschicht trennt den Blutkreislauf vom zentralen Nervensystem und eröffnet nur bestimmten Stoffen eine Passage ins Gehirn; so soll unser wichtigstes Organ vor Krankheitserregern oder Giften geschützt werden.

Variationen im Erbgut bewirken, dass an diesem Hindernis je nach Patient mehr oder weniger effiziente „Wächtermoleküle“ postiert sind, die auf Stoffe unterschiedlich reagieren, sie abblocken oder passieren lassen. Die Folge: Bei manchen Patienten dringen bestimmte Antidepressiva gar nicht erst ins Gehirn vor – und entfalten keine Wirkung.

Dazu kommt: Ärzte beobachten, dass Krankheiten, die in ihren Symptomen scheinbar identisch sind, auf molekularer Ebene variieren. Bei der Infektionserkrankung Hepatitis C etwa unterscheiden Mediziner mittlerweile elf Haupttypen des Virus. Und je nachdem, welcher Erreger das Leiden ausgelöst hat, muss ein Patient zwischen vier und zwölf Monaten behandelt werden.

Bei Krebs nahm man lange an, dass alle Tumore eines Organs gleich seien, etwa bei Lungenkrebs, Darmkrebs oder Hautkrebs. Heute wissen Onkologen, dass sich hinter jeder Krebsart viele und teils höchst unterschiedliche Geschwulste verbergen können. „Untersucht man 100 Darmtumore von 100 Menschen, sind die zum Teil sehr unterschiedlich“, erläutert Dr. Peter Krammer

vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

So sitzen bei manchen Krebspatienten auf der Tumoroberfläche bestimmte Proteine, über deren Signale das Wachstum der Geschwulst stimuliert wird. Die lassen sich oft mit einem Medikament blockieren – wie es bei Kate Robbins mit dem Mittel Gefitinib gelang. Fehlen diese Proteine, bleiben solche Therapeutika jedoch wirkungslos.

Bei bestimmten Brustkrebsarten haben Onkologen kürzlich nachgewiesen, dass ein Tumor je nach seinem genetischen Code\* unterschiedlich aggressiv wuchert – was die Mediziner in die Lage versetzt, besonders langsam wachsende Varianten zu identifizieren. Bei manchen Patientinnen kann deshalb auf eine quälende Chemotherapie verzichtet werden.

Inzwischen beginnen Krebsforscher deshalb, Medikamente auf den Einzelnen zuzuschneiden. Dafür analysieren sie den individuellen Aufbau der Tumore

und entwickeln Stoffe, die vor allem Krebszellen zerstören, ohne dem gesunden Gewebe wesentlich zu schaden.

Bei vielen Krebsarten und Viren-erkrankungen untersuchen Ärzte inzwischen das Patienten- oder Tumorgenom – und überprüfen so, ob eine Behandlung überhaupt sinnvoll ist. Bei elf Medikamenten ist dies in Deutsch-

land bereits vorgeschrieben, etwa beim Darmkrebsmittel „Cetuximab“, das nur bei jenen 60 Prozent der Kranken wirkt, bei denen der Tumor keine Mutation aufweist. Oder beim Virenhemmer „Abacavir“, der für fünf Prozent aller HIV-Patienten mit einer speziellen Genvariante äußerst gefährlich wäre, weil er starke Atemnot, Fieber und Ausschläge verursachen würde.

Anhand einer Blutprobe können Ärzte zudem prüfen, wie effizient der Stoffwechsel eines Patienten arbeitet –



Eineige Zwillinge besitzen identisches Erbgut. Und doch reagieren sie mitunter ganz unterschiedlich auf medizinische Behandlungen

und somit die Dosis seiner Medikamente entsprechend bemessen. Die Maßanpassung gelingt allerdings vor allem dann, wenn die einzelnen Gene und deren Wirkung bekannt sind – an den meisten Körperprozessen aber sind viele verschiedene Erbanlagen beteiligt.

Zudem werden Teile des Genoms gelegentlich ausgeschaltet und plötzlich

wieder aktiviert – durch komplexe Vorgänge, ausgelöst etwa durch die Umwelt oder den Lebensstil.

Das ist vermutlich auch der Grund dafür, dass einige Zwillinge (deren Genom identisch ist) oft unterschiedlich auf Therapien ansprechen.

Zudem genügt die Kenntnis der Gene allein nicht. Denn die nach den Bauplänen der Erbinformationen gebildeten Proteine sind ungeheuer vielfältig: Jedes Gen ist der Bauplan für viele Hunderte, wenn nicht gar Tausende Eiweiße, sodass der Körper viele Hunderttausende Proteine in seinem Repertoire hat – und diese aufeinander einwirken können.

**BIS ZU EINER WAHRHAFT** personalisierten Medizin werden deshalb vermutlich noch Jahrzehnte verstreichen. Doch es zeichnet sich ab, dass sich unsere Definition des Begriffs „Krankheit“ fundamental ändern wird.

„Über Jahrhunderte galten wir als gesund, solange wir keine Symptome hatten“, so Francis Collins vom NIH. „Wir haben den Körper in der Regel so lange ignoriert, bis etwas schiefelief.“

Heute existieren bereits Hunderte von Tests, mit denen Genetiker das Risiko des Einzelnen für Herzinfarkt, Diabetes, Brust- und Prostatakrebs, Alzheimer oder Darmkrebs abschätzen.

Manche Forscher malen sich eine Zukunft aus, in der das Genom – womöglich gleich nach der Geburt – vollständig und planvoll auf sämtliche Anfälligkeit untersucht wird. „Schon bald wird die DNS des Einzelnen, sorgfältig verschlüsselt, ein fester Bestandteil der elektronischen Krankenakte werden“, sagt Francis Collins voraus.

Doch trotz dieser persönlichen Gen-Daten wird es immer wieder Krank-

heiten geben, die vor allem durch Umweltfaktoren ausgelöst werden – beispielsweise durch Bakterieninfektionen. Für deren Ausbruch und Verlauf spielen Gene und damit die personalisierte Medizin nur eine untergeordnete Rolle.

Dazu wirft eine Behandlung, die auf den Einzelnen zugeschnitten ist, auch Fragen auf: Wie wird ein Solidarsystem

#### Memo: PERSONALISIERTE MEDIZIN

- **Unser Körper** ist so individuell beschaffen wie sein Erbgut, das sich von Mensch zu Mensch im Schnitt in 15 Millionen Bausteinen unterscheidet.
- **Männer** sind anfälliger für Infekte, Frauen für Herzrhythmusstörungen.
- **Beide Geschlechter** zeigen oft unterschiedliche Symptome, etwa bei Infarkten.
- **Kleinkinder** benötigen mitunter pro Kilogramm Körpergewicht eine höhere Dosis Medikamente als Erwachsene.
- **Im Alter** schlagen manche Pharmazeutika dagegen besonders stark an.

funktionieren, wenn Krankheit nicht mehr schicksalhaft, sondern berechenbar ist? Wird die Pharmaindustrie bereit sein, Medikamente für immer kleinere Gruppen zu entwickeln?

Und darf man Patienten Therapien verweigern, weil ein Gentest nahelegt, dass sie schlecht darauf ansprechen würden? Denn schon heute weiß man, dass die individuelle Reaktion auf Medikamente nicht nur genetisch festgelegt wird. Und wer möchte sich sein Leben lang mit unheilvollen, womöglich aber fehlerhaften Prognosen aufgrund von Verfahrensfehlern belasten?

Andererseits: Auch die etablierte Standardbehandlung birgt Risiken. So sterben in Deutschland jährlich schätzungsweise bis zu 24 000 Menschen an den Nebenwirkungen von Medikamenten – weitaus mehr also, als etwa im Straßenverkehr umkommen.

Völlig unbekannt ist zudem, wie viele Betroffene eine Erkrankung nicht überleben, weil die Signale ihres Körpers in unserer Durchschnittsmedizin untergehen.

So etwas soll in Zukunft zu vermeiden sein. Francis Collins: „Wir stehen am Start einer wahrhaften Revolution, die verspricht, den traditionellen Ansatz der Medizin, wonach alle Patienten gleich sind, in einen sehr viel mächtigeren umzuwandeln, bei dem jeder Mensch als einzigartiges Wesen mit individuellen Eigenheiten gesehen wird. Auf dieser Grundlage wird man Strategien entwickeln, die ihm helfen, gesund zu bleiben. Und wird ein Mensch krank, wird es zunehmend Behandlungsmöglichkeiten geben, die – auch dank eines neuen Verständnisses des menschlichen Genoms – sowohl wirksamer als auch besser verträglich sind als die Therapien, die bis vor ein paar Jahren existierten.“

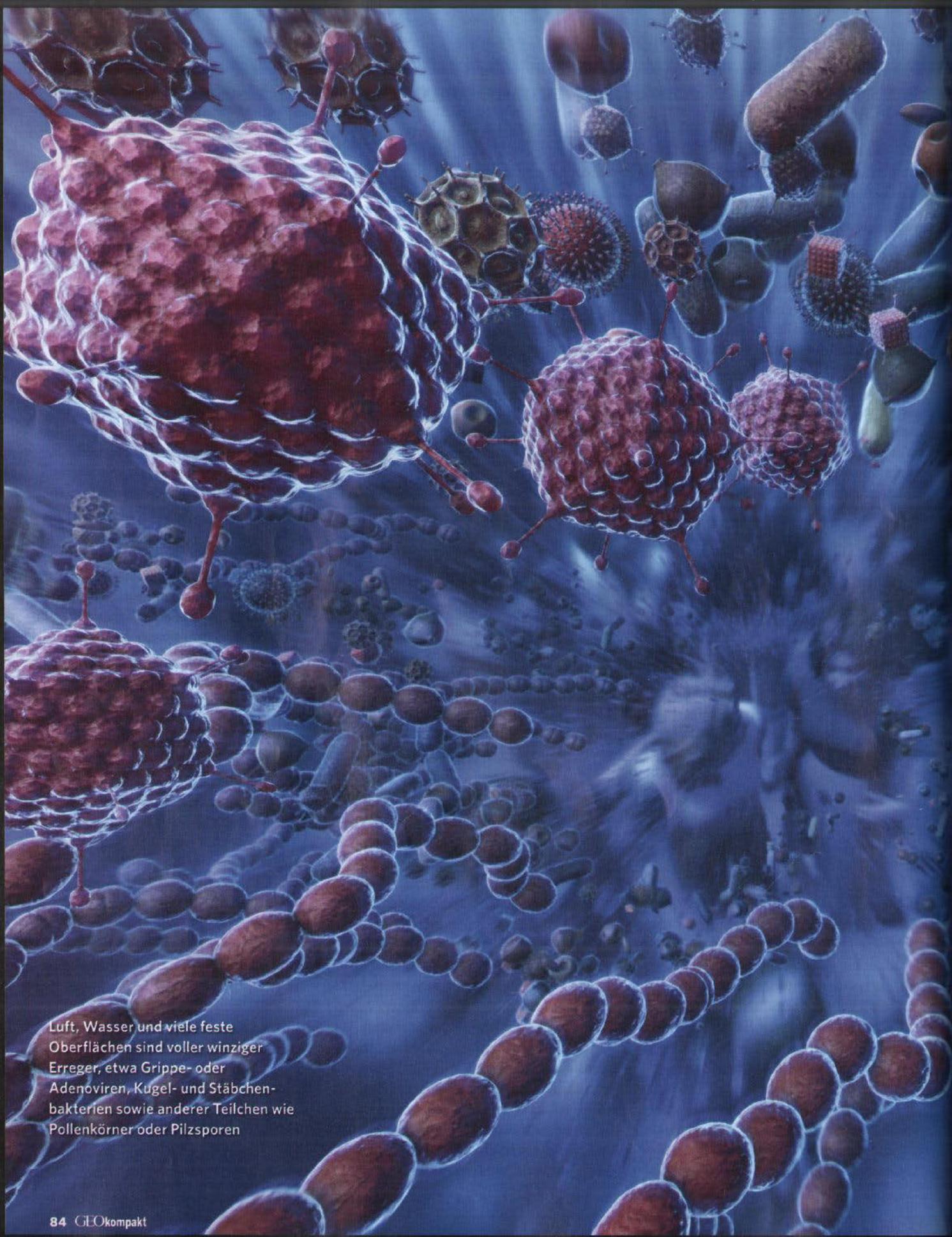
Auch andere Experten sprechen bereits von einem „historischen Wendepunkt“ hin zu einer Medizin, in der Ärzte nicht mehr blind ausprobieren müssen, welche Behandlung zum Einzelnen passt, sondern gezielt individualisierte Behandlungsstrategien entwickeln können.

**KATE ROBBINS** aus Massachusetts hatte seinerzeit großes Glück, denn das Mittel, das ihr Leben rettete, bekam sie, weil sie an einer Studie teilnahm.

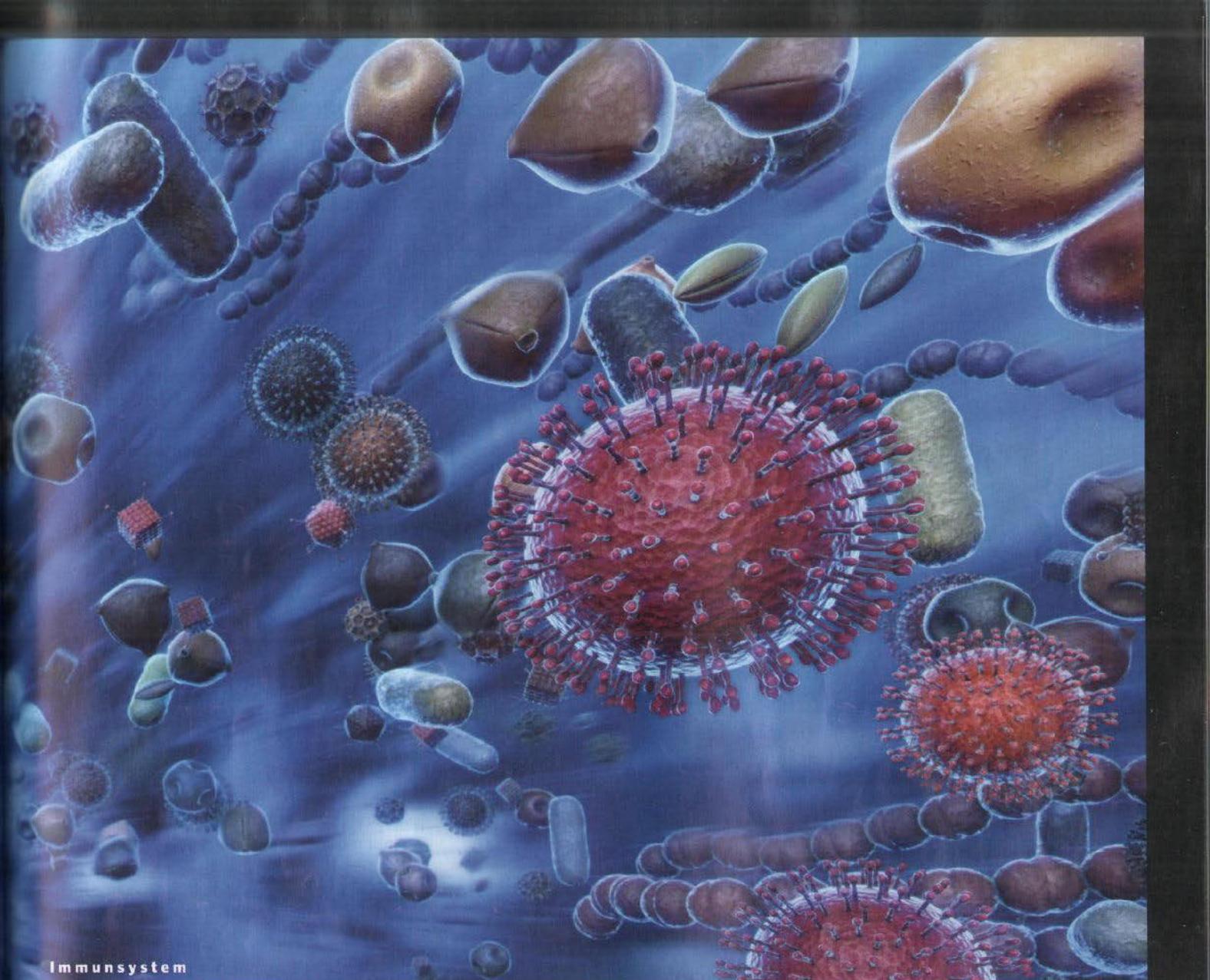
Offiziell zugelassen aber ist es in den USA bis heute nicht – weil es im Massentest viel zu schlecht abschnitt. □

**Eric Tscherne**, 41, ist Illustrator in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: Prof. Dr. Heyo Kroemer, Koordinator des deutschen Forschungsverbundes GANI\_MED.

**Literaturempfehlung:** Francis S. Collins, „Meine Gene – mein Leben. Auf dem Weg zur personalisierten Medizin“, Spektrum Akademischer Verlag, aktueller Überblick über die Rolle der Genetik für die Medizin.



Luft, Wasser und viele feste  
Oberflächen sind voller winziger  
Erreger, etwa Grippe- oder  
Adenoviren, Kugel- und Stäbchen-  
bakterien sowie anderer Teilchen wie  
Pollenkörner oder Pilzsporen



Immunsystem

# KRIEG GEGEN DIE MIKROBEN

Mit jedem Atemzug inhalieren wir Tausende kleinster Partikel, darunter viele Krankheitserreger. Könnten sie ins Innere des Körpers vordringen und sich dort hemmungslos vermehren, würden wir ihnen bald zum Opfer fallen. Doch ein aufwendiges Abwehrsystem schützt uns. Sobald dessen Zellen Eindringlinge registrieren, geben sie chemische Signale ab, die eine riesige Schar von Helfern herbeirufen. Das System ist derart ausgeklügelt, dass es vermutlich sogar die Komplexität unseres Gehirns übertrifft

Text: Alexandra Rigos

Illustrationen: Martin Künsting, Jochen Stuhrmann

# L

London, St. Mark's Hospital, 13. März 2006, acht Uhr morgens. David Oakley ist als Erster dran. Ein Krankenpfleger sticht dem 34-Jährigen eine Kanüle in den rechten Arm und lässt mehrere Minuten lang eine Flüssigkeit in die Vene rinnen.

Oakley folgen sieben weitere gesunde junge Männer. Zwei der Probanden erhalten ein Placebo, zur Kontrolle. In den Adern der anderen sechs aber zirkuliert ein neues Medikament.

„TGN1412“ lautet der Codename des Wirkstoffs, den eine Würzburger Pharmafirma entwickelt hat. TGN1412 gilt als aussichtsreiches Mittel gegen Leiden wie Multiple Sklerose oder Rheuma – Krankheiten, bei denen das Immunsystem den eigenen Körper attackiert.

Forscher haben die Substanz zuvor an Ratten und Affen getestet. Und obwohl den Tieren die 500-fache Dosis verabreicht worden ist, hat das

Medikament keine schädlichen Nebenwirkungen ausgelöst. Stattdessen hat es das Immunsystem wie geplant gebremst und so die Hoffnung geweckt, die Angriffe gegen den eigenen Körper in Zukunft verhindern zu können.

Der Test soll nun erstmals belegen, dass auch Menschen TGN1412 gefahrlos einnehmen können. Ein Routineversuch, so scheint es – leicht verdientes Geld für die Probanden: Jeder von ihnen erhält umgerechnet 3000 Euro als Entschädigung.

Angst haben die Männer nicht: Weshalb sollten Probleme auftreten, wenn Affen das Medikament gut vertragen haben, noch dazu in weit höherer Dosierung?

Doch bald beginnt Oakleys Kopf zu schmerzen, und nach einer Stunde windet er sich vor Qualen. Sein Schädel scheint zu platzen, das Herz rast.

Manche Probanden reißen sich die Kleider vom Leib, weil sie das Gefühl haben zu verglühen, andere zittern dagegen vor Kälte.

Wenig später werden alle sechs Männer von heftigen Muskelkrämpfen, Schwindel, Durchfall und Erbrechen geschüttelt. Ihr Blutdruck fällt rapide, auf ihrer Haut bildet sich ein rötlicher Ausschlag.

David Oakley übergibt sich immer wieder; spuckt bald nur noch Galle.

Da begreifen die Projektleiter, dass ihr Versuch vollkommen außer Kontrolle geraten ist.

Eilig lassen sie die Probanden auf die Intensivstation verlegen, wo ein Kampf auf Leben und Tod beginnt. Denn nun versagen deren Organe, die Blutgerinnung macht Probleme.

Mit allen Werkzeugen der Apparatemedizin, mit künstlicher Beatmung, dem Einsatz von Herz-Lungen-Maschinen, Dialyse und Transfusionen versuchen die Ärzte, den Kollaps der Körperfunktionen aufzuhalten.

In der Zwischenzeit schwollen die Köpfe und Leiber der Männer grotesk an.

Ein Teilnehmer ist so aufgedunsen, dass Zeitungen ihn später den „Elefantenmenschen“ nennen.

War der Wirkstoff verunreinigt? Hat das Personal den Probanden versehentlich ein tödliches Gift gespritzt? Stimme die Dosis nicht?

All diese Vermutungen stellen sich bald als falsch heraus. Vielmehr sind es die Körper der Männer selbst, die einen Krieg gegen den eigenen Organismus führen. Ihr Immunsystem läuft Amok.

Es schüttet Unmengen von Botenstoffen aus – als gälte es, eine Invasion übermächtiger Krankheitserreger zu bekämpfen. Doch die gibt es nicht; die enorme Menge der Abwehrstoffe schädigt vielmehr das eigene Gewebe, löst Entzündungen aus, ergreift die Organe wie eine Feuersbrunst.

Eigentlich hätte TGN1412 das Immunsystem der Männer dämpfen sollen. Tatsächlich aber löst die Arznei

## Für Bakterien ist der mensch- liche Körper eine riesige Nahrungsquelle

nun das Gegenteil aus: einen bedrohlichen Sturm der Körperabwehr.

Und noch während die Ärzte um das Leben der Männer ringen, wird eine Erkenntnis immer deutlicher: wie wenig die Wissenschaft nach wie vor über das menschliche Immunsystem weiß.

### I. DIE STREITMACHT DES KÖRPERS – und weshalb er ohne sie untergehen würde

Das Abwehrsystem des Menschen hat die Evolution vermutlich schon vor mehr als 750 Millionen Jahren mit den ersten tierischen vielzelligen Lebewesen hervorgebracht.

Nach und nach entstanden daraus große Organismen aus Tausenden von

Zellen, die für kleinere Lebewesen – etwa Bakterien – zu einer Lebensnische oder Nahrungsquelle wurden.

Gelang es solchen Feinden, in den Körper einzudringen, sich dort auf dessen Kosten zu vermehren und gar seine Zellen zu zerstören, gerieten sie zu einer tödlichen Bedrohung.

Vielzeller, denen es möglich wurde, fremde Zellen von eigenen zu unterscheiden und die Feinde zu vernichten, hatten daher einen Überlebensvorteil.

So entstand ein System, das noch heute beim Menschen existiert und das Biologen das *angeborene Immunsystem* nennen. Insekten, Quallen und Schwämme haben eine Körperabwehr, die diesem System ähnelt und wohl auch aus jener Zeit stammt.

Doch vor etwa 450 Millionen Jahren entwickelten Urfische eine zweite, noch effizientere Abwehrstrategie.

Dieser Zeitpunkt ist bekannt, weil die Haie, deren Vorfahren in jener Epoche entstanden, bis heute ein solches System besitzen – evolutionär ältere Fische wie die Neunaugen hingen nicht.

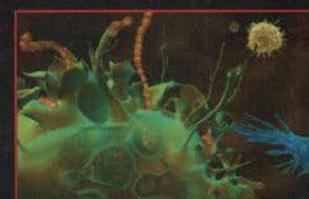
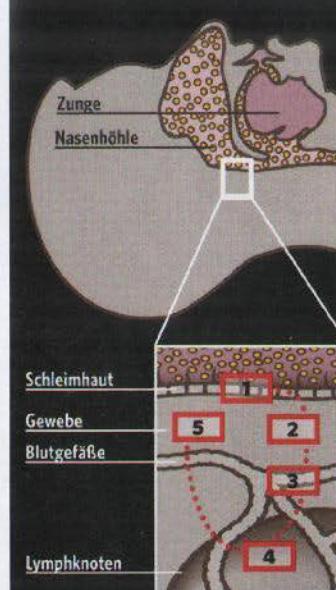
Dieses System wird *erworbenes Immunsystem* genannt und hat den Vorteil, dass es lernen kann, praktisch jeden Eindringling – und sei er noch so gut getarnt – gezielt zu identifizieren und ihn mit hocheffizienten Waffen zu bekämpfen.

Dazu braucht es allerdings erheblich länger als das andere, das angeborene Immunsystem.

Beide Abwehrstrategien sind für uns bis heute von immenser Bedeutung. Denn Heerscharen von Mikroben versuchen ständig, in unserem Körper einzudringen – vorzugsweise über die Mundhöhle oder über den Magen-Darm-Trakt.

Die Medizin kennt mehr als 1400 Krankheitserreger, die sich auf den Menschen spezialisiert haben – vom zehn Nanometer kleinen Virus bis zu Pilzen und meterlangen Bandwürmern.

Ohne unser Immunsystem hätten wir gegen diesen Ansturm keinerlei Chance. In unserem Körper spielen sich permanent Gefechte ab, von denen wir gar nichts mitbekommen.



## Abwehrschlacht in fünf Akten

Zu den Keimen, die wir mit einatmen, gehören auch Streptokokken, die Erreger von Halsentzündungen. Gelingt es ihnen, die Schleimhäute von Nase und Rachen zu besiedeln und gar in das Gewebe dahinter vorzudringen, beginnt ein dramatischer Abwehrkampf. Zuerst stürzen sich körpereigene Fresszellen auf die Bakterien, geben Alarmstoffe ab, die mehr Helfer herbeirufen. Dann werden in den Lymphknoten spezielle Immunzellen aktiviert, um die Erreger zu bekämpfen. Wie dieser Prozess im Detail abläuft, wird auf den folgenden Seiten erläutert.

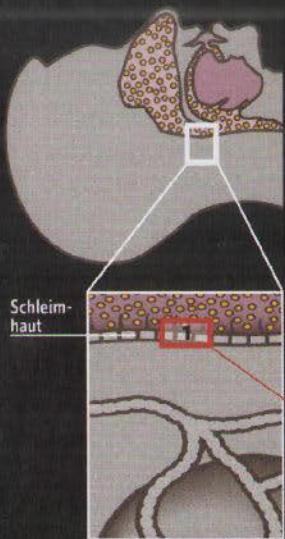
**1 DER ANGRIFF BEGINNT:** Bakterien, hier Streptokokken, gelangen auf die Schleimhaut, etwa der Nase, und dann durch Lücken in das Körpergewebe (Seite 88).

**2 DIE ERSTE ABWEHR:** Alarmierte Fresszellen verschlingen einige der Bakterien und rufen über Botenstoffe weitere Immunzellen herbei, die sich auf die Keime stürzen (Seite 90).

**3 DIE SCHLACHT WEITET SICH AUS:** Botenstoffe aus den Fresszellen lösen eine Entzündung aus. Blutgefäße werden durchlässiger, sodass weitere Helfer leichter zu den Bakterien gelangen, um sie zu bekämpfen (Seite 94).

**4 SPEZIALISTEN WERDEN AKTIV:** In den Lymphknoten machen sich besonders effiziente Immunzellen bereit, die Bakterien mit hocheffektiven Waffen zu bekämpfen (Seite 96).

**5 SIEG DER ABWEHR:** Die Immunzellen wandern durch den Körper zur Entzündung und sondern dort Moleküle ab, die die Bakterien gezielt zu vernichten helfen. Das ist das Ende der Infektion (Seite 100).



**Der Nasen-Rachen-Raum** ist eine ideale Eingangspforte für Krankheitskeime. Ein gesogen etwa mit der Atemluft oder von den Händen gelangen sie auf die Schleimhäute (1).

[großes Bild](#)

## Der Angriff beginnt

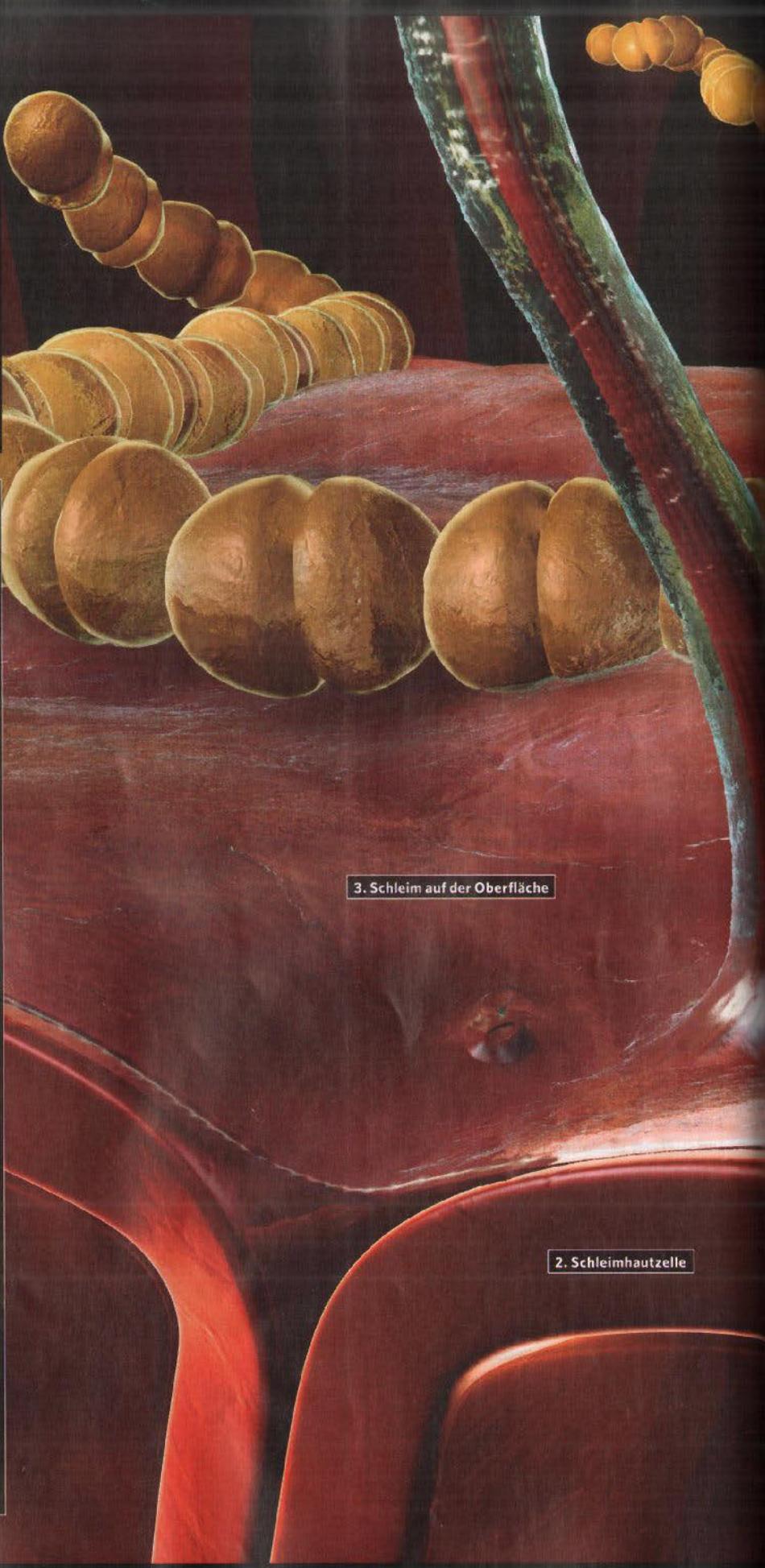
Potenzielle Krankheitserreger wie Viren und Bakterien sind zu Zitatausenden in unserer Umgebung vorhanden und gelangen über die Atemluft ständig in unseren Rachentrakt (rechts, um das 100 000-Fache vergrößert).

Etwa auf der Suche nach Nahrung oder einem Lebensraum dringen einige von ihnen über die Schleimhäute in das Gewebe ein – vor allem in den Wintermonaten. Zu ihnen gehören Streptokokken (1), die sich zu langen Ketten zusammenschließen und Hals- und Mandelentzündungen verursachen.

Doch die Schleimhaut schützt sich: Der von ihren Zellen (2) abgesonderte Schleim (3) erschwert nicht nur das Vorankommen und Eindringen der Erreger, er enthält auch Wirkstoffe, mit denen sie die Bakterien angreifen.

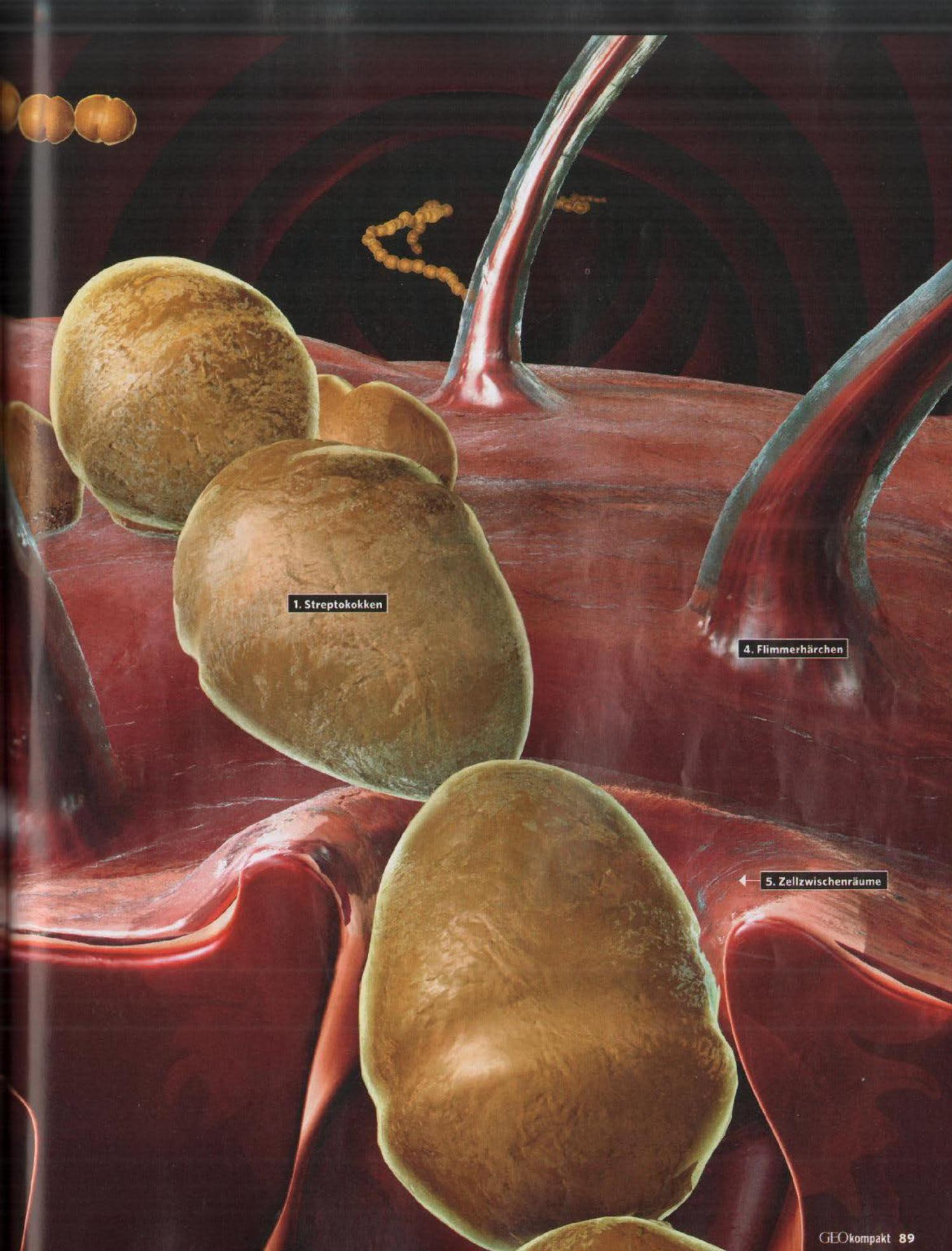
Darüber hinaus ist die Schleimhaut mit Flimmerhärchen (4) ausgestattet. Die bewegen sich wellenförmig, ähnlich einem im Wind wiegenden Kornfeld, und transportieren Fremdkörper – etwa Rußpartikel, Nahrungskrümel oder auch Bakterien – aus den Atemwegen in Richtung Mundöffnung.

Trotz dieser Abwehrmaßnahmen aber gelingt es Streptokokken zuweilen, durch beschädigte Zellzwischenräume (5) ins Gewebe zu gelangen. Würden sich dort nicht Zellen des angeborenen Immunsystems auf sie stürzen (siehe Seite 90), könnten sie sich fortlaufend vermehren und den Körper schwer schädigen.



3. Schleim auf der Oberfläche

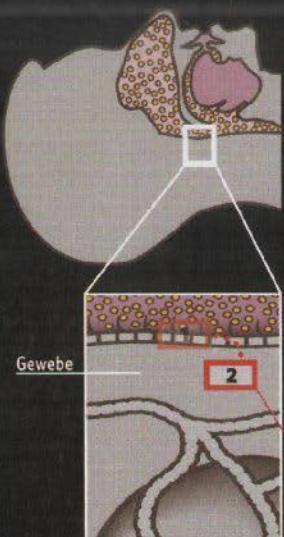
2. Schleimhautzelle



1. Streptokokken

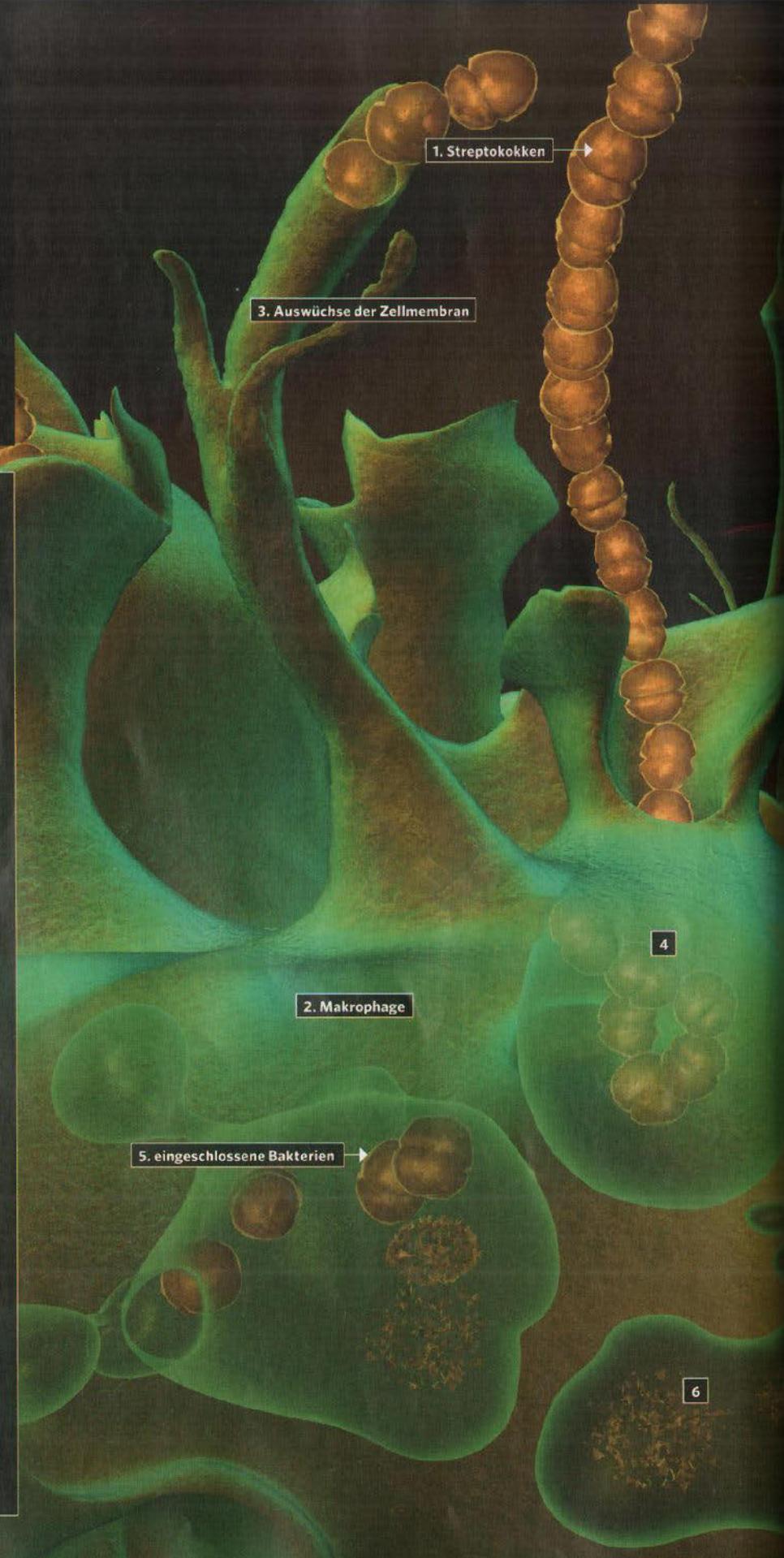
4. Flimmerhärchen

5. Zellzwischenräume



**Ins Gewebe (2)**  
vorgedrungene Bakterien werden von patrouillierenden Fresszellen entdeckt. Die erkennen die Erreger anhand von deren Oberflächenstrukturen als Feinde und stürzen sich auf sie.

großes Bild



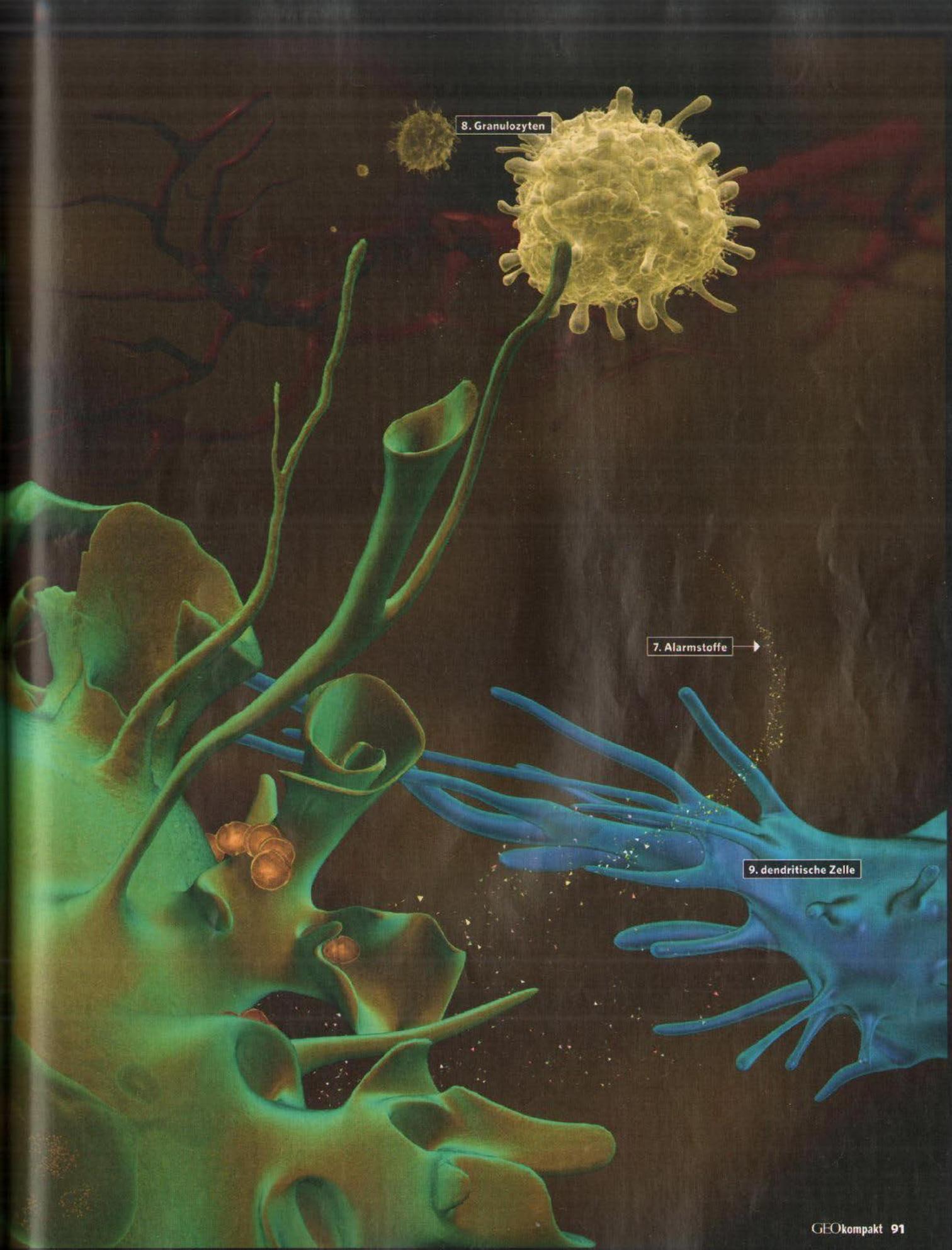
## Die erste Abwehr

Weil Bakterien bestimmte Moleküle absondern und damit eine Art „Geruch“ ausüben, werden die ins Gewebe (rechts) eingedrungenen Streptokokken (1) innerhalb kurzer Zeit von Fresszellen (Makrophagen, 2) wahrgenommen. Mit ihren langen Zellfortsätzen kriechen diese Abwehrzellen durch das Gewebe – und folgen nun dem Geruch der Bakterien.

Sobald sie die Angreifer erreicht haben, versuchen sie, die Mikroben anhand bestimmter Molekülstrukturen auf deren Oberfläche zu identifizieren. Stellt sich dabei heraus, dass es sich um körperfremde Eindringlinge handelt, greifen die Makrophagen an. Sie stülpen Auswüchse ihrer Zellmembran (3) um die Streptokokken, umhüllen sie und nehmen sie in ihr Inneres auf (4).

Die so in ein Bläschen eingeschlossenen Bakterien (5) werden mit chemischen Werkzeugen traktiert, zersetzt und in ihre Bestandteile zerlegt (6). Gleichzeitig senden die Makrophagen Alarmstoffe (7) aus, um weitere Typen von Abwehrzellen herbeizurufen. Das sind zum einen die Granulozyten (8), die Gifte freisetzen und so die Keime zerstören, zum anderen die dendritischen Zellen (9).

Auch die fressen Bakterien – und werden später eine besondere Rolle spielen: Denn wenn es nicht gelingt, alle Angreifer zu vernichten, müssen sie die hocheffizienten Kämpfer der zweiten, erworbenen Immunabwehr in Bewegung setzen (siehe Seite 96).



Jeder Keim muss zunächst die Schleimhaut überwinden, um überhaupt ins Gewebe vorzudringen, und das gelingt nur den wenigsten (siehe Illustration Seite 88).

Schafft es ein Eindringling dennoch, bremsen Zellen und Wirkstoffe des Immunsystems im angrenzenden Gewebe seinen Vermehrungsdrang.

Im Kampf mit immer neuen Erregern hat sich die Körperabwehr im Laufe der Evolution zu einem extrem komplexen System entwickelt.

Genauso wie unser Hirn ist auch das Immunsystem lernfähig: Es kann unbekannte Eindringlinge identifizieren und sich auf sie einstellen.

Und so wie Nervenzellen untereinander kommunizieren, verständigen sich auch die Abwehrzellen in einer eigenen, chemischen Sprache: Sie verfügen über mehrere Dutzend spezielle Botenstoffe, die Nachrichten von einer Abwehrzelle zur nächsten überbringen und so beispielsweise andere Zellen stimulieren.

In mancher Hinsicht erscheint das Immunsystem sogar noch ausgeklügelter als das Gehirn.

Schließlich ist es kein kompaktes Organ, sondern besteht aus Billionen einzelner Zellen, die nicht oder nur kurzzeitig in direktem Kontakt stehen und sich ansonsten frei durch den Körper bewegen. Eine übergeordnete Instanz gibt es nicht – vielmehr müssen die Abwehrtruppen ihre Einsätze gewissermaßen ohne Leitstand koordinieren.

Die Signalkaskaden des Immunsystems aber sind so verwickelt, dass Fehler nicht ausbleiben. Dann kommt es zu Kollateralschäden, zu sinnlosen Kämpfen – und manchmal sogar zum Feuer auf die eigenen Zellen.

Fast jeder Mensch hat solche Pannen schon einmal verspürt. So leiden mindestens 20 Millionen Deutsche unter einer Allergie. Das heißt: Ihre Abwehr

überdreht, weil sie harmlose Substanzen wie Gräserpollen, Hausstaub oder Katzenspeichel für gefährliche Krankheitserreger hält. Sie attackiert sie wie Parasiten und löst dabei unangenehme Entzündungsreaktionen aus.

Diese Allergien sind zumeist ungefährlich. Im schlimmsten Fall aber bringt ein Überschießen der Körperabwehr den Organismus in kürzester Zeit zur Selbstzerstörung.

Selbst ein Wespenstich setzt dann zuweilen einen tödlichen Mechanismus in Gang. Das Gift der Insekten vermag bei Menschen, die dagegen allergisch sind, binnen Minuten eine lebensbedrohliche Schockreaktion auszulösen.

Weil dann manche Immunzellen überreagieren und Stoffe ausschütten, die die Gefäße für Flüssigkeit durchlässiger machen sowie bestimmte Muskelzellen kontrahieren lassen, kommt es zum Kreislaufkollaps und zum Anschwellen der Luftröhre bis zum Erstickungstod.

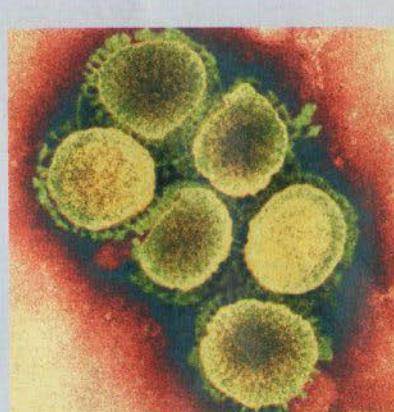
diese Leiden durch fehlgeleitete Immunsysteme begünstigt werden.

Und immer detaillierter entschlüsseln Forscher, weshalb es überhaupt zu diesen Überreaktionen kommt.

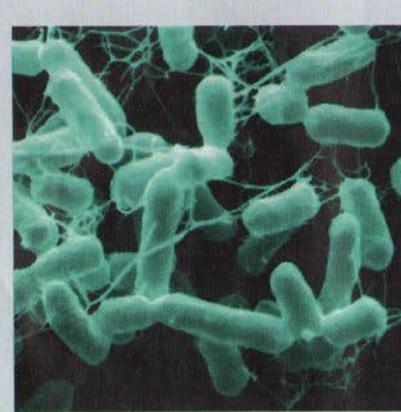
## II. DIE EFFIZIENZ UNSERER ABWEHR – und wie sie Freund von Feind unterscheidet

Das Immunsystem vernichtet ununterbrochen schädliche Fremdlinge im Körper. Bei diesem Kampf ist die Prüfung, wer Feind ist und wer Freund, die wohl größte Herausforderung.

Und da reicht es nicht aus, die körpereigenen von den fremden Zellen zu unterscheiden – schließlich existieren in unserem Körper auch Darmbakterien, die der Mensch zum Überleben braucht und die auf keinen Fall angegriffen werden dürfen (siehe Seite 70).



**Viren** sind winzig und können sich nur in den Zellen des Wirtes vermehren



**Bakterien** – hier Typhusmikroben – zählen zu den wichtigsten Durchfallerreger

Doch nur selten wütet das Immunsystem so schnell und spektakulär gegen den eigenen Körper. In der Regel schädigt es die Gesundheit eher auf schlechende Weise – aber mit ebenso verheerenden Folgen. Forscher vermuten, dass Fehlsteuerungen der Körperabwehr rund die Hälfte aller Krankheiten mitverursachen.

Ob Gefäßverschluss, Diabetes oder Alzheimer: Vieles spricht dafür, dass

Zudem wird die Arbeit der Abwehr noch dadurch verkompliziert, dass immer wieder vollkommen unbekannte Erreger auftauchen, die unser Immunsystem erst einmal identifizieren und dann richtig einordnen muss unter „schädlich“ oder „unschädlich“.

## Manche Krankheitserreger werden von Killerzellen mit Giften zersetzt

Um diese Aufgaben zu erfüllen, setzt der Körper sowohl das angeborene Immunsystem ein – als erste Front – wie auch das erworbene Immunsystem, das sich im Laufe der Zeit auf neue Angreifer einzustellen vermag.

Schon das angeborene Immunsystem verfügt über ein außerordentlich wirk- sames Arsenal an Abwehrzellen (siehe Seiten 90 und 94), die alle zur Gruppe der weißen Blutkörperchen gehören:

- Die Fresszellen (Makrophagen) ver- leben sich umgebetene Gäste ein und verdauen sie; gleichzeitig rufen sie über Signalstoffe andere Zellen des ersten Abwehrsystems herbei.
- Die Granulozyten setzen Gifte frei, um Eindringlinge zu zerstören.
- Die natürlichen Killerzellen elimi- nieren körpereigene Zellen, die bereits von Keimen befallen sind.

Doch wie erkennen die Zellen der ersten Verteidigungs- linie überhaupt die unerwünschten Ein- dringlinge?

Feindliche Bakterien verraten sich durch typische Struk- turen auf ihrer Au- ßenwand.

Diese Merkmale passen exakt zu entsprechenden Struk- turen auf der Oberfläche einer Immunzelle.

Es handelt sich dabei um Merk- male, die sich bei den meisten krank- machenden Bakterien ähneln und die in der Regel von den Zellen der ersten Abwehrreihe erkannt werden.

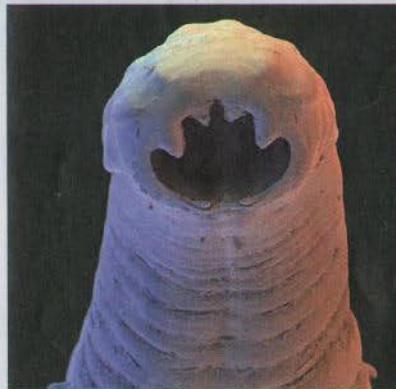
Die nützlichen Mikroben wiederum, etwa im Darm, tragen Strukturen, die sie als harmlos ausweisen – ebenso die gesunden Körperzellen. Dadurch werden sie von den Immunwächtern

Oder aber, wenn sich die Eindring- linge so gut getarnt haben, dass viele von ihnen nicht er- kannt werden.

Nun treten die dendritischen Zellen auf den Plan: Ihre Aufgabe ist es, das zweite, erworbene Immunsystem zu alarmieren. Dazu fressen sie einige der Angreifer, zerlegen sie in ihrem Inneren und bauen einige von deren Oberflä- chenmerkmalen in die eigene Hülle ein.

Dann wandern sie in die Lymphkno- ten und aktivieren dort die Truppen des zweiten Abwehrsystems: die sogenann- ten B- und T-Zellen (siehe Seite 96).

Die unterscheiden sich deutlich von den Zellen der ersten Abwehrreihe: Denn sie können selbst gut getarnte



**Parasiten** wie der Hakenwurm besiedeln vor allem den Verdauungstrakt



**Pflanzenpollen** versetzen das Immun- system mancher Menschen in Alarm

• Auch die dendritischen Zellen fressen Angreifer, doch ihre eigentliche Aufgabe ist eine andere: Sollten die Zellen der ersten Abwehrreihe mit den Erregern nicht fertigwerden, können sie Verstärkung herbeirufen – aus dem erworbenen Immunsystem.

als Teil des eigenen Organismus iden- tifiziert und bleiben unbeheilligt.

Mit den verschiedenen Abwehrzell- Typen gelingt es dem angeborenen Immunsystem in der Regel, die Angrei- fer komplett zu vernichten.

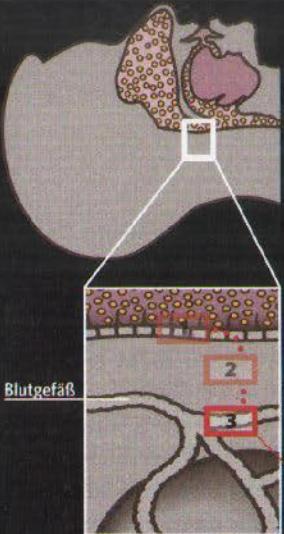
Doch manchmal ist es überfordert – beispielsweise dann, wenn derart viele Keime in den Körper eindringen, dass die Zellen der ersten Abwehrreihe mit ihnen nicht fertigwerden.

## Das Heer der Schädlinge

Die kleinsten und einfachsten Krankmacher sind Viren; sie wandeln sich schnell, die Abwehr muss sich ständig anpassen. Bak- terien sind erheblich größer, doch noch im- mer klein im Vergleich zur menschlichen Zelle. Eingedrungen in den Körper, vermeh- ren sie sich und verursachen Krankheiten. Größere Parasiten, Würmer etwa, bevorzu- gen menschliche Eingeweide. Pflanzen- pollen, Hundehaare oder Hausstaub lösen bei manchen Menschen Überreaktionen des Immunsystems aus: Allergien.

Angreifer aufzuspüren und zudem viel effizienter vernichten.

Die T-Zellen nehmen nun den Kampf in dem befallenen Körpergewebe auf (siehe Seite 100). Dort zerstören sie die Angreifer sowie infizierte Körper- zellen, in die bereits Viren, Bakterien



**Blutgefäß** (3)  
in der Nähe der Erreger werden durch Alarmstoffe durchlässiger, Flüssigkeit sickert ins Gewebe. So gelangen weitere Immunzellen und Abwehrstoffe schnell aus anderen Körperregionen an den Einsatzort

großes Bild

## Die Schlacht weitet sich aus

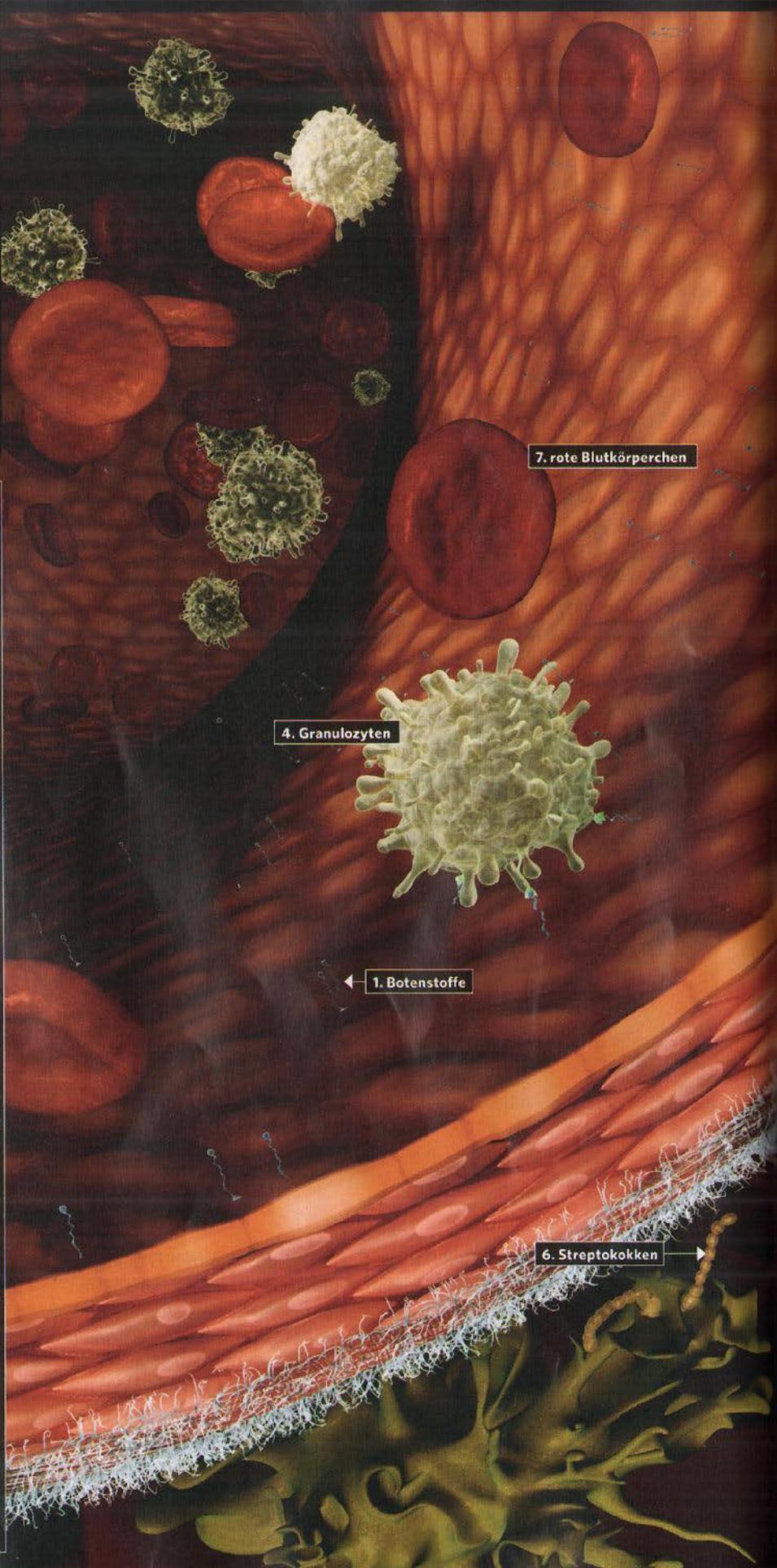
Von den Makrophagen abgegebene Botenstoffe (1) alarmieren weitere Immunzellen und bewirken zudem Veränderungen im Gewebe (rechts), die den Abwehrkampf erleichtern sollen.

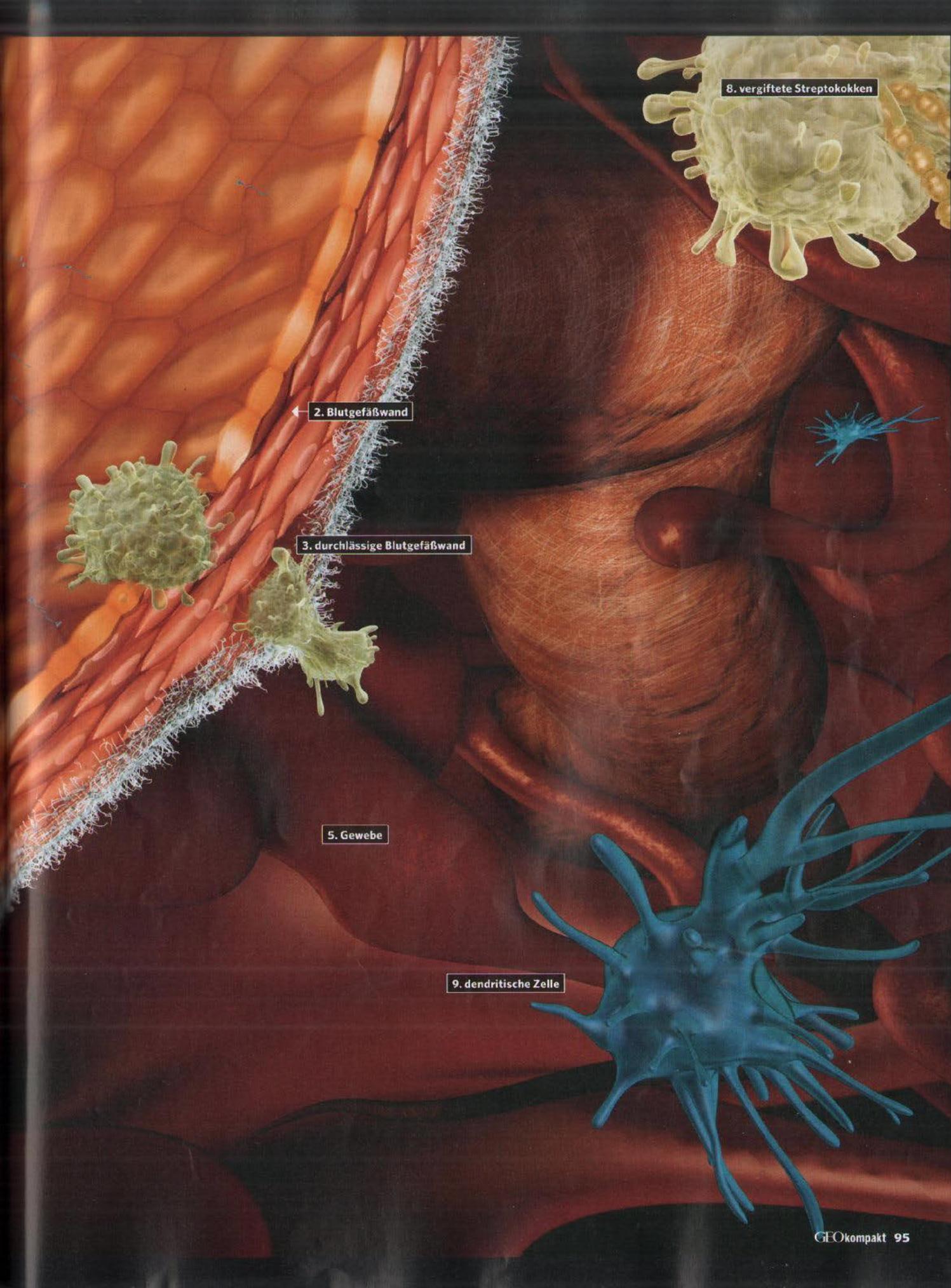
So werden die Wände der Blutgefäß (2) in der Nähe der Eindringlinge durchlässiger (3). Dadurch können Granulozyten (4), die im Blut zirkulieren, zu den in das Gewebe (5) eingedrungenen Streptokokken (6) vorstoßen. Die roten Blutkörperchen (7) sind dagegen zu unbeweglich, um die Gefäßwand zu passieren. Zudem verringert sich die Fließgeschwindigkeit des Blutes, sodass Abwehrzellen leichter zu den Erregern gelangen.

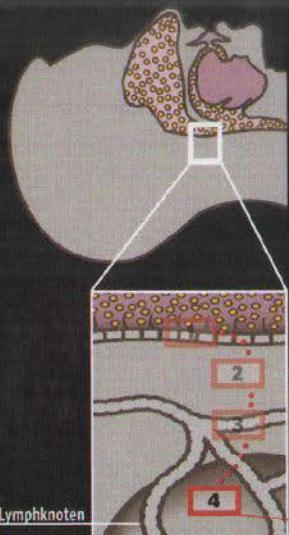
Andere Stoffe bewirken eine Temperaturerhöhung, die den Erregern die Vermehrung erschwert. Auch fischen Eiweißmoleküle nun Eisen aus dem Blut, das die Bakterien zum Wachstum brauchen. All das verursacht Krankheitssymptome wie Fieber und Schmerzen.

Wenn sie die Feinde vergiften (8), setzen die Granulozyten so effektive Waffen ein, dass die Erreger aufplatzen. Mit den Resten zerstörter Körper- und Immunzellen bildet sich eine gelbliche Masse: Eiter.

Bei einem großen Teil aller Infektionen werden die Angreifer auf diese Weise von der ersten, angeborenen Immunabwehr vernichtet. Doch zuweilen gelingt es den Abwehrzellen nicht, alle Eindringlinge zu eliminieren – etwa, weil sich manche zu gut tarnen. In so einem Fall müssen die dendritischen Zellen (9) nun die zweite Verteidigungslinie aktivieren.







**Dendritische Zellen**, die Krankheitserreger verschlungen haben, wandern in die Lymphknoten (4). Dort treffen sie auf hocheffektive Abwehrzellen, die T-Zellen, und aktivieren sie

Lymphknoten

großes Bild

## Spezialisten werden aktiv

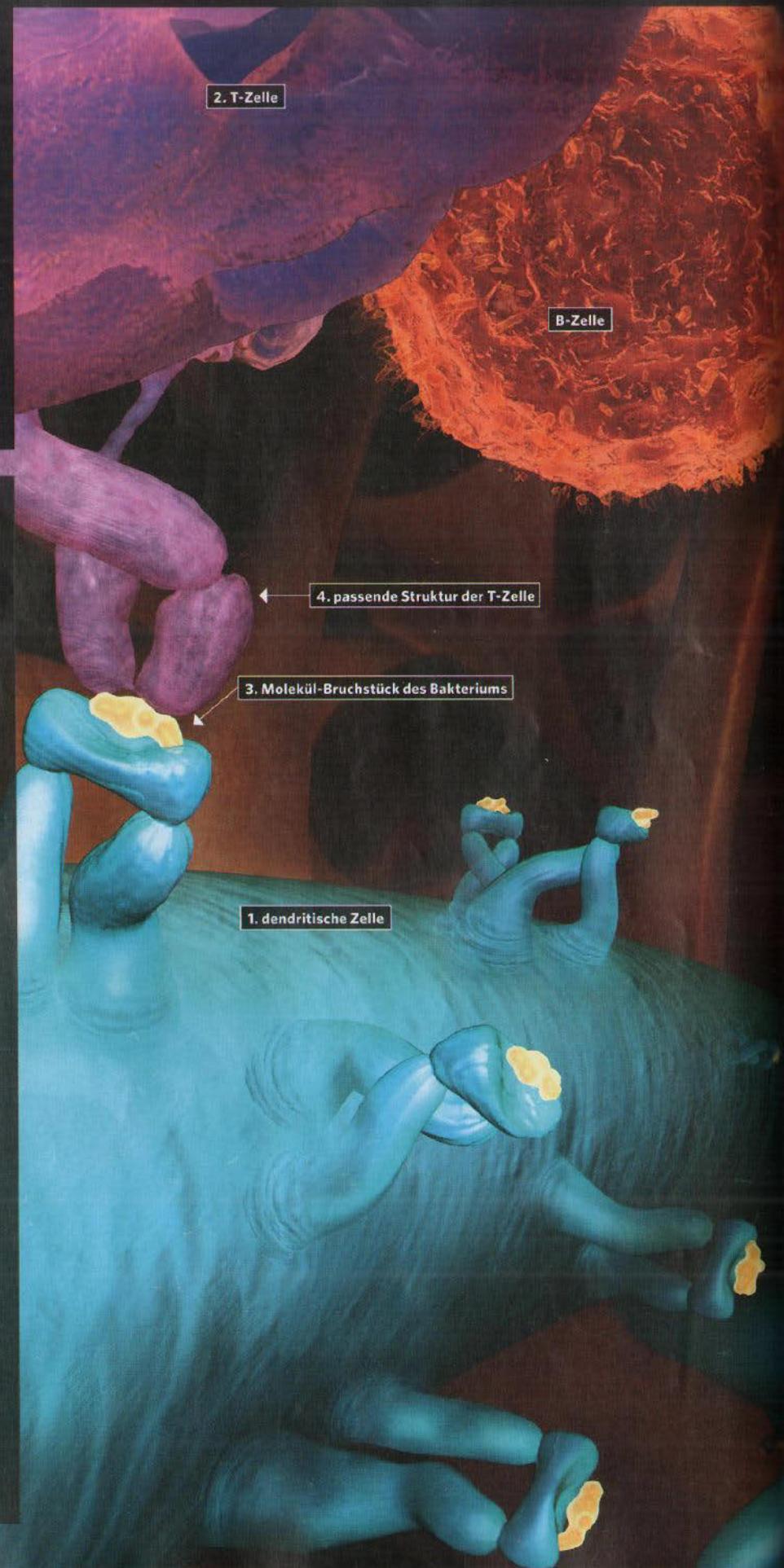
Was nun geschieht, gehört zu den spektakulärsten Vorgängen im menschlichen Körper. Eine dendritische Zelle (1), die ein Bakterium gefressen hat, kriecht in das Innere eines Lymphknotens (rechts). Dort trifft sie auf einen weiteren Typ von Abwehrzellen, die T-Zellen (2). Das Besondere an denen: Sie können selbst gut getarnte Eindringlinge aufspüren.

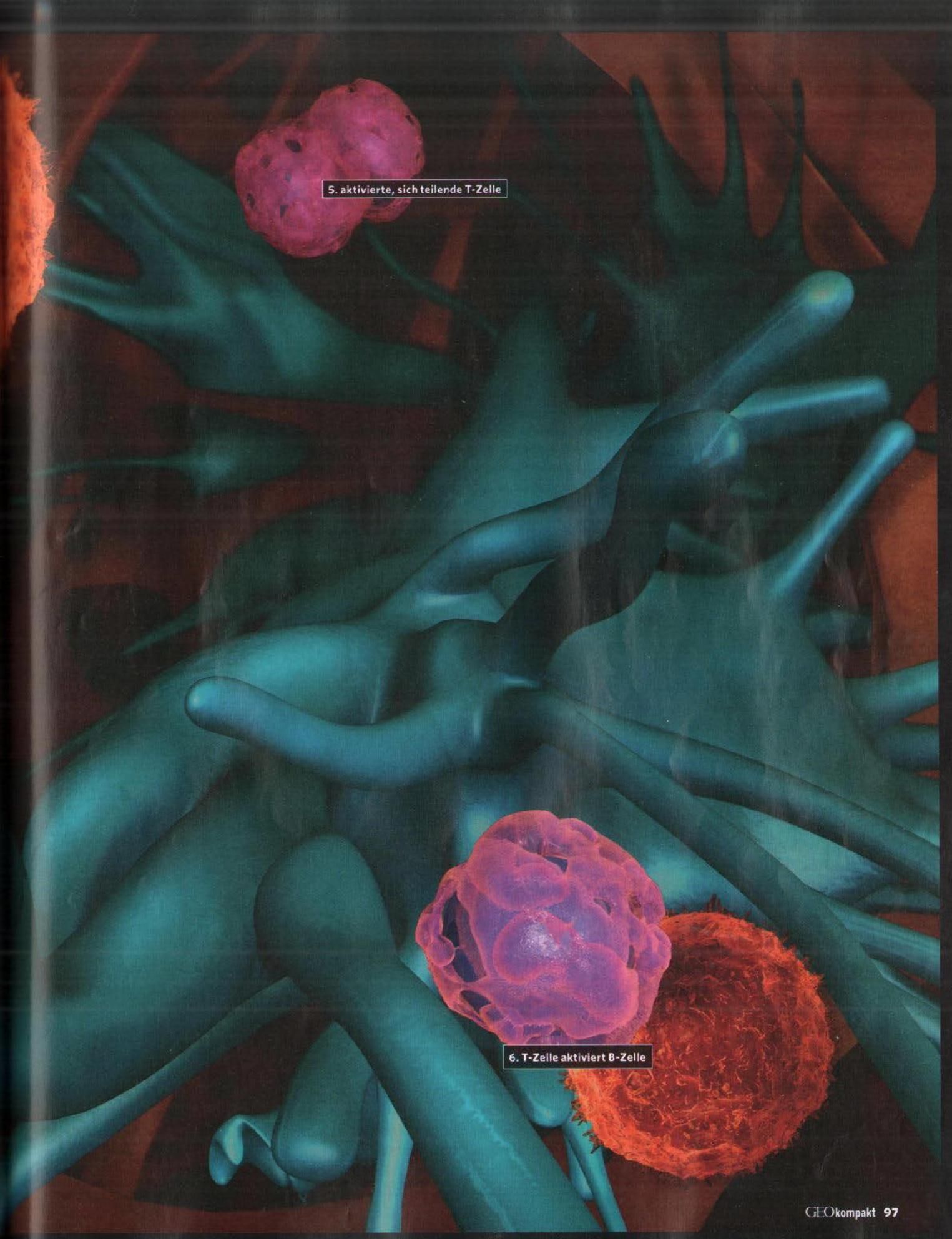
Und das geschieht so: Die dendritische Zelle »präsentiert« den T-Zellen mehrere Oberflächenmerkmale (3) jenes Bakteriums, das sie verschlungen hat – Strukturen, die die Zellen des ersten Abwehrsystems nicht detektiert haben.

Anders als diese Zellen sind die gut 30 Millionen T-Zellen im Lymphknoten hochspezialisiert – und jede für sich ist ein Unikat. Das hat folgenden Vorteil: Mindestens eine von ihnen wird die Streptokokken-Strukturen, die dem ersten Abwehrsystem entgangen sind, erkennen.

Sobald die passende T-Zelle (4) das Oberflächenmerkmal des Bakteriums berührt, wird sie aktiviert und beginnt sich massenhaft zu vermehren (5). Schließlich stehen so viele Nachkommen bereit, die auf die Merkmale der Eindringlinge spezialisiert sind, dass sie sie in kürzester Zeit eliminieren können.

Manche dieser T-Zellen töten die Bakterien nun mit Giften. Andere aktivieren eine weitere Abwehrriege: die B-Zellen (6). Die bekämpfen die Streptokokken schon bald mit speziellen Marken: den Antikörpern (siehe Seite 100).





oder Pilze eingedrungen sind. Zudem stimulieren oder bremsen sie mit Botenstoffen und Signalen verschiedene weitere Immunreaktionen.

Die B-Zellen sind für Eindringlinge in den Blutbahnen und Lymphgefäßen zuständig. Sie greifen aber nicht direkt an, sondern reifen nach und nach zu Fabriken, in denen molekulare Waffen hergestellt werden: die Antikörper.

Diese Y-förmigen Eiweißmoleküle werden unter anderem ins Blut ausgeschüttet. Treffen sie dort auf den Feind, heften sie sich an dessen Zellwand und helfen so, ihn zu zerstören.

Ist der Angriff der Erreger erst einmal zurückgeschlagen, sterben die Immunzellen schnell wieder ab. Nur einige wenige überleben in leicht veränderter Form – als sogenannte Gedächtniszellen.

als beim ersten Mal. Der Körper ist jetzt immun.

Nach diesem Prinzip funktionieren beispielsweise Schutzimpfungen: Der Körper „erinnert“ sich jahrelang an den injizierten Erreger und kann ihn beim nächsten Kontakt schnell besiegen.

Auch Krankheiten wie Masern oder Röteln brechen aufgrund der schnellen Reaktion des Immungedächtnisses nur einmal aus.

Auf diese Weise wird das Archiv des Immunsystems im Laufe unseres Lebens ständig größer und kann sich an immer mehr Krankheiten erinnern.

### III. WESHALB UNSER IMMUNSYSTEM MANCHMAL FEHLER MACHT – und den eigenen Körper angreift

Immer wieder erzeugt unser Organismus auch Abwehrtruppen, die theoretisch körpereigene Zellen angreifen könnten. Um das zu verhindern, hat das Immunsystem eine aufwendige Qualitätskontrolle entwickelt.

strukturen vor, und wann immer eine junge Abwehrzelle auf ein solches Merkmal reagiert, wird sie vernichtet, damit sie nicht den eigenen Organismus angreifen kann.

Doch jeder 20. Kandidat übersteht diese Selektion. Um auch diese Zellen auszumerzen, gibt es in den Lymphknoten weitere Checkpoints, die viele Zellen passieren müssen – und wo sie nochmals getestet und zur Not eliminiert werden.

Auch dort kommen freilich manchmal Zellen durch, die im Körper irgendwann Schaden anrichten könnten. Fortan sind sie so etwas wie molekulare Zeitbomben.

Aber es existiert noch eine weitere Überwachungsinstanz; das sind Zellen, die gleichsam die Intensität der Körperabwehr regeln.

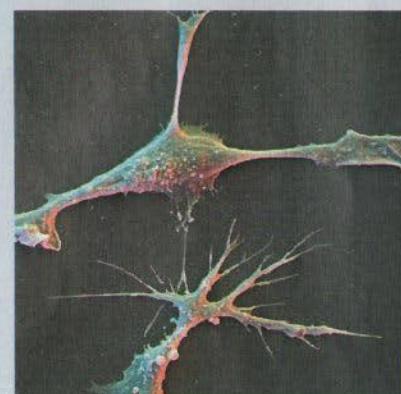
## Die Truppen der Abwehr

Der Körper verfügt über eine Vielzahl von Abwehrzellen mit unterschiedlichen Fähigkeiten. Fresszellen (Makrophagen) etwa gehören zum älteren, angeborenen Immunsystem. Sie sind Generalisten, die viele eingedrungene Bakterien erkennen und unschädlich machen. Die Zellen des jüngeren, erworbenen Immunsystems (etwa T- und B-Zellen, Killerzellen) sind Spezialisten. Sie brauchen länger, bis sie aktiviert sind, besitzen jedoch effektivere Waffen.

Sie bilden das Archiv der Abwehrkräfte, das die Information über Jahre speichern kann. Taucht der Erreger wieder auf, wird er nun viel schneller erkannt; die Gedächtniszellen vermehren sich rasch, und die Immunreaktion kommt nun weitaus früher in Gang



**Fresszellen** verschlingen Krankheitskeime – hier einen Parasiten (violett)



**Dendritische Zellen** fressen Keime und rufen weitere Helfer herbei: T-Zellen

Jugendliche T-Zellen reifen in der Thymusdrüse, einem Organ im vorderen Brustkorb (daher die Abkürzung „T“ für Thymus; B-Zellen hingegen sind nach ihrem Geburtsort im Knochenmark benannt – auf Englisch „bone marrow“).

Beide Zellarten durchlaufen eine strenge Auslese. Dazu führen ihnen spezielle Zellen alle bei den Körpierzellen vorkommenden Oberflächen-

Auf komplexe Weise zügeln sie den Vernichtungsdrang sämtlicher Immunzellen, darunter auch den jener Zellen, die für den eigenen Körper gefährlich werden könnten.

Als Forscher diese „Regelzellen“ Mitte der 1990er Jahre entdeckten, stellten

sie damit das herkömmliche Verständnis der Körperabwehr auf den Kopf. Bis dahin war die Existenz solcher Zellen zwar immer wieder diskutiert worden, aber die meisten Wissenschaftler konnten sich nicht vorstellen, dass sich das Immunsystem mit speziellen Zellen selbst ausbremst.

Heute ist bekannt, dass die Regelzellen eine zentrale Rolle für unsere Gesundheit spielen – und dass es einen Menschen krank machen kann, wenn in seinem Körper zu wenige von ihnen existieren.

In dem Londoner Versuch sollte der Wirkstoff TGN1412 unter anderem dafür sorgen, dass mehr Regelzellen als gewöhnlich durch die Körper der Probanden patrouillieren.

Wenn hingegen nicht genügend Regelzellen vorhanden sind, um die Inten-

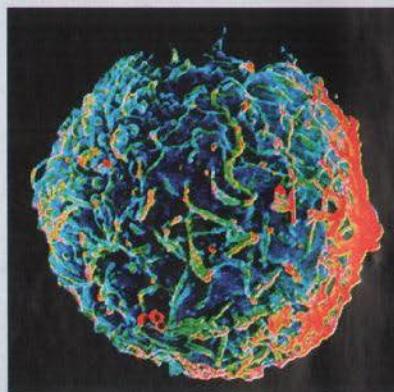
Dabei kann es zu Autoimmunerkrankungen kommen. So zerstört die Körperabwehr bei einer Form des Diabetes Zellen der Bauchspeicheldrüse, die Insulin herstellen. Ohne dieses Hormon aber kann der Mensch keinen Zu-

cker mehr verwerten und stirbt an Auszehrung oder fällt in ein diabetisches Koma (falls ihm das Insulin nicht künstlich zugeführt wird).

Auch die Nervenerkrankung Multiple Sklerose, die zumeist schubweise beginnt und ihre Opfer am Ende bisweilen in den Rollstuhl zwingt, gilt als Autoimmunleiden. Irrlichternde Abwehrzellen greifen dabei im Gehirn die Umhüllung von Nervenfasern an, die sich dann entzünden. Ist diese isolierende Schicht erst einmal beschädigt,



**T-Zellen** werden durch die Molekülstrukturen eines Erregers aktiviert



**B-Zellen** stellen Antikörper her – molekulare Waffen gegen Krankheitskeime

sität der Immunabwehr zu hemmen, droht diese Aggression zu überhitzen. Dann kann es geschehen, dass die – bis dahin unter Kontrolle gehaltenen – Zeitbomben das körpereigene Gewebe angreifen und beispielsweise Entzündungen auslösen.

leiten die Nerven Reize nicht mehr richtig weiter. Die Folge sind Lähmungen, Taubheitsgefühle oder Sehstörungen.

Einige sehr verbreitete Autoimmunerkrankungen betreffen den Darm. Schließlich sind dessen Schleimhäute das Haupteinfallstor für Krankheitserreger, weshalb sich dort ein großer Teil der Immunzellen konzentriert. Zu den bekanntesten chronischen Entzündungen der Darmschleimhaut gehört

## Überaktive Abwehrzellen lösen Entzündungen im Körper aus

Morbus Crohn. Die Betroffenen werden oft schubweise von schweren Durchfällen und starken Schmerzen geplagt.

Und allein in Deutschland leiden

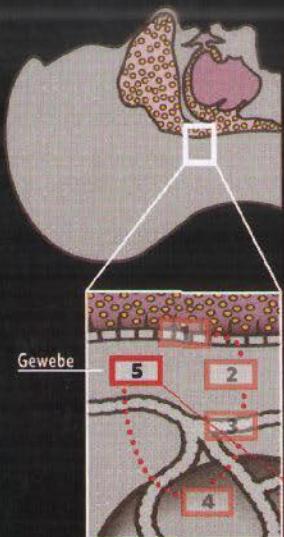
800 000 Menschen an rheumatoider Arthritis (Rheuma). Bei dieser schmerzhaften Entzündungserkrankung greift die Körperabwehr offenbar die Knorpelsubstanz der Gelenke an.

Aber nicht nur die Irrläufer des Immunsystems stellen den Körper auf eine Probe. Auch die korrekt programmierten Zellen des lernfähigen Immunsystems können schädlich sein: dann nämlich, wenn sie nach geschlagener Abwehrschlacht weiterhin aktiv sind, dabei ihre Gifte verteilen und Gewebe entzünden, obwohl die Eindringlinge längst besiegt sind.

Den Grund für diese Hyperaktivität haben Forscher wiederum in einem Mangel an Regelzellen ausgemacht. Die Folge: Das Heißlaufen des Immunsystems trägt zur Entstehung von Alterserkrankungen bei, die Millionen Menschen betreffen, darunter Arteriosklerose und Demenz.

Manche dieser entzündlichen Prozesse lassen Ablagerungen an den Wänden der Blutgefäße entstehen. Bildet sich dort ein Blutgerinnsel, kann es sich losreißen und zu Verstopfungen führen – Herzinfarkt und Schlaganfall sind die Folge. Bei der Alzheimer-Krankheit sterben durch die Dauerentzündungen offenbar Nervenzellen im Gehirn ab. Und im Blut von Depressiven zirkulieren bestimmte Entzündungsstoffe in gigantischen Mengen.

Auch bei Allergien bekämpft das erworbene Immunsystem einen Phantomfeind: Es attackiert allerdings nicht die eigenen Zellen, sondern harmlose Stoffe, die der Körper von außen aufnimmt.



**Über die Blutbahn** und durchs Gewebe verteilen sich die Antikörper - die Waffen der B-Zellen - im gesamten Organismus. So gelangen sie auch zu den eingedrungenen Bakterien (5) und helfen, sie auszuschalten

großes Bild

## Sieg der Abwehr

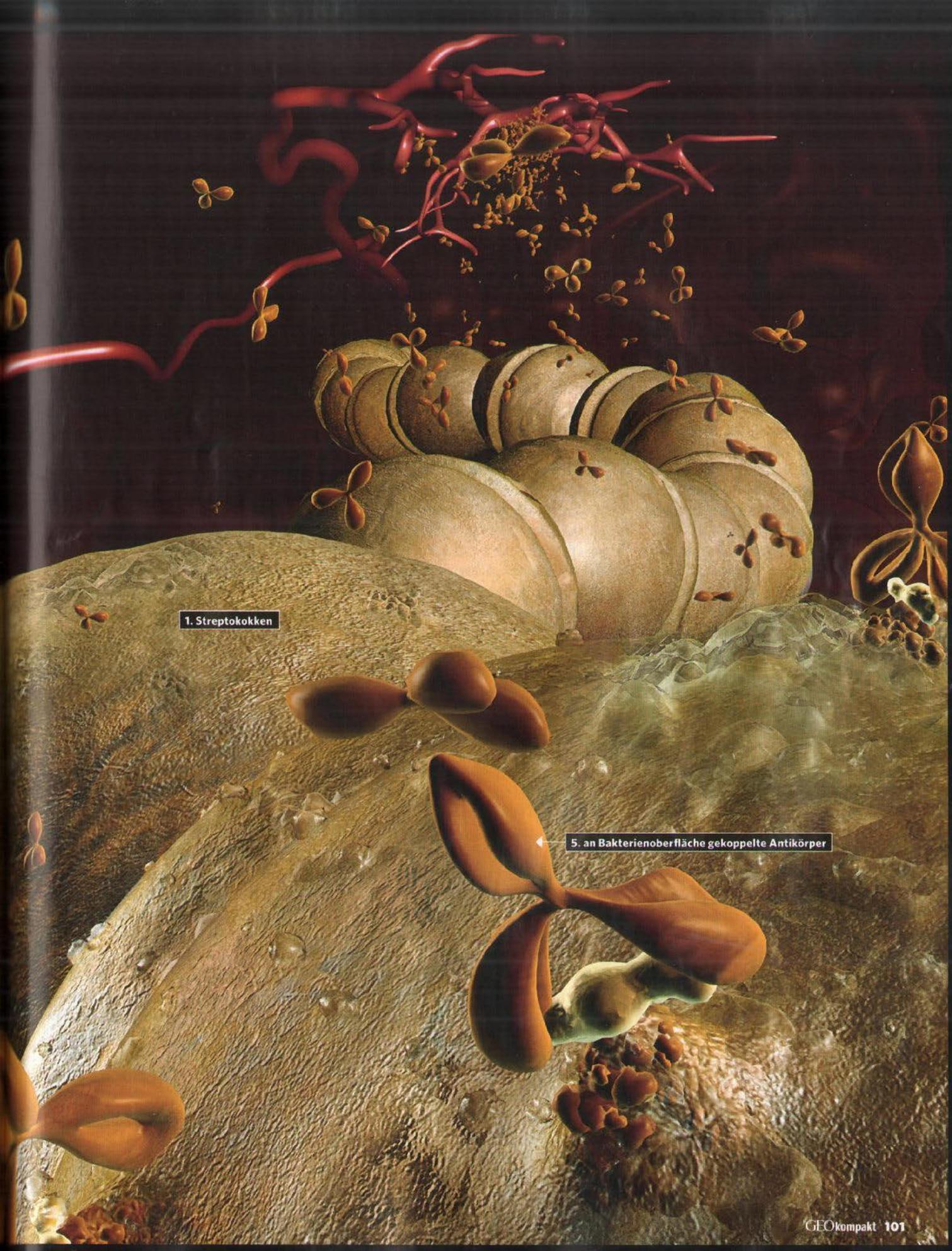
Im letzten Akt der Schlacht übernehmen die aktivierte B-Zellen die Hauptrolle im Kampf gegen die Streptokokken (1). Sie beginnen sich zu teilen und reifen nach einigen Tagen zu Plasmazellen (2) heran. In deren Innerem wird nun eine Produktionsmaschinerie für Antikörper aufgebaut: Das sind Y-förmige, molekulare Waffen (3), die an zwei Enden genau jene Struktur aufweisen, die zu dem Bakterium passt. Diese Antikörper werden nun von den Plasmazellen abgegeben (4). Sie gelangen zu den eingedrungenen Streptokokken - und heften sich an die Strukturen auf deren Oberfläche (5).

So sind die Eindringlinge als Feinde markiert und etwa für die Fresszellen erkennbar, die sie nun vernichten. Damit ist die Infektion besiegt, das Immunsystem hat seine Aufgabe erledigt.

Weil die neu gebildeten Abwehrzellen jetzt nicht mehr gebraucht werden, lösen sie sich auf. Einige T- und B-Zellen aber werden zu langlebigen »Gedächtniszellen«, die eine Art Immungedächtnis bilden (6). Sie behalten die Fähigkeit, die Erreger an der Oberflächenstruktur zu erkennen. Bei der nächsten Infektion können sie sie sofort identifizieren und viel schneller und effektiver reagieren.

Der Körper ist immun geworden - aber nur gegen diesen Typus von Streptokokken. Bei den vielen anderen Varianten des Erregers muss das Abwehrsystem dagegen jedes Mal von Neuem lernen.





Meistens bilden ausgereifte B-Zellen Antikörper auch gegen ungefährliche Substanzen, etwa durch die Nase eingetretene Pollenkörner. Weshalb genau, das ist nach wie vor nicht bekannt.

Die ausgeschütteten Antikörper schwimmen nun frei in der Blutbahn und „infizieren“ auch jene Abwehrzellen nahe den Schleimhäuten, die in der Regel als Erste in Kontakt mit den Pollenkörnern geraten.

Beim nächsten Mal geht dann alles sehr schnell: Da der vermeintliche Feind im Immunarchiv ja bereits vorbereitet ist, läuft die Abwehrmaschine gegen die Pollenkörner prompt an; die Immunzellen beginnen sofort damit, Entzündungsstoffe auszuschütten (Histamine).

Die lassen Schleimhäute anschwellen, lösen Juckreiz, Hauthausschläge und andere typische Allergiesymptome aus.

Diese Sofortreaktion klingt zwar schnell wieder ab, doch nur einige Stunden später treffen weitere Immunzellen etwa an den Nasenschleimhäuten ein und beteiligen sich an dem sinnlosen Feldzug.

Zuweilen enden die Abwehrgefechte sogar tödlich – bei manchen Allergikern genügen ein paar Nüsse, um die Verteidigungstruppen zu verheerenden Gegenschlägen herauszufordern.

#### IV. WESHALB DIE KRIEDE DER KÖRPERABWEHR ZUNEHMEN – und wir immer häufiger Allergien entwickeln

Defekte des Immunsystems hat es immer schon gegeben – daher vermuteten Forscher schon früh, dass auch das Erbgut einen Einfluss auf unsere Körperfeste hat. Bereits im Jahr 375 v. Chr. beobachtete etwa der griechische Arzt Hippokrates,

dass Ziegenmilch und Käse bei einigen Menschen zuweilen seltsame Symptome wie Atemnot und Hauthausschläge hervorrufen.

Dem römischen Heerführer Tiberius Claudius, Eroberer der Britischen Inseln im Jahr 43 n. Chr., trännten stets die Augen, wenn er ein Pferd bestieg.

Und dass Richard III. von England keine Erdbeeren vertrug, fand möglicherweise sogar Eingang in Shakespeares berühmtestes Königsdrama. Angeblich nutzte der mittelalterliche Despot seine Allergie aus, um politische Gegner auszuschalten: Wurde dem König bei Tisch übel, behauptete er, vergiftet worden zu sein – und schon war der überraschte Gastgeber des Hochverrats angeklagt.

Dennoch waren solche Leiden in früheren Zeiten eher selten. Heuschnupfen beispielsweise galt noch Ende des 19. Jahrhunderts als Krankheit einer gesellschaftlichen Elite, ja geradezu als Ausweis von Kultiviertheit: Wer beim Anblick blühender Kornfelder nieste oder sich die Augen rieb, konnte kein gemeiner Bürger sein.

Erst in den vergangenen fünf, sechs Jahrzehnten haben sich Allergien zum Massenphänomen entwickelt:

- Die Zahl der Heuschnupfen-Patienten stieg allein zwischen 1990 und 1998 von zehn auf 17 Prozent der deutschen Bevölkerung; in manchen Regionen reagierte um die Jahrtausendwende bereits jeder Dritte empfindlich auf Pollen.
- Litt 1960 nur eines von 30 deutschen Kindern an der chronischen Hautreizung Neurodermitis, so ist es heute schon etwa jedes sechste.
- Und nicht nur Allergien, sondern auch Autoimmunleiden wie Diabetes und Multiple Sklerose nehmen zu. In Großbritannien etwa steigt die Zahl der Diabetes-Neuerkrankungen jedes Jahr um vier Prozent.

Weshalb nur läuft das Immunsystem der Menschen heute so viel häufiger aus dem Ruder als früher?

Einen Hinweis gibt eine Beobachtung des britischen Arztes Charles Blackley, dem bereits im Jahr 1873 auffiel, dass Bauern kaum an Heuschnupfen leiden, obwohl doch gerade sie inmitten von Wiesen und Feldern leben.

Auch heute noch erkranken auf Bauernhöfen aufwachsende Dorfkinde wesentlich seltener an Allergien als ihre Altersgenossen aus der Stadt.

Auffällig ist zudem: Noch im Jahr 1998 plagten sich mehr West- als Ostdeutsche mit Heuschnupfen – obwohl die Menschen in der ehemaligen DDR stärker von giftigen Stoffen in der Umwelt betroffen waren.

Mehr Nordeuropäer als Südeuropäer leiden unter Multipler Sklerose; auch innerhalb der USA gibt es dieses Nord-Süd-Gefälle, obwohl sich der Lebensstil zwischen Montana und Texas nicht fundamental unterscheidet.

Und: In Entwicklungsländern sind Autoimmunerkrankungen generell rar. Wandern allerdings Asiaten oder Afrikaner in westliche Industriestaaten aus, sind ihre Kinder ebenso anfällig für Immunstörungen wie die Einheimischen.

Was also bewahrt die Einwohner südlicher Länder vor Amokläufen ihres Immunsystems?

Die Erklärung, der inzwischen viele Experten folgen, klingt paradox: Es ist die Begegnung mit Umweltkeimen und bestimmten Infektionen.

Menschen in weniger entwickelten Teilen der Welt sind beispielsweise – ähnlich wie die Landbevölkerung hierzulande – weitaus mehr Krankheitserreger ausgesetzt als die Bewohner Westeuropas. Das Gleiche gilt für den Unterschied zwischen den Nord- und Südstaaten der USA.

Die Kinder dieser Menschen wühlen offenbar sehr viel häufiger in der Erde, spielen in Ställen, tummeln sich mit

## Das Immunsystem muss lernen, welche Feinde anzugreifen sind

vielen Gleichaltrigen und ernähren sich seltener von steril verpackter Supermarktware.

Gerade diesen innigen frühkindlichen Kontakt mit Keimen, die etwa in Ställen oder Rohmilch zu finden sind, scheint das Immunsystem dringend zu benötigen.

Nur auf diese Weise kann es nach und nach lernen, welche Feinde es anzugreifen hat und mit welchen es sich besser arrangiert. Nur so stellt es offenbar genügend Regelzellen zur Verfügung.

Das bestätigten auch Versuche mit Mäusen, die Forscher in einer sterilen Umgebung aufwachsen ließen: Die Körperabwehr der keimfreien Nager war zu normalen Reaktionen nicht fähig.

So ist die Zunahme der Allergien, Alters- und Autoimmunerkrankungen vermutlich eine unvermeidliche Folge besserer Hygiene.

Die Wirkung von bestimmten Keimen und Parasiten auf die Körperabwehr ist offenbar auch eine Frage der Dosis. In der richtigen Menge können sie ihm nutzen – aber schaden, wenn sie überhandnehmen.

Schon beginnen Mediziner, aus dieser Einsicht Konsequenzen zu ziehen: So zeigen erste Versuche Erfolg, bei Erwachsenen Autoimmunerkrankungen mit Infektionen zu behandeln. Auch eine zweite Strategie erscheint theoretisch aussichtsreich – nämlich die Regelzellen, die ja die Hyperaktivität dämpfen, zu vermehren.

So wie es bei dem TGN1412-Versuch geplant war.

**MÄRZ 2006**, London. Mehrere Tage lang ringen die sechs Probanden des Versuchs mit dem Tod.

Dann erst ist die Krise mithilfe der Gerätemedizin und Gaben von entzündungshemmenden Medikamenten überstanden. Das Immunsystem der Männer beruhigt sich allmählich. Ihre Lungen beginnen wieder zu atmen, die

Nieren nehmen die Arbeit auf, die aufgedunstenen Gliedmaßen schwollen auf Normalmaß ab.

David Oakley kann nach wenigen Wochen die Klinik verlassen. Er hat 13 Kilo Gewicht verloren, in seiner Erinnerung klaffen Lücken. Trotzdem ist er zuversichtlich, schon bald wieder ganz gesund zu sein.

Am längsten dauert die Erholung von Ryan Wilson, der erst nach Wochen aus dem Koma erwacht.

Dem 20-Jährigen haben die Entzündungen das Gewebe der Fingerspitzen

## Manchmal kann die Körperabwehr dauerhaft aus dem Lot geraten

Auch die anderen Probanden sind zu diesem Zeitpunkt nicht genesen. Alle leiden an Erschöpfung, ihr Gedächtnis scheint nicht mehr richtig zu funktionieren. Keiner ist fähig zu arbeiten.

Die 15 000 Euro Entschädigung, die sie erhalten, empfinden die Probanden als Zumutung. Sie ziehen vor Gericht, doch die Firma TeGenero aus Würzburg, die den türkischen Wirkstoff entwickelt hat, meldet im Juli 2006 Insolvenz an.

Am meisten belastet die Männer jedoch die bedrohliche Aussicht, über kurz oder lang an Krebs zu erkranken. Auch müssen sie mit einem erhöhten Risiko rechnen, ein Autoimmunleiden zu bekommen.

Denn es stellt sich heraus, dass TGN1412 genau das Gegenteil des geplanten Effekts bewirkt hat: Statt die Regelzellen zu vermehren, blockierte es sie. Zudem kurbelte es die Produktion jener Zellen an, die das eigene Gewebe attackieren.

Weshalb die Substanz bei Menschen so ganz anders als im Tierversuch wirkte, finden Forscher später ebenfalls heraus: Jene Struktur auf der Zelloberfläche, an der sich der Wirkstoff anlagert, unterscheidet sich beim Menschen ein wenig von der bei Ratten oder Affen.

Die Folgen sind dramatisch. Es scheint den Ärzten, als habe TGN1412 bei den Patienten wichtige Weichen dauerhaft verstellt, als sei ihre Körperabwehr für immer aus dem Lot geraten.

Denn jede jemals geschlagene Schlacht hinterlässt im Immunsystem ihre Spuren. □

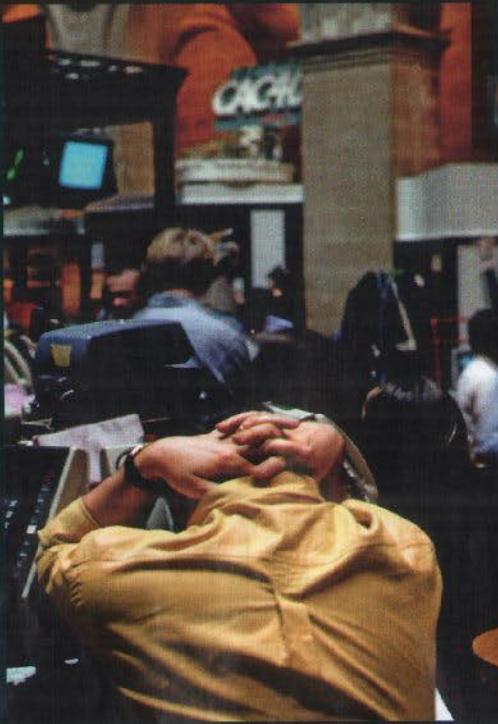
### Memo: IMMUNSYSTEM

- Vor wohl mehr als 750 Millionen Jahren entwickelte sich das angeborene Abwehrsystem mit seinen Fresszellen.
- Bei Wirbeltieren entstand vor 450 Millionen Jahren ein zweites Immunsystem, das lernfähig ist.
- Dieses erworbene Immunsystem sorgt bei einer zweiten Infektion mit demselben Erreger dafür, dass der Körper viel schneller reagiert.
- Allergien treten auf, wenn das Immunsystem harmlose Stoffe für gefährliche Erreger hält.
- Autoimmunkrankheiten wie Diabetes entstehen, indem die Abwehr körpereigene Zellen attackiert.

und Zehen zerstört; die schwarz verfärbten Gliedmaßen müssen amputiert werden.

Nach einem halben Jahr geht David Oakley zur Nachuntersuchung; er fühlt sich oft müde, kann sich kaum konzentrieren. Das Ergebnis ist ein Schock: Die Ärzte stellen im Bluttest Unregelmäßigkeiten fest, die darauf hinweisen, dass Oakley an Leukämie erkranken könnte – wieso, weiß niemand.

**Alexandra Rigos**, 43, ist freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin. **Martin Künsting**, 41, gehört zur GEO-Redaktion. **Jochen Stuhrmann**, 35, ist Illustrator in Hamburg.



Stress

# Ein Leben unter Druck

Forscher stufen Stress als die größte Bedrohung unserer Zeit ein. Denn über Jahre führen seine Signalkaskaden zu einer Schädigung des Körpers. Doch eigentlich steckt dahinter ein äußerst heilsames Prinzip: ein verblüffend effizienter Mechanismus, der uns am Leben hält

Text: Ines Possemeyer

**E**s gibt kaum einen körperlichen Zustand, der so ambivalent, so widersprüchlich und gefürchtet ist wie der Stress. Er lähmst uns, aber gibt auch Kraft, er macht krank und beflügelt, er treibt Menschen in den Tod und rettet Leben.

Stress ist das Ergebnis eines vielschichtigen Signalfeuers, dem niemand zu entrinnen vermag. Und an dem immer mehr Menschen leiden: Wissenschaftler sehen in ihm ein zentrales

Merkmal der modernen Leistungsgesellschaft. Und die Weltgesundheitsorganisation hat Stress gar zu einer der größten Gesundheitsgefahren des 21. Jahrhunderts erklärt.

Obwohl das Phänomen sehr komplex ist, lässt sich Stress (ein aus der Physik entlehnter Begriff für „mechanische Spannung“) leicht beschreiben. Er entsteht im Zusammenspiel zweier Faktoren: auf der einen Seite der „Stressoren“ – all jener Ereignisse, die uns bedrohen und in Anspannung versetzen;

Was den urzeitlichen Menschen einst bei Todesgefahr in Alarm versetzte, regt den Körper heute im Arbeitsalltag zu ungesunden Reaktionen an: Stress im Dauerzustand



auf der anderen der entsprechenden Reaktion des Körpers, die Forscher als „Stressantwort“ bezeichnen. Und obwohl seine Auswirkungen verhasst sind: Stress ist überlebenswichtig.

Das Prinzip dahinter ist in unseren Genen verankert, seit Jahrmillionen.

**DENN STRESS** versetzt uns in Alarmbereitschaft. Heute wie gestern. Als unsere Ahnen noch jagend und sammelnd durch die Wildnis streiften, bewährten sich bei Gefahr – etwa der Begegnung

mit einem Bären – zwei Strategien: Angriff oder Flucht.

Viel Zeit, eine Entscheidung zu treffen, bleibt dem Menschen in einer solch gefährlichen Situation nicht. Daher regt das Gehirn – ausgelöst durch den Stressor – binnen Sekundenbruchteilen den gesamten Organismus an. Vom Denkorgan gesteuert, alarmieren Hormone unser Nervensystem. Ein Botenstoff (Noradrenalin), der bestimmte Abläufe im Körper für die Stressreaktion ankbelt, wird ausgeschüttet. Besonders viel

Noradrenalin gelangt in jene Hirnareale, die Gefühle und Verhalten regulieren. Hormondrüsen an den Nieren stoßen zudem Adrenalin aus.

Beide Stoffe, Adrenalin und Noradrenalin, bewirken eine sekundenschnelle Mobilmachung: Die Energiereserven des Körpers, Zucker und Fett, werden geplündert; das Herz schlägt schneller, versorgt die Muskeln mit mehr Sauerstoff. Das Bedürfnis nach Schlaf, Essen und Sex wird abgeschaltet – denn all das wird bei Gefahr ja nicht gebraucht.

Auch die Verdauung erlahmt, Blase und Darm versuchen noch rasch, überflüssigen Ballast loszuwerden.

Wenn sich dennoch die Lage nicht auf Anhieb meistern lässt – vielleicht, weil der Bär zu stark ist, wir keinen Fluchtweg sehen oder uns auf unbekanntem Terrain bewegen –, kommt ein zweiter Mechanismus in Gang. Der arbeitet langsamer als der erste, verstärkt aber nun die Stressreaktion noch.

Für den Fall, dass wir uns verletzen sollten, wird beispielsweise das entzündungshemmende Hormon Cortisol bereitgestellt. Zudem fährt der Körper sein Immunsystem hoch: Abwehrzellen wandern in die Gewebe, bilden eine Art Schutzwall vor potenziellen Invasoren, unser Blut verdickt, gerinnt im Notfall also schneller. Und körpereigene Opiate betäuben das Schmerzempfinden.

Sollten wir uns dem Bären im Kampf stellen müssen, ist unser Körper nun bestmöglich vorbereitet: Fügt uns das Tier eine Wunde zu, kommen Blutungen schneller zum Stillstand, werden Erreger effektiver bekämpft. Die Betäubungsmittel helfen uns zudem, den Schmerz zu unterdrücken. Damit wir handlungsfähig bleiben.

Die Stressantwort stimuliert auch den Geist. Die Anspannung hilft uns, unwichtige Informationen zu ignorieren und unseren Blick auf das Wesentliche zu lenken – etwa, aus welcher Richtung der Angriff erfolgt, welche Körperteile am ehesten geschützt werden müssen, ob sich doch eine Möglichkeit zur Flucht auftut. Unter ihrem Einfluss prägen sich diese Eindrücke fest in unser Gedächtnis, erleichtern die Erinnerung. Denn vielleicht wählen wir beim nächsten Bärenangriff dann – aus Erfahrung – den sichersten Fluchtweg.

Evolutionär ist das sehr sinnvoll: Wir lernen aus den Erfahrungen, passen unser Verhalten in Zukunft an und sind imstande, noch schneller, noch besser zu reagieren, wenn wir erneut auf einen Bären treffen.

Ohne die derart erhöhte Aufmerksamkeit würden wir Eindrücke weniger gut aufnehmen und Probleme schlechter erkennen, wir wären weniger gewappnet, die Situation zu meistern.



Nicht nur der tatsächliche Druck – hier eine Modenschau – entscheidet über die Intensität des Stresses. Sondern auch die eigene Persönlichkeit

Dieses Krisenmanagement hat sich in der Urzeit für Situationen auf Leben und Tod entwickelt. Die beste Vorsorge für die Zukunft lautete damals schlicht: die Gefahr überstehen, den Tag überleben. Diese Strategie hat sich derart gut bewährt, dass wir sie auch als moderne Großstadtmenschen noch immer im genetischen Programm haben.

**DOCH HEUTE** offenbart diese natürliche Reaktion ihre Kehrseite. Die Lebensversicherung Stress war ursprünglich ja auch nur für wenige Stunden gedacht, nicht aber für einen Zeitraum von vielen Jahren.

Das Risiko, im Kampf mit einem Bären zu sterben, ist derzeit geringer als je zuvor in der Geschichte. Heutzutage

Der Beruf ist der zentrale Schlüssel zu sozialem Status und wirtschaftlichem Wohlstand – und heutzutage der wohl tiefgreifendste Stressor. So nehmen wir nun als Bedrohung ein Kündigungsschreiben wahr, ein Vorstellungsgespräch, die Konkurrenz durch den Kollegen nebenan – oder auch den bloßen Gedanken daran. All dies ruft die gleiche archaische Reaktion hervor, als begegnete uns ein Raubtier.

Auch das Tempo des modernen Arbeitslebens bereitet uns Probleme. Noch nie war die Informationsflut so groß wie heute. Zudem erhöht sich unaufhörlich das Pensum. Und der Büroalltag bringt es mit sich, dass wir uns in nie gekannter Frequenz auf immer neue Aufgaben einlassen müssen – was dazu führt, dass vieles gleichzeitig zu erledigen ist. Das setzt die meisten Arbeitnehmer unter Stress.

Diese Anspannung belastet auch das Privatleben, etwa in den Familien. Zwar hat sich seit der Steinzeit an der grundlegenden Dynamik des familiären Miteinanders wenig geändert – doch sind die Ansprüche und Erwartungen an ein gedeihliches, erfolgreiches Zusammensein enorm gestiegen. Von der Gesellschaft akzeptiert und gefördert, haben Familienmitglieder nun gleich mehrere Rollen zu erfüllen. Die Ehepartner etwa sollen Freunde, Ernährer, Erzieher, Ratgeber und Liebhaber sein,

## Die Lebensversicherung Stress war ursprünglich für ein paar Stunden gedacht. Nicht für Jahre

fürchten wir uns weniger um unser Leben – wir fürchten, wenn überhaupt, um unsere Existenz. Und deren Grundlage ist die Arbeitswelt.

sollen die Familie nach außen repräsentieren, nach innen stützen. Der Druck wird oft an die Kinder weitergegeben: Sie sollen Leistungen zeigen, in der Schule, beim Sport, beim Musizieren.

Und selbst die Nächte setzen den modernen Menschen zuweilen unter Stress. Jeder dritte Deutsche etwa lebt an einer derart stark befahrenen Straße, dass die Ruhe erheblich gestört wird.

Zwar wacht jeder Mensch mit gesundem Schlaf mehrmals in der Nacht auf, ohne es zu merken. Bei ständigem Straßenlärm aber werden diese Wachphasen länger – mitunter so lang, dass wir uns am nächsten Morgen an das Wachsein erinnern. Das aber führt zur Ausschüttung von Stresshormonen.

In einer Zeit also, in der der Körper sich regenerieren sollte, bleibt das Niveau der Stresshormone auf Dauer zu hoch. Die Folge: Der Körper befindet sich unter permanentem Druck, in fortwährender Alarmbereitschaft.

Nur: Die dabei freigesetzte Energie wird gar nicht gebraucht: nicht im Büro, nicht in der Schule oder auf dem Weg zur Arbeit. Flucht und Kampf werden heute oft nur in Gedanken und Wörtern ausgetragen. Das aber ist auf Dauer für den Organismus schädlich. Denn ohne physische Aktivität klingt die innere Mobilisierung weitaus langsamer ab. Und erschwert es uns, auch geistig wieder abzuschalten.

Statt uns also Sorgen vom Leib zu halten, macht uns die Stressreaktion das Leben schwerer: Unser Organismus wünscht sich nach vollbrachter Hochleistung wieder zurück in die Normalität. Laufend bemüht er sich, seinen Stoffwechsel dem Auf und Ab einer sich ständig verändernden Umwelt anzugeleichen. Lassen Belastungen über lange Zeiträume nicht nach, versagen die Anpassungsmechanismen des Körpers und verfangen sich in einer Spirale permanenten Alarms – die Konzentration bestimmter Botenstoffe steigt auf Dauer.

Chronisch erhöhte Cortisolwerte beispielsweise verhindern aber, dass die Stressantwort nach einer Auseinandersetzung, etwa mit dem Vorgesetzten,

wieder ordnungsgemäß auf Normalbetrieb runterschaltet. Dieser andauernde Überlebenskampf schwächt dann unter anderem unser Immunsystem.

Auch der Energiehaushalt kann nachhaltig leiden und bestimmte Formen von Diabetes sowie Übergewicht begünstigen. Ein Anstieg von Blutdruck und Blutfettwerten fördert die Arterienverkalkung und erhöht so das Risiko für Durchblutungsstörungen und Herzgerkrankungen bis hin zu Schlaganfall und Infarkt.

Die verlorene hormonelle Balance bringt nach und nach auch die Gefühlssteuerung aus dem Gleichgewicht; Burn-out-Syndrom, Depressionen, Angst- und Suchterkrankungen sind häufig die Folge. Sogar manche Hirnareale können nachhaltig verändert werden.

Die Mechanismen der Stressreaktion sind bei allen Menschen gleich. Immerhin: So mancher hat eine zeitgemäße Alternative zum archaischen „Kämp-

tern“ identifiziert: Personen, die zu Zynismus neigen, reizbar sind, schnell wütend werden, der Welt gegenüber misstrauisch sind, sie als feindselig empfinden. Kurz: ehrgeizige, erfolgsorientierte Menschen, die sich über Gebühr engagieren, sich durch Unruhe und Ungeduld auszeichnen.

Erstaunlicherweise leiden Manager, die besonders viel arbeiten und besonders viel Verantwortung tragen, selten unter den Folgen von Dauerstress.

Vielmehr sind es die Menschen ganz unten in der Hierarchie eines Unternehmens oder einer Behörde, denen der permanente Cortisol-Alarm in ihrem Körper stark zusetzt. Eine britische Studie, bei der mehr als 10 000 Staatsangehörige 25 Jahre lang verfolgt wurden, ergab, dass Pförtner oder Boten ein viermal so hohes Sterberisiko hatten wie die Manager an der Spitze der Ämter.

Ausschlaggebend für die Gesundheit, so fanden die Forscher heraus, ist die Kontrolle über das eigene Tun.

Je weniger Möglichkeiten ein Mensch hat, seine Arbeit selbst zu bestimmen, sie so zu bewältigen, wie er es für richtig hält, je mehr er also den Entscheidungen anderer ausgeliefert ist, desto höher sein Herzinfarktrisiko.

Das nimmt sogar um mehr als das Doppelte zu, wenn der Betroffene unter einem Missverständnis von hoher persönlicher Verausgabung und niedriger Belohnung leidet.

Aber auch monotone und anspruchslose Aufgaben machen die Menschen krank: Unterforderung ist langfristig ähnlich ungesund wie Überforderung.

Wer jedoch seine Arbeit selbst einteilen kann, wer eigenständig handelt, dem macht auch starker Druck nichts aus. Selbstbestimmung schützt also vor den Nachteilen unserer im Laufe von Jahrtausenden gewachsenen Überlebensstrategie.

Der Mensch muss die Wahl haben können: die Möglichkeit, schnell die richtigen Entscheidungen zu treffen. Denn dafür ist Stress da.

Heute wie gestern. □

Ines Posseymeyer, 42, ist GEO-Redakteurin.

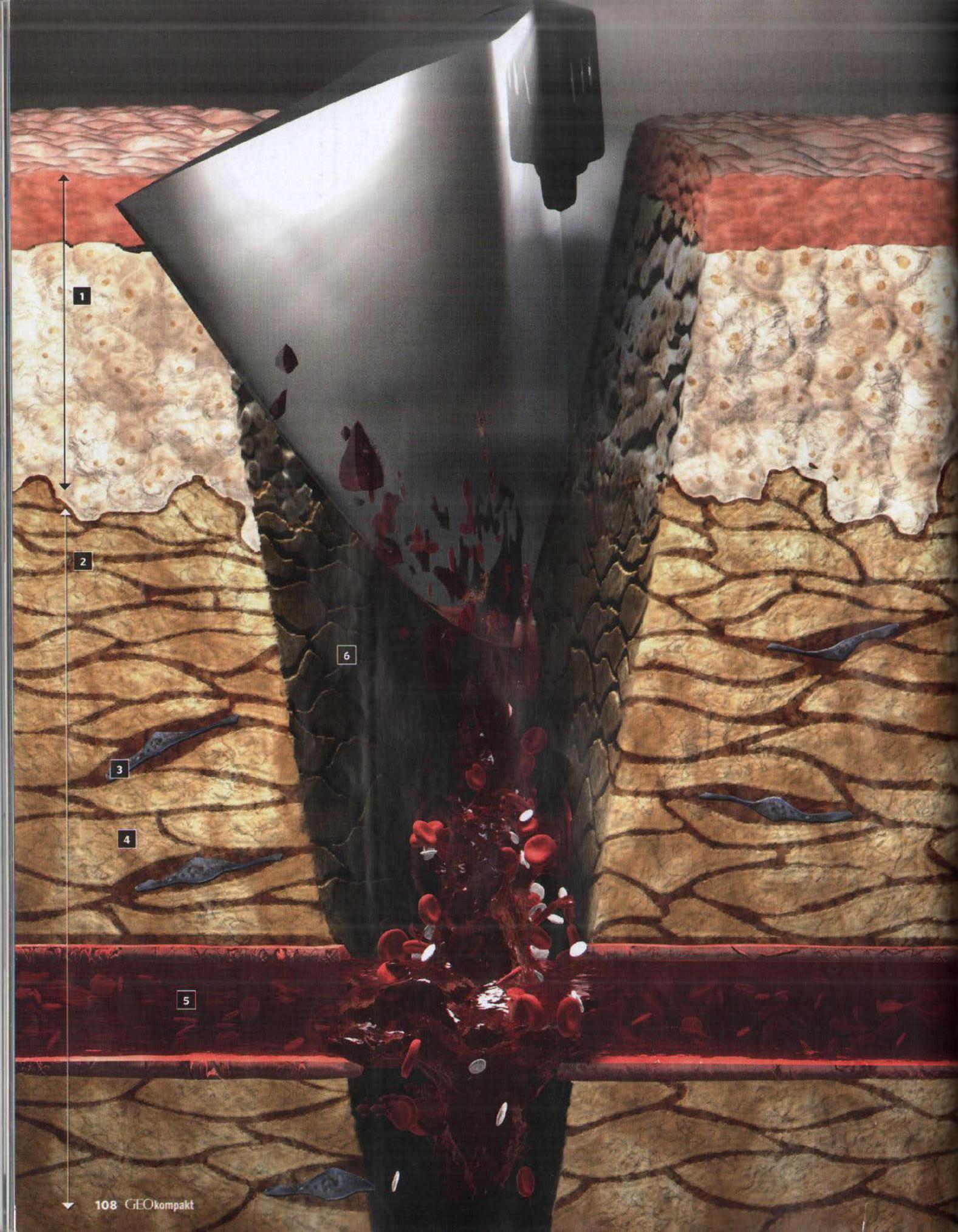
#### Memo: STRESS

- **Vor Jahrtausenden** entwickelte sich bereits die Stressreaktion, die unsere Vorfahren in bedrohlichen Situationen schützte.
- **Auch weil heute** oft der körperliche Ausgleich fehlt, setzt die Stressreaktion im Alltag den Körper unter Daueralarm.
- **Der Druck** kann das Immunsystem schwächen, Diabetes, Übergewicht, Herz-Kreislauf-Erkrankungen begünstigen.
- **Je weniger ein Mensch** über seine Arbeit selbst bestimmen kann, je tiefer er in der Hierarchie steht, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für schädlichen Dauerstress.
- **Ehrgeizige, reizbare Menschen**, die sich durch Unruhe und Ungeduld auszeichnen, gelten als besonders anfällig.

fen oder Flüchten“ gefunden – und die heißt: Jogging.

Doch selbst ohne sportliche Betätigung sind viele besser gegen Druck und Krankheit gefeit als andere.

**DENN AUCH UNSERE** individuelle Persönlichkeit bestimmt, was uns in Aufruhr versetzt. Als besonders stressanfällig haben Psychologen und Mediziner einen ganz bestimmten Charak-



# Die KRAFT der ERNEUERUNG

Wenn unser Körper eine Verletzung erleidet, dann kommt einer der spektakulärsten Prozesse der Natur in Gang: Durch Botenstoffe angeregt, repariert sich der Mensch wie durch ein Wunder mithilfe von Stammzellen selbst, errichtet alles von Grund auf neu. Wissenschaftler wollen diese Fähigkeit noch verbessern – und arbeiten an der Wiederherstellung ganzer Gliedmaßen

Text: Sebastian Witte Illustrationen: Tim Wehrmann

## 1. Stadium: DIE WUNDE

Verletzt ein Messer die menschliche Haut, zerstört der Schnitt – je nach Tiefe – gleich mehrere Gewebeschichten: Er zerteilt unter anderem die mit abgestorbenen Schuppen bedeckte Oberhaut (1) sowie die Lederhaut (2) mit den darin eingelagerten Bindegewebzellen (3) und -fasern (4) und zerreißt in dieser Schicht verlaufende Blutgefäße (5). Aus den Gefäßen strömt Blut in die Schnittverletzung (6). Doch schon Sekunden später beginnt das Wunder der Selbstheilung – eine komplexe Form der Reparatur, die vollkommen automatisch abläuft.

heoretisch könnte ein menschlicher Körper nur wenige Wochen überleben. Denn die Bausteine, aus denen unsere Knochen, Muskeln und Organe gemacht sind, nutzen sich unentwegt ab. Permanent gehen Zellen des Körpers zugrunde. Allein in der Haut verschleißt sich Tag für Tag fast eine Milliarde Zellen. Und jene schleimige Schicht, die unseren Dünndarm auskleidet und vor allem für die Aufnahme von Nährstoffen zuständig ist, stirbt innerhalb von ein bis drei Tagen sogar vollständig ab.

Nicht anders ergeht es den Stoffen in unserem Blut: Mehr als 200 Milliarden rote Blutkörperchen versagen täglich ihren Dienst. Auf ihrer Reise durch Arterien, Venen und winzige Gefäße nutzen sie sich derart stark ab, dass sie keinen Sauerstoff mehr transportieren können und in der Leber zersetzt werden.

Doch sosehr der Körper ein Ort des Niedergangs ist, sosehr arbeitet er gegen seine eigene Zerstörung an. Im Verborgenen sorgt ein ebenso genialer wie hochkomplexer Mechanismus dafür, dass er gerade so viel Leben erschafft, wie in gleicher Zeit vergeht. Stunde um Stunde erneuert und repariert sich unser Körper selbst. Bildet frische Hautzellen, die er aus unteren Lagen laufend nach oben schiebt, schwemmt Millionen neue Blutzellen in Adern und Gefäße, versieht die fältige, rund 200 Quadratmeter große Oberfläche des Dünndarms mit frischen Zellen.

Alle ein bis drei Tage ersetzt er die zierlichen Bläschen in unserer Lunge, in nicht einmal zwei Wochen tauscht er die Sehstäbchen in unseren Augen aus, und manches stark beanspruchte Knochenareal bildet er alle vier Monate neu.

In nur einem Jahr stellt der menschliche Körper auf diese Weise gewissermaßen sechs neue Harnblasen, acht Luftröhren, 18 Lebern, 25 Hautabdeckungen, 192 Magenausgänge, 228 Dünndarmwände her. Und bildet Zeit seines Lebens tausendemal mehr neue Zellen, als die



## 2. Stadium: DAS PROVISORIUM

Das Blut, das sich in die Wunde ergossen hat, schwemmt Keime und Schmutz aus, dann gerinnt es: Ein keilförmiger Ppropf entsteht binnen Minuten aus roten Blutkörperchen (1) und Blutplättchen (2). Eine Art Klebstoff, das Fibrin (3), bildet ein Netz im Ppropf, das ihn fixiert. Die Blutplättchen - winzige Gebilde im Blut - ändern ihre Form. Aus Scheiben werden kugelartige Körperchen mit Fortsätzen (4), die sich im Klebstoff verhaken, das Gerinsel verdichten und die zerschnittenen Blutgefäße (5) verschließen. Die Blutung stoppt. Der Ppropf trocknet aus. Schorf entsteht (6), der die Wunde vorläufig versiegelt.

Milchstraße Sterne zählt. All der Müll, der dabei anfällt, wird ausgeschieden oder von speziellen Fresskommandos abgebaut.

In Notzeiten vermag unser Körper die Kräfte jener permanenten Selbstheilung sogar noch um ein Vielfaches zu steigern: Reißt unsere Haut beispielsweise zu einer Wunde auf, beginnt er binnen Sekunden damit, sie zu verschließen. Zerbirst ein Knochen, rekonstruiert er ihn weitgehend von Grund auf. Und kommt ein Teil unserer Leber etwa durch einen Unfall zu Schaden, bildet der Körper das verlorene Gewebe schneller neu als im Normalbetrieb.

Dafür benötigt er zwar bisweilen eine Auszeit, doch muss er keine lebenswichtigen Funktionen wie Atmung, Herzschlag oder Verdauung einstellen. Unser Körper repariert sich scheinbar mühelos.

Dabei sind die Anforderungen an eine Rekonstruktion enorm. Denn selbst ein winziger Schnitt in den Finger richtet Verheerendes an. Durch ein Mikroskop betrachtet, bietet sich ein Bild der Verwüstung: Millionen vernichteter Zellen, zerrissene Blutgefäße, zerfetzte Nervenfasern, durchtrennte Ge webeschichten, die von einer Heerschar eindringender, feindlicher Bakterien besetzt werden.

Und überall Blut.

Um der Zerstörung entgegenzuwirken, bedarf es einer koordinierten Aktion, die der Wiederherstellung eines zerstörten Gebäudes gleichkommt: Das Dach muss abgedichtet werden, Innenräume werden provisorisch abgestützt, es wird gesäubert, sortiert, wieder aufgebaut.

Wie aber schafft es unser Körper, sich immer wieder neu zu errichten? Wie stellt er die filigranen Strukturen wieder her?

Seit Langem beschäftigt diese Frage die Forscher. Doch erst allmählich entschlüsseln sie

die grundlegenden Prozesse der Selbstheilung – und beginnen in sie einzugreifen. Ihr Ziel ist nichts Geringeres, als die Grenzen des menschlichen Reparaturvermögens immer weiter zu verschieben.

Eines Tages, so die Vision, sollen abgetrennte Gliedmaßen neu wachsen – so selbstverständlich, wie unser Körper heute eine Schnittwunde oder einen Knochenbruch kuriert.

**WER VERSTEHEN WILL**, wie so etwas gelingen könnte, muss weit zurückblicken in die Geschichte der Evolution. Denn der Selbstheilung des menschlichen Körpers liegt ein seit Jahrtausenden bewährter Plan zugrunde. Ein Prinzip, das so alt ist wie das Leben selbst.

Als sich vor mehr als 3,5 Milliarden Jahren auf dem Grund des Ozeans der erste Organismus formte, vermochte er bereits ein Ebenbild seiner selbst zu erschaffen, eine Kopie. Eben diese Fähigkeit, gezielt Reproduktionen von sich selbst herzubringen, unterschied jene Urzelle von allem Anorganischen.

Mit jeder Verdopplung gab sie ihre Erbsubstanz weiter – also eine Anleitung, die den Nachkommen im Wesentlichen drei Dinge vorgab:

- wie ihr Inneres beschaffen ist;
- welche biochemischen Kreisläufe sie am Leben halten;
- wie die Zellteilung abläuft, damit die Vermehrung niemals zum Erliegen kommt.

So pflanzten sich die archaischen Einzeller durch ständiges Klonen fort. Ein Bakterium etwa

verdoppelte seine Erbinformation und spaltete sich in zwei Teile mit je einer Kopie. Die brachten ebenfalls Tochterzellen hervor. Alle diese Zellen waren genetisch völlig identisch. Denn das eigene Erbgut wurde noch nicht durch Sex vermischt, blieb also erhalten, prinzipiell für immer (nur bei fehlerhaften Teilungen kam es mitunter zu Abweichungen). So lebten zwar die Individuen nicht ewig, wohl aber ihr jeweiliger Bauplan.

Ein bis zwei Milliarden Jahre später aber erhoben sich manche Einzeller aus dem Mikrokosmos: Sie trennten sich aufgrund einer Mutation nach der Teilung nicht mehr, sondern blieben aneinander haften und bildeten die ersten größeren Körper.

Innerhalb dieser Lebensgemeinschaften übernahmen einige der Zellen schon bald besondere Aufgaben: Manche stabilisierten den Verbund mit einer äußeren Hülle oder bildeten winzige Geißeln aus und dienten so der Fortbewegung, andere übernahmen die Verarbeitung von Nahrung.

Auf diese Weise konnten aus den primitiven Zellhaufen nach und nach komplexere Geschöpfe reifen – die Vorläufer der Pflanzen, Tiere und Pilze.

Aus evolutionärer Sicht brachte die Vielzelligkeit immense Vorteile für das Überleben einer Art. Aus Sicht des Individuums folgte daraus jedoch etwas, das dem Leben gänzlich entgegensteht: der Tod.

Zwar konnten auch schon die Einzeller zugrunde gehen, konnten altern, abnutzen; doch zumeist teilten sie sich zuvor. Bei den Vielzellern aber hatte die Sterblichkeit völlig andere Konsequenzen.

Denn die Fähigkeit einzelner Zellen, besondere Formen oder Funktionen auszubilden, war mit einem Verlust verbunden: Zugunsten der Arbeitsteilung gaben die Zellen des Verbundes ihre Selbst-

zugrunde. Und kam es in den Tiefen der Meere zu einem Unfall, bei dem die äußere Hülle des frühen Vielzellers aufplatzte oder eine Geißel abgerissen wurde, gab es keine Möglichkeit, das Leck zu schließen oder einen verlorenen Teil zu ersetzen. Die spezialisierten Körperzellen konnten sich schlicht nicht neu erschaffen. Jede noch so winzige Verletzung zerstörte ein Geschöpf. Das Schicksal eines jeden Körpers war deshalb mit dem seiner schwächsten Bausteine unmittelbar verknüpft.

Womöglich wären also nie Formen höheren Lebens entstanden, hätten unter den ersten Vielzellern nicht manche einen Weg gefunden, wie sie ihre Bausubstanz im Kleinen erneuern und so auch Schäden im Größeren beheben konnten.

Sie entwickelten einen besonderen Zelltyp, der keine spezifische Aufgabe besaß – die Stammzelle. Von den spezialisierten Körperzellen unterschieden sich diese Gebilde durch zwei Fähigkeiten, die sie zu universellen Werkzeugen eines jeden Organismus machten: Zum einen waren sie in der Lage, sich unbegrenzt zu teilen und immer neue Zellen hervorzubringen. Zum anderen konnte ein Teil von ihnen auf sämtliche im Erbgut hinterlegten Baupläne und An-

leitungen zugreifen und sich so in allen Zelltypen des Körpers entwickeln.

Damit hatte die Natur zwei Klassen von Zellen geschaffen: Spezialisten und Generalisten.

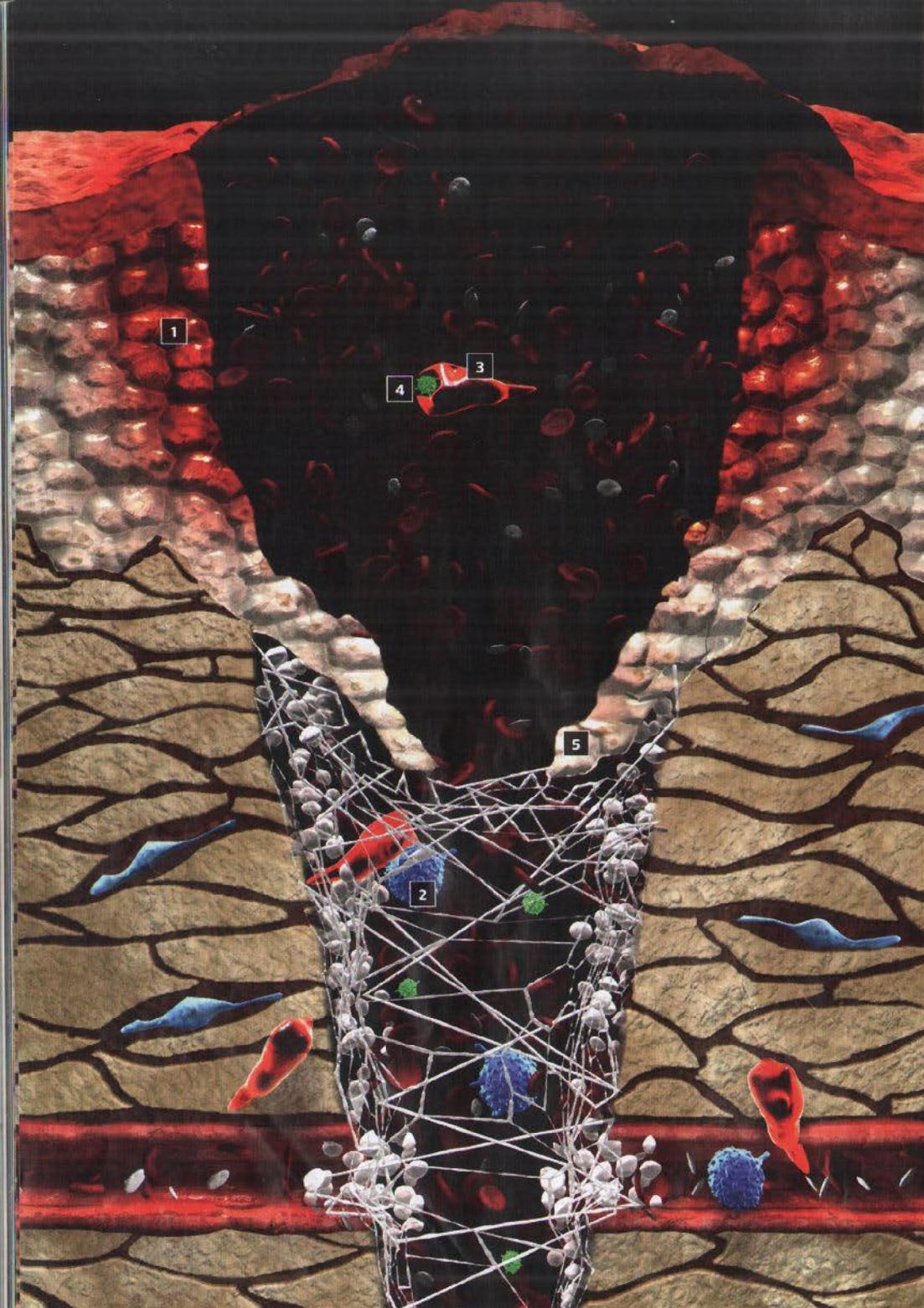
Während die Spezialisten auf bestimmte Funktionen festge-

## Stammzellen steuern alle Erneuerungsprozesse der Lebewesen – auch die des Menschen

ständigkeit auf und damit die Eigenschaft, sich duplizieren zu können. Wenn sie irgendwann nicht mehr in der Lage waren, ihren Dienst zu tun, starben sie – und konnten sich auch nicht mehr klonen.

Mit den Spezialisten hatte die Natur also den programmierten Tod hervorgebracht, er war Teil des Lebens geworden.

Für die Vielzeller, die sich schon bald aus Millionen Einheiten zusammensetzten, war dies fatal: Stellten nur einige wenige gealterte Zellen ihre Arbeit ein und starben, ging der gesamte Organismus



### 3. Stadium: DAS AUFRÄUMEN

Das verletzte Gewebe entzündet sich: Es wird stark durchblutet (1), erwärmt und lockert sich. Das lässt Zellen des Immunsystems leichter eindringen. Einige, die Fresszellen (2), beginnen mit der Säuberung, beseitigen Blutkörperchen und Zelltrümmer. Andere Immunzellen, die Granulozyten (3), zerstören eingedrungene Mikroben (4), die der Blutschwall nicht davongespült hat. Unterdessen beginnt die Rekonstruktion: Mithilfe eines komplexen Mechanismus teilen sich Stammzellen, wandeln sich zu Zellen der Oberhaut, vermehren sich und wachsen unterhalb des Pflaumes zu einer neuen Schicht zusammen (5).

legt waren, übernahmen die Generalisten die Rolle eines natürlichen Reparatur- und Erneuerungskommandos. Sie wurden immer dann aktiviert, wenn der Körper irgendwo Schaden nahm oder einzelne Zellen ersetzt werden mussten. Kam es etwa zu einem Defekt in der Körperhülle, erzeugten die dortigen Stammzellen durch Teilung neue Zellen, die dann in die benötigten Zellen ausreiften.

Botenstoffe beeinflussten, ob sich eine Blutstammzelle beispielsweise zu einer Antikörper produzierenden Abwehrzelle oder zu einem Sauerstoff transportierenden roten Blutkörperchen entwickelte.

Bis heute steuern Stammzellen die Selbstheilungsprozesse sämtlicher Geschöpfe – auch die des Menschen. Sie bilden bereits den frühen Embryo, verändern jedoch nach kurzer Zeit ihre Gestalt.

Forscher unterteilen sie daher in zwei große Übergruppen: embryonale und erwachsene (adulte) Stammzellen.

Embryonale Stammzellen sind nur während der Entstehung eines Lebewesens im Mutterleib aktiv und können sich in nahezu alle Zellarten verwandeln, adulte hingegen nur noch in bestimmte.

Deshalb vermögen jene adulten Stammzellen, die beispielsweise in der Haut eingelagert sind, nur all jene Zelltypen neu zu bilden, aus denen die Haut aufgebaut ist. Und jene Stammzellen, die sich im Knochenmark (wo das Blut gebildet wird) finden, können nur Bestandteile des Blutes formen.

Es ist wie beim Hausbau: Aus wenigen Grundstoffen wird alles errichtet – aus Holz werden Türen, Fenster, Dachbalken und Parkett, aus Beton Wände und Decken, aus Metall Armaturen, Rohre und Dachrinnen.

Die adulten Stammzellen bilden so, in die verschiedenen

Körpergewebe eingebettet, eine Art lebenslanges natürliches Reservoir überall im Organismus (ein zentrales „Lager“ gibt es nicht), aus dem der Körper kranke, verbrauchte oder zerstörte Zellen immer wieder ersetzen kann. Und das sich selber immer wieder neu bestückt.

**DIESES PRINZIP** hat der Tier- wie auch der Pflanzenwelt erstaunliche Möglichkeiten beschert. Insbesondere jene simpel gebauten Kreaturen, die früh in der Geschichte der Evolution auftauchten – Quallen und Polypen etwa –, haben sich einen besonders großen Vorrat an Stammzellen zugelegt und so die Mechanismen der Selbstheilung perfektioniert.

Beim Süßwasserpolyphen *Hydra* machen sie sogar mehr als 30 Prozent des gesamten Körpervolumens aus. „Damit ist *Hydra* im Grunde nichts weiter als ein Sack von Stammzellen“, so der Kieler Zoologe Thomas Bosch, der die etwa fünf Zentimeter großen Hohltiere erforscht.

Der große Bestand an Stammzellen ermöglicht dem Polypen bemerkenswerte Leistungen: So kann er mithilfe seiner Generalisten innerhalb von nur fünf Tagen sämtliche Körperzellen durch neue austauschen, sich also vollständig neu erschaffen.

Das bedeutet: *Hydra*-Individuen altern zwar, erneuern sich aber fortwährend – und sind damit im Prinzip unsterblich: In seinem Labor hat Thomas Bosch es mit Polypen zu tun, die, wie er vermutet, vier bis fünf Millionen Jahre alt sind.

Die Unsterblichen können aber noch mehr: Sie schnüren einen Teil des Gewebes zu Knospen und bilden so Nachkommen. Schneidet man ihnen den mit giftigen Nesseln besetzten Kopf ab, formen sie ihn einfach neu – mitsamt all seinen Nervenzellen und Fortsätzen, etwa den Fangarmen.

Und zerstückelt man das Weichtier in bis zu 280 Einzelteile, wächst aus jedem ein voll funktionsfähiges neues Tier heran.

Wie dies genau abläuft, haben Forscher bis heute nur in Ansätzen verstanden. Fest steht aber, dass auch viele andere Tiere, etwa einige Amphibien, Fische oder Krebse über die Fähigkeit verfügen, Körperteile zu ersetzen.

Selbst nach einem größeren Schaden verenden zum Beispiel Salamander, Zebrafische oder Regenwürmer nicht zwangsläufig. Verlieren sie im Kampf oder bei einem Unfall Bein, Flosse oder ein anderes Körperteil, bilden Stammzellen Unmengen neuer Bausteine und stellen die Extremitäten kurzerhand wieder her.

Wie Wissenschaftler inzwischen herausgefunden haben, verstehen sich die Tiere dabei auf einen zusätzlichen, offenbar entscheidenden Trick. Nach einer Amputation gelingt es einigen der Spezialisten unter den Zellen, ihre bisherige Funktion gleichsam zu „vergessen“ und wieder zu Generalisten zu werden: Sie versetzen sich in eine Art embryonalen Zustand zurück.

Nachdem die Wunde in den ersten Tagen mit einer schützenden Haut überdeckt wurde, häufen sie ein wulstiges Gebilde an, ein Blastem. Und so wie die Zellen eines Embryos gleichsam „wissen“, wie sie einen vollständigen Körper bilden müssen,

anschließend legen sie die Konturen des fehlenden Gliedes fest und reifen am Ende in die jeweils benötigten Gewebetypen aus.

**EINE SOLCHE** Instandsetzung ist einer der komplexesten biologischen Prozesse überhaupt. Doch auch die – nicht ganz so weitgehenden – Reparaturvorgänge im menschlichen Körper sind kaum minder aufwendig und werden von Stammzellen dirigiert.

Die befinden sich in bestimmten Zonen eines jeden Gewebes, wenn auch in geringer Zahl. So sind gerade einmal ein bis drei Prozent aller im Knochenmark vorkommenden Zellen Stammzellen. Dennoch vermögen die Winzlinge alle Zelltypen des Blutes durch Teilung immer wieder neu zu erschaffen, darunter die roten Blutkörperchen – von denen sie pro Sekunde mehrere Millionen produzieren.

In mehr als 25 verschiedenen Körperregionen haben Wissenschaftler mittlerweile Stammzellen nachgewiesen, so im Gehirn, in der Skelettmuskulatur, im Herzen, in der Leber oder im Knochenmark.

Bei einer Verletzung, etwa nach einem Schnitt in die Haut, arbeiten meist verschiedene Stammzellen im Verbund. Der Heilvorgang folgt dabei einer festgelegten Dramaturgie.

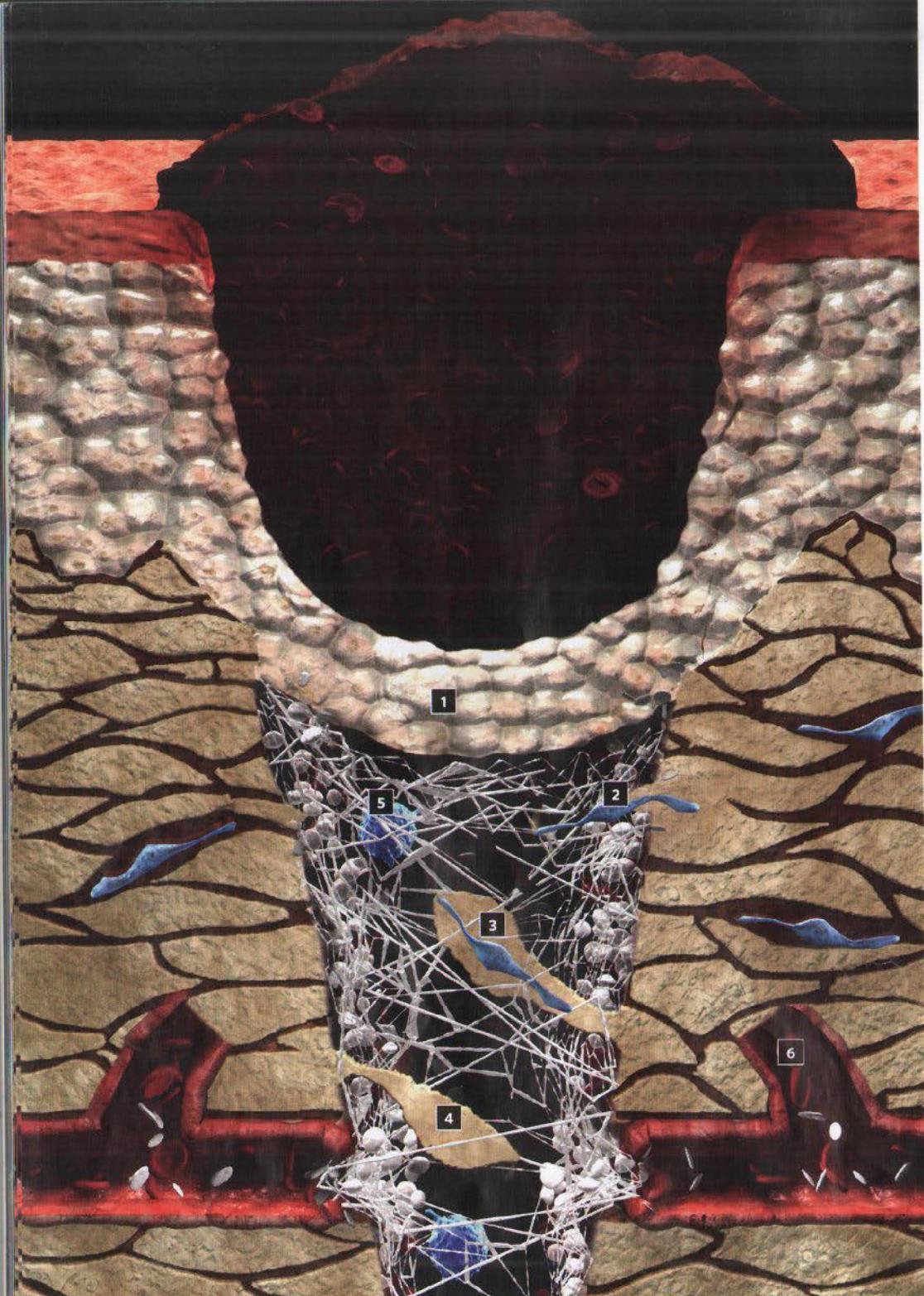
### **1. Die Blutung stoppen**

Bereits wenige Sekunden nach der Verletzung verengen sich die zerrissenen Gefäße (siehe Illustration Seite 110). Ausströmendes Blut, das durch den

## Hat die schnelle Vernarbung von Wunden zum Siegeszug der Säugetiere beigetragen?

„kennen“ auch die nun wieder embryonalartigen Zellen des Blastems die nötigen Pläne und Programme, um die fehlende Extremität neu zu bauen.

Auf welche Weise die beteiligten Zellen dabei miteinander kommunizieren, ist bislang noch großteils unbekannt. Welche Informationen dabei weitergegeben werden, können Biologen aber zumindest erahnen: In einem komplexen Feuerwerk aus Signalen tauschen sich die embryonalartigen Zellen zunächst über das Ausmaß des Schadens aus. Dann bestimmen sie, wo genau im Körper sie sich befinden und wie häufig sie sich vermehren müssen.



#### 4. Stadium: **DER WIEDERAUFBAU**

Die neue Hautschicht unter dem Ppropf hat sich bereits geschlossen (1). Nun teilen sich Stammzellen und wandeln sich in weitere Fibroblasten (2), Zellen des Bindegewebes, die in die Zone unterhalb des Ppropfes eindringen. Unter dem Einfluss von Signalstoffen formt sich daraus neues Bindegewebe (3, 4), das die Wundöffnung nach und nach verschließt. Während Fresszellen (5) die letzten Zelltrümmer beseitigen, entsteht ein Bypass um die zerschnittene Ader: Aus Stammzellen erwächst ein neues Blutgefäß, das in der Form eines Bogens heranreift (6).

Schnitt an die Oberfläche tritt und eingedrungenen Schmutz sowie Keime davonspült, versieg nach und nach. Das Leck beginnt sich zu schließen. Dabei laufen komplexe biochemische Prozesse ab, die unter anderem bewirken, dass die Blutplättchen (ein Bestandteil unseres Körpersaftes) ihre Form ändern: Aus flachen, weichen Scheiben werden kugelförmige Gebilde mit winzigen Fortsätzen. Innerhalb von zwei bis vier Minuten kitten sie sich in der Wunde zu einem keilförmigen Ppropf zusammen – die Blutung stoppt.

#### 2. Die Wunde abdichten

Gleichzeitig kommt die Gerinnung in Gang, jener Vorgang, bei dem sich durch den Ppropf ein feines Netz aus Fibrin spannt. Das ist ein besonderes Eiweiß, das sich mitsamt den verschiedenen Blutzellen zu einem festen, unlöslichen Bluterinnernde verdichtet und an seiner Oberfläche rasch eintrocknet. Es entsteht ein undurchdringlicher, schützender Schorf, der die Wunde provisorisch stopft.

#### 3. Eindringlinge abwehren

Die Zone um die Wunde wird nun wieder stärker durchblutet, erwärmt sich und errötet. Das umliegende Gewebe lockert sich auf, lagert Flüssigkeit ein und schwillt an. Dadurch können vermehrt Abwehr- und Räumtrupps des Immunsystems in das Wundgebiet dringen. Spezielle Fresszellen etwa verleben sich eingedrungene Mikroben, abgestorbene Körperzellen und Zelltrümmer ein (siehe Seite 112). All das spüren wir als schmerzende Entzündung.

#### 4. Die Haut wieder aufbauen

Nun sorgen Stammzellen für die eigentliche Rekonstruktion. Nach einem hochkomplizierten Umwandlungsprozess benutzen sie das Fibrin des Ppropfes als Klettergerüst und beginnen, an-

geregt durch verschiedene Signalfstoffe, zu wachsen. Auf diese Weise bilden sie nach und nach neues Gewebe (siehe Seite 114).

Bei einer Schnittwunde etwa reifen nun einige zu röhrenartigen Gebilden aus, aus denen sich neue Blutgefäße entwickeln. Andere formen sich zu frischen Bindegewebzellen oder solchen, die beschädigte Gewebe schichten von den Wundrändern her wieder aufzubauen.

In diesem letzten Stadium laufen die Reparaturprozesse langsamer ab als bei den ersten Notmaßnahmen. Dennoch ist der gesamte Vorgang eher auf Schnelligkeit ausgelegt als auf Präzision. Neue Fasern etwa fügen sich nicht wie bei gesundem Gewebe zu einem filigranen Maschenwerk zusammen, sondern wachsen parallel und dicht an dicht. Das geht wesentlich

Ähnlich komplex verläuft die Reparatur bei einem Knochenbruch: Zwei Arten von Stammzellen reifen in den Zellen der betroffenen Knochenregion aus und bauen ein stabilisierendes Gerüst um die Bruchstelle auf. Eine weitere Stammzellart bildet neue Blutgefäße zur Versorgung des Knochens.

Stets koordinieren etliche Signalfstoffe diese Heilvorgänge. Sie bewirken, dass der Körper auf Verletzungen nach dem immer gleichen Muster reagiert und das Ensemble der beteiligten Zellen nicht aus dem Takt gerät.

**ANDERS ALS SALAMANDER** oder Zebrafische aber ist der Mensch nicht in der Lage, ganze Extremitäten heranwachsen zu lassen. Vielmehr hat *Homo sapiens* sich im Laufe seiner Stammesgeschichte darauf verlegt, eine Wunde möglichst rasch zu verschließen. Statt wie der Lurch auf ein ureigenes embryonales Entwicklungsprogramm zurückzugreifen, bildet unser Körper nur einen Schorf aus und versiegelt die Wunde mit einer lederartigen Narbe.

Das mutet wie ein Rückschritt in der Geschichte der Evolution an. Doch der Verzicht auf eine Gliedmaßenreparatur muss für die Säugetiere und damit auch den Menschen vorteilhaft gewesen sein, sonst hätte er sich nicht durchgesetzt.

Zwar können Forscher nicht mit Sicherheit sagen, weshalb einige Amphibien-, Fisch- oder Krustentierspezies diese wunderbar anmutende Fähigkeit hervorgebracht haben, andere, ihnen nahe verwandte Arten hingegen nicht. Doch die Wissenschaft kann zumindest spekulieren, weshalb der Mensch die Reparatur nicht beherrscht.

Die These: *Homo sapiens* wäre mit den Fähigkeiten eines Lurches nicht gedielt. Denn so wie die meisten großen Landtiere muss auch der Mensch täglich enorme Mengen Energie zu sich nehmen. Das aber bedeutet: Es würde sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, um etwa einen Teil seines Armes vollständig zu restaurieren. Und weil der Betroffene sich währenddessen nicht mehr um

die Beschaffung von Nahrung kümmern könnte, würde er vermutlich sterben.

Genau dies verhindert die Narbe. Sie verschließt den Stumpf rasch und macht den restlichen Körper so schnell wie möglich wieder einsatzbereit.

Vermutlich sind zudem die Anforderungen bei der Wiederherstellung großer Gliedmaßen ungleich komplexer; im Wirrwarr der Signale könnten Stammzellen falsche Anweisungen erhalten und ungebremst Zellen bilden. Wucherungen und schwere Behinderungen wären die Folge.

So war es vielleicht auch der schnelle Wundverschluss, der neben vielen anderen Faktoren zum Siegeszug der Säugetiere beigetragen hat.

Zumindest scheint das Verfahren derart effizient gewesen zu sein, dass es heute bei nahezu allen inneren und äußeren Verletzungen des menschlichen Körpers angewendet wird – um den Preis jedoch, dass dadurch eine vollständige Regeneration mancher Organe und Gewebe unmöglich ist.

So verhindern die großen, starren Narben, die beispielsweise nach einem Herzinfarkt im Herzmuskel entstehen, dass die zuständigen Stammzellen abgestorbene Muskelgewebe durch neues ersetzen.

Und die Enden zerborstener Nervenstränge im Rückenmark vernarben derart schnell, dass sich nicht genug neue Nervenzellen bilden können, um die Fasern wieder miteinander zu verbinden: Hat sich die Narbe erst einmal ausgewachsen, dringen die Zellen nicht mehr durch sie hindurch.

**WEGEN DIESER** Probleme hat sich die Wundforschung zu einer der eindrucksvollsten Disziplinen der Medizin entwickelt. Vor allem gehen Wissenschaftler der Frage nach, wie man in den Prozess der Narbenbildung eingreifen und ihn womöglich unterbinden kann.

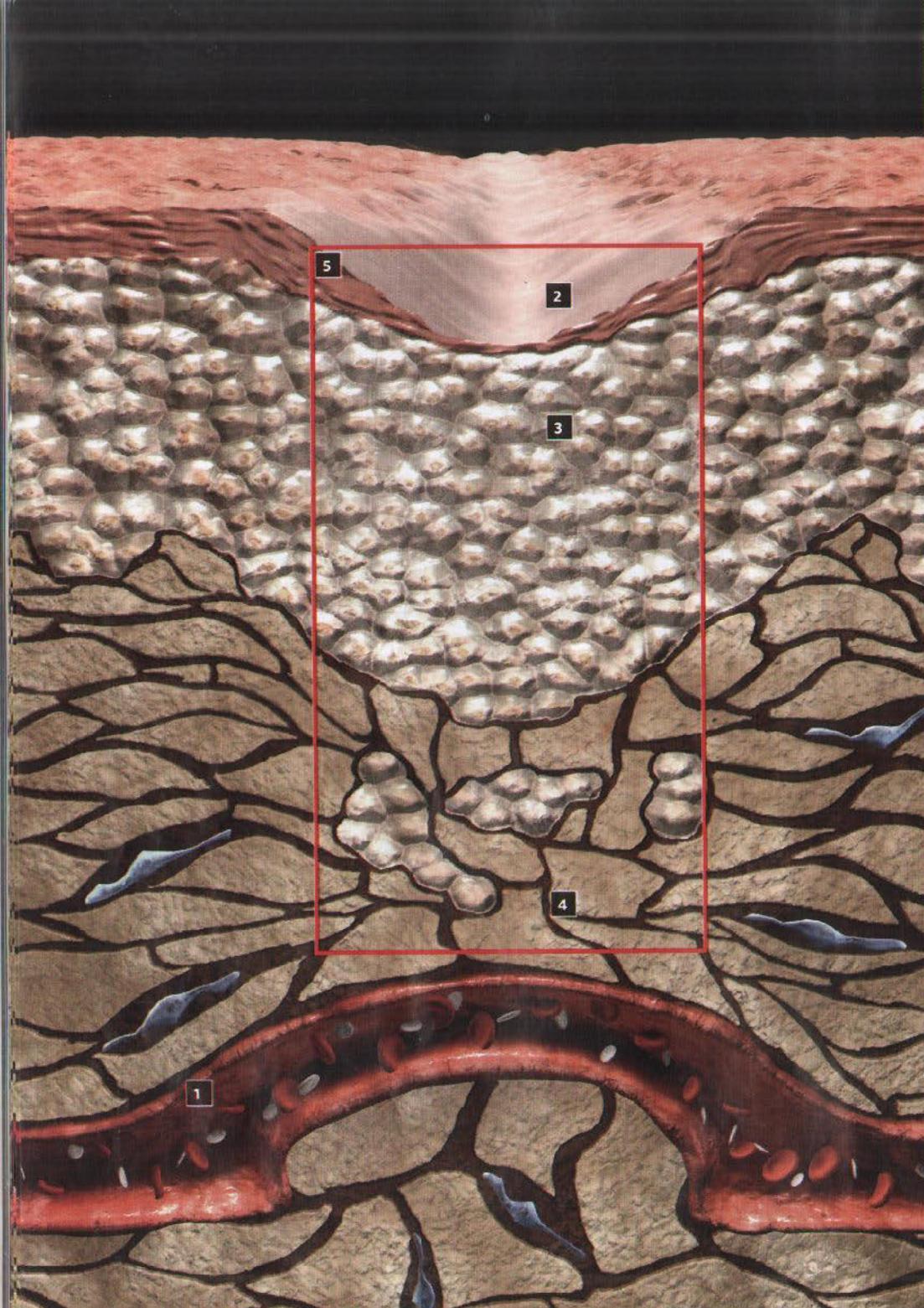
Bei kleineren Abschürfungen ist Leipziger Forschern genau das bereits gelungen: Nachdem sie die Stammzellen der Haut mit Wachstumsstoffen gezielt stimuliert und zusätzliche Stammzellen in den Wundherd eingebracht hatten, gelang es ihnen, die Blessuren vollständig

#### Memo: WUNDHEILUNG

- **Ständig erneuert** sich der Körper, ersetzt täglich etwa Hautzellen, Blutkörperchen, Knochenteile oder Sehstäbchen der Augen.
- **Bei einer Wunde** steigt er diese permanente Erneuerung um ein Vielfaches, rekonstruiert ganze Gewebe von Grund auf neu.
- **Im Heilungsprozess** teilen und wandeln sich Stammzellen, bilden bald darauf verschiedene Gewebetypen heran.
- **In mehr als 25 Regionen** unseres Körpers haben Forscher Stammzellen entdeckt, so in der Haut, im Gehirn und in der Leber.

rascher, hinterlässt aber ein relativ steifes, blasses Gewebe: eine Narbe.

Der Haut fehlt daher nach der Reparatur oft vieles von ihrer ursprünglichen Ausstattung – etwa Haarfollikel, Schweißdrüsen oder Nervenzellen.



### 5. Stadium: DIE NARBE

Das neue Blutgefäß hat sich gebildet (1), der Schorf sich abgelöst, zurück bleibt eine blasses Einbuchtung (2). Darunter liegt neu entstandene Oberhaut (3) sowie frisches Bindegewebe (4). Anders als bei gesunder Haut hat sich das neue Gewebe nicht geordnet zusammengefügt, sondern ist chaotischer und sehr verdichtet gewachsen – denn die Heilung war eher auf Schnelligkeit ausgelegt als auf Präzision. Dieser Prozess hinterlässt ein recht steifes Gewebe: eine Narbe (Kasten, 5). Deshalb gibt es in einer verheilten Wunde weder Haarfollikel noch Schweißdrüsen oder Nervenzellen.

zu regenerieren. „Die Haut heilt Narbenfrei“, sagt Augustinus Bader, Leiter der Arbeitsgruppe Stammzelltechnologie an der Universität Leipzig.

Nicht ausgeschlossen, dass Ärzte mit ähnlichen Methoden, vor allem der Transplantation von Stammzellen, irgendwann auch die Vernarbung anderer Gewebe, etwa im Herzen oder Rückenmark, abwenden können. Gelänge dies, wäre das Selbstheilungsvermögen unseres Körpers geradezu vollkommen.

Einige Forscher erhoffen sich aber noch weit mehr: Sie wollen herausfinden, wie sehr wir auf unser embryonales Entwicklungsprogramm zurückgreifen und nach einer Amputation ganze Extremitäten neu bilden könnten. So gelang es Wissenschaftlern der Tulane University in New Orleans vor Kurzem, bei einer neugeborenen Maus eine abgetrennte Zehenspitze nachwachsen zu lassen. Der Erfolg lässt sie hoffen, in ferner Zukunft auch beim Menschen ähnliche Prozesse in Gang zu setzen.

Finanziert wurde das Experiment vom US-Verteidigungsministerium. Die Aussicht, die Kunst der Selbstheilung von Lurchen und Mäusen lernen zu können, beflogelte die Militärs derart, dass sie mehr als 260 Millionen Dollar investiert haben, um gleich mehrere Forscherteams an einer Gliedmaßenreparatur des Menschen arbeiten zu lassen. Denn nichts zermürbt die Moral eines Soldaten mehr als ein verstümmelter Kamerad.

Und so träumen manche Generäle vermutlich schon längst von einem Soldaten, der sich nach dem Gefecht immer wieder neu erschafft, ohne die geringsten Verletzungsspuren. □

**Sebastian Witte**, 28, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg. **Tim Wehrmann**, 36, Hamburger Illustrator, hat neben diesen Zeichnungen auch die Grafik auf Seite 71 erstellt.

# Anatomie des Wissens mit 9% Ersparnis!

Lesen oder verschenken Sie ein Jahr GEOkompa<sup>t</sup>  
und freuen Sie sich über ein Geschenk Ihrer Wahl.

Gratis  
zur Wahl!!



## 1. LAMY-Schreib-Set

- Druckbleistift und Kugelschreiber
- mit abgefertigtem Clip
- aus feinstem Edelstahl
- im stilvollen Klapp-Etui



## 2. Soundbox

- Radio und Dockingstation für MP3-Player
- trendiges Retro-Design
- kompaktes Format
- Maße: ca. 10 x 9,5 x 5,5 cm



## 3. Reiserollentasche

- bequemer 2-stufiger Teleskop-Zugriff
- extragroße Leichtlaufrollen
- praktische Innengurte und viele Fächer
- Maße: ca. 55 x 26 x 35 cm

Ja, ich möchte GEOkompa<sup>t</sup> ...

... selbst lesen! Bestell-Nr. 774 949

... verschenken! Bestell-Nr. 774 951

... als Student lesen!

Bestell-Nr. 774 952

Senden Sie mir bzw. dem Beschenkten GEOkompa<sup>t</sup> ab der nächsterreichbaren Ausgabe zum Vorzugspreis von zzt. nur € 7,75 (D)/€ 8,95 (A)/Fr. 16.– (CH) pro Ausgabe (inkl. MwSt. und Versand) statt € 8,50 (D)/€ 9,80 (A)/Fr. 17,60 (CH) im Einzelkauf (Studenten zahlen nur € 6,60 (D) pro Ausgabe und legen bitte ihre Immatrikulationsbescheinigung bei). GEOkompa<sup>t</sup> erscheint zzt. 4x im Jahr. Mein Geschenk erhältte ich nach Zahlungseingang. Nach 1 Jahr kann ich das Abonnement jederzeit beim GEOkompa<sup>t</sup>-Kunden-Service, 20080 Hamburg, kündigen. Im Voraus bezahlte Beträge erhältte ich dann zurück. Dieses Angebot gilt nur, solange der Vorrat reicht.

Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen)

Name, Vorname

Geburtsdatum

19

Straße, Hausnummer

PLZ Wohnort

Telefonnummer E-Mail-Adresse

Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner + Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren

Ich bezahle bequem per Bankeinzug: (jährliche Abbuchung)

Bankkarte

Kontonummer

Geldinstitut

Ich zahle per Rechnung.

Ich verschenke GEOkompa<sup>t</sup> an:  
(bitte nur ausfüllen, wenn Sie GEOkompa<sup>t</sup> verschenken möchten)

Name, Vorname des Beschenkten

Geburtsdatum

19

Straße, Hausnummer

PLZ Wohnort

Telefonnummer E-Mail-Adresse

Als Geschenk wähle ich: (bitte nur 1 Kreuz machen)

1. LAMY-Schreib-Set

2. Soundbox

3. Reiserollentasche

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung beim GEOkompa<sup>t</sup>-Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z. B. E-Mail oder Brief) widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum

Unterschrift

Bestellen leicht gemacht:

Per Post:

GEOkompa<sup>t</sup>-Kunden-Service,  
20080 Hamburg

Per Telefon: (Bitte Bestell-Nr. angeben)

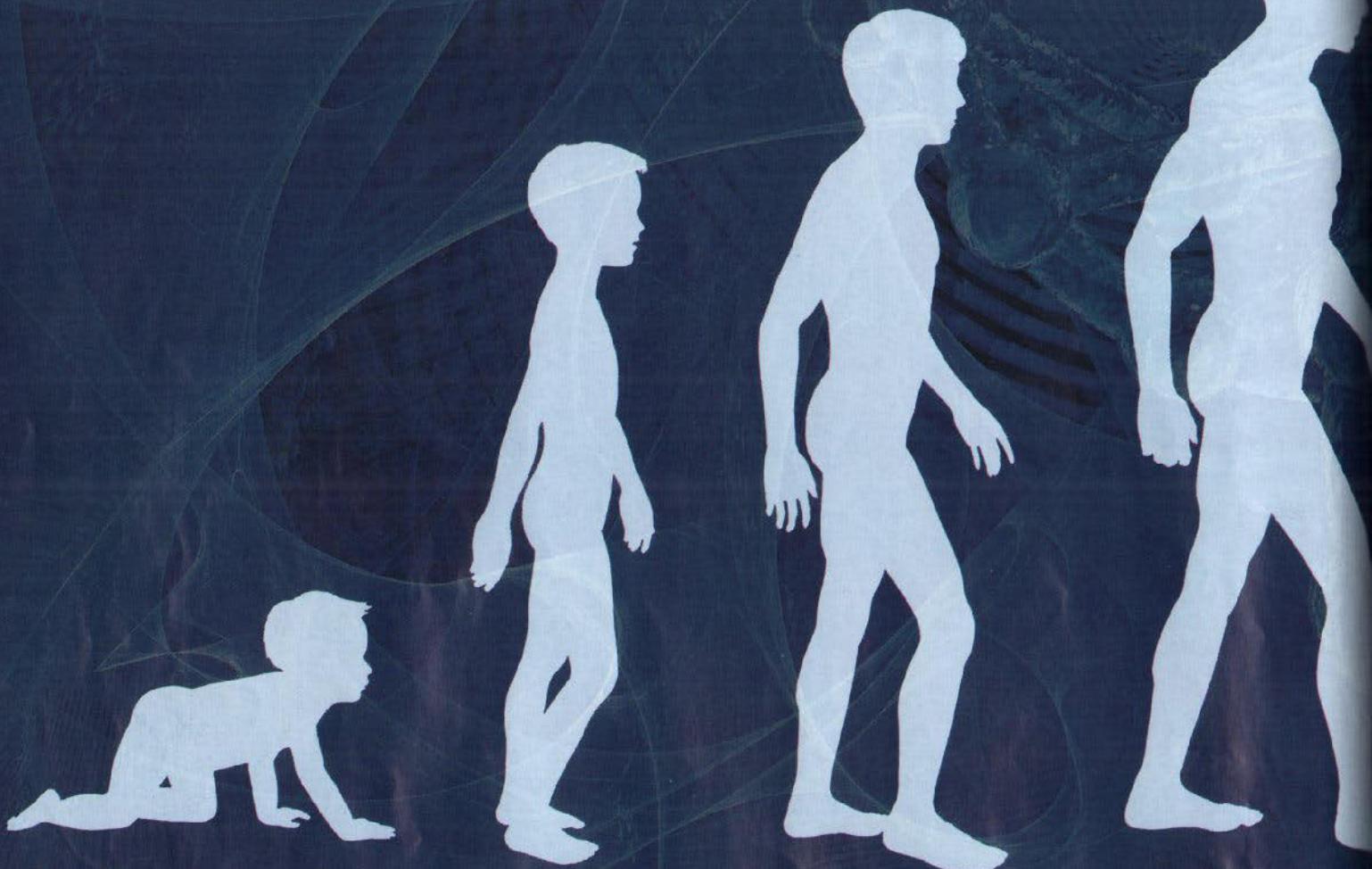
01805/861 80 00

14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.

Abonnenten-Service Österreich und Schweiz: +49 1805/861 00 00

Online mit noch mehr Angeboten:  
[www.geokompakt.de/abo](http://www.geokompakt.de/abo)

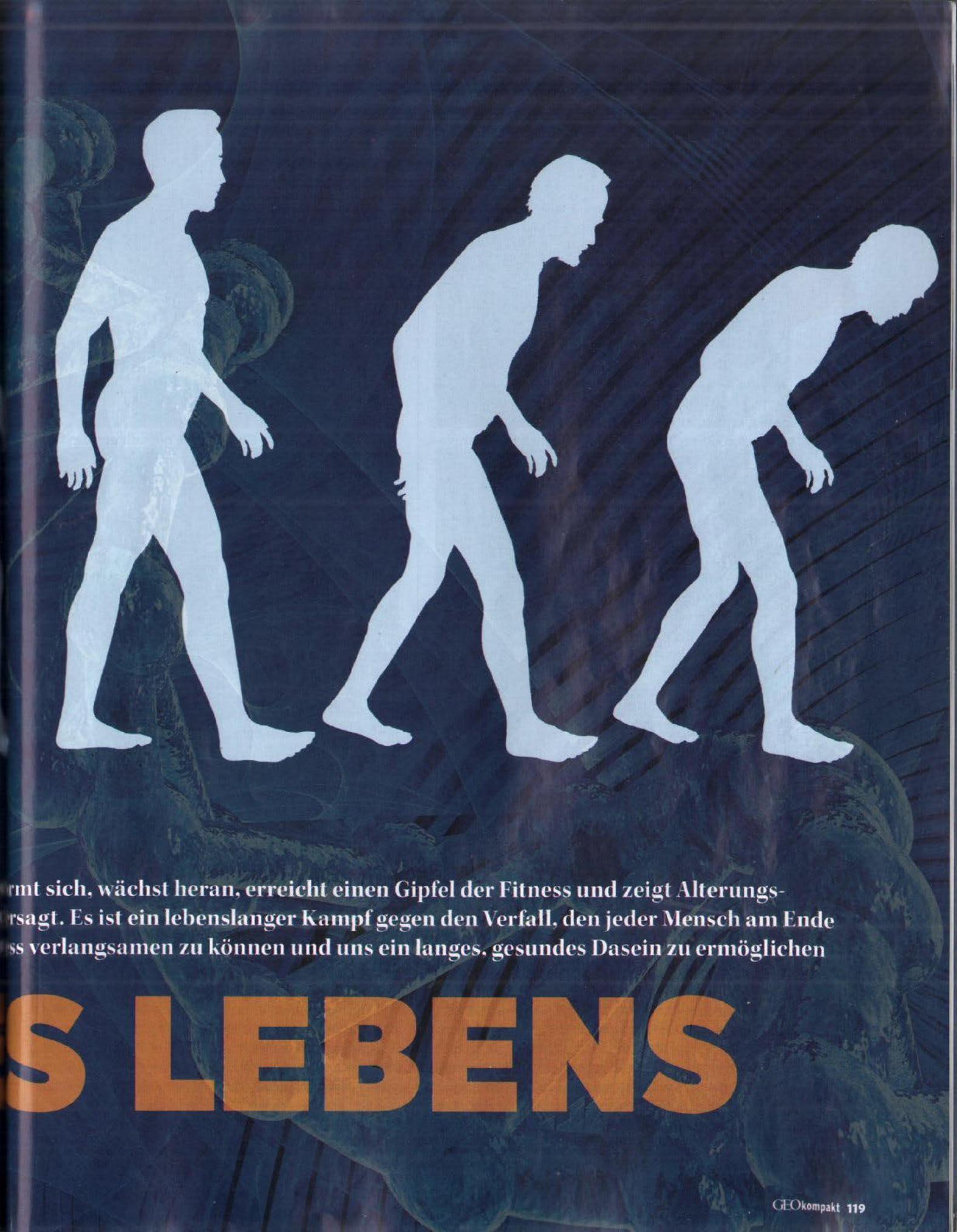
Der Lebensweg des Menschen endet mit Alter und Gebrechen. Sind Schäden an der Erbsubstanz die Ursache – oder begrenzt eine innere Uhr die Zeit unseres Daseins?



Die Entwicklungsstadien eines Menschen

Im Grunde ähnelt das Leben eines Menschen dem Erklimmen eines Berges: Der Körper erscheint, die ihn allmählich schwächer und anfälliger machen, bis er schließlich verliert. Dennoch versuchen Mediziner, die Signale des Alterns zu deuten – um den Prozess

# DIE UHR DER



ermt sich, wächst heran, erreicht einen Gipfel der Fitness und zeigt Alterungs-  
sagt. Es ist ein lebenslanger Kampf gegen den Verfall, den jeder Mensch am Ende  
ss verlangsamen zu können und uns ein langes, gesundes Dasein zu ermöglichen

# S LEBENS

# S

Text: Henning Engeln

seit mehr als dreieinhalb Milliarden Jahren versucht das Leben Ordnung zu schaffen. Es konstruiert sich ständig selbst, indem es aus chaotisch durcheinander-taumelnden chemischen Bausteinen, komplizierte Molekülketten zusammenfügt und daraus biochemische Fabriken baut: die Zellen. Die wiederum können fast alles, was sie benötigen, selbst herstellen und sich zu immer größeren Systemen zusammenschließen, den Organismen.

Im Verlauf der Evolution hat die Natur aus solchen Zellen immer aufwendigere Lebensformen entworfen – Pflanzen, Pilze, Tiere – und schließlich das komplexeste System des Universums hervorgebracht: den menschlichen Körper und dessen Gehirn. Sie hat also aus einfachsten chemischen Bausteinen eine ans Wunderbare grenzende Lebensmaschine hervorgebracht und in das totale Chaos eine großartig organisierte Ordnung gebracht.

Doch eines kann der *Homo sapiens*, dieses intelligente Produkt der biologischen Entwicklung, bislang nicht: den eigenen Tod besiegen.

Wohl jeder, der schon einmal einen ihm nahestehenden Menschen verloren hat und dessen Leichnam kurz nach dem Ableben anblickte, war von dem Unterschied zwischen Leben und Tod eigenartig berührt: Der Ver-

Es ist diese Kraft des Lebens, die den Körper mit dem Tod wie ein magisches Fluidum verlässt. Wenn sie fehlt, setzt sofort der Prozess des Verfalls ein. Der Leichnam beginnt sich zu zersetzen und letztlich aufzulösen.

**DAS ENDE** naht mit dem Moment, in dem das Herz zu schlagen aufhört. Damit kommt der Kreislauf zum Erliegen, das Blut kann den Organen und Geweben keinen Sauerstoff und keine Nährstoffe mehr bringen. Nervenzellen überstehen diesen Zustand nur für etwa acht bis zehn Minuten. Dann übertragen sie keine elektrischen Impulse mehr und sterben ab; die Funktion des Gehirns erlischt, der Mensch ist im medizinischen Sinn tot.

Ab hier nimmt das Chaos, das Ungeordnete, das Unberechenbare seinen Lauf. Denn die unbelebte Natur hat einen starken Hang zur Unordnung, wie ein deutscher Physiker bereits im Jahr 1865 herausfand. Diese von den Wissenschaftlern „Entropie“ genannte Größe nimmt im Universum ständig zu. Das Leben kann seine komplexen Strukturen, seine hohe Ordnung nur aufrechterhalten, indem es fortwährend Energie aufnimmt. Die Pflanzen erhalten sie über das Sonnenlicht, die Tiere, indem sie Pflanzen (oder andere Tiere) fressen und deren gespeicherte Energie konsumieren. Der Tod aber bedeutet, dass jene biochemischen Vorgänge zusammenbrechen, die die Energie bereitstellen.

Mit dem Gehirn stirbt aber längst nicht alles im Körper sofort ab: Herz-Zellen überleben den Atemstillstand um 15 bis 30 Minuten, Leber- und Lungenzellen bis zu einer Stunde. Andere Zellen können noch weit länger existieren; die der Hornhaut sogar drei Tage.

Weil der Kreislauf im Augenblick des Todes stoppt, fließt das Blut aus den hoch gelegenen Adern nach unten – daher sieht der Verstorbene an seiner Vorderseite aschfahl aus – und sammelt sich auf der Rückseite in den dortigen Blutgefäßen zu dunklen Leichenflecken.

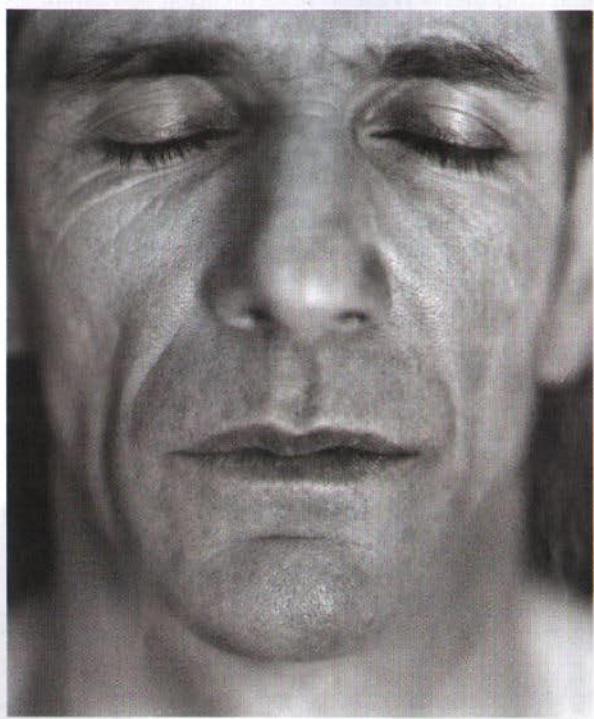
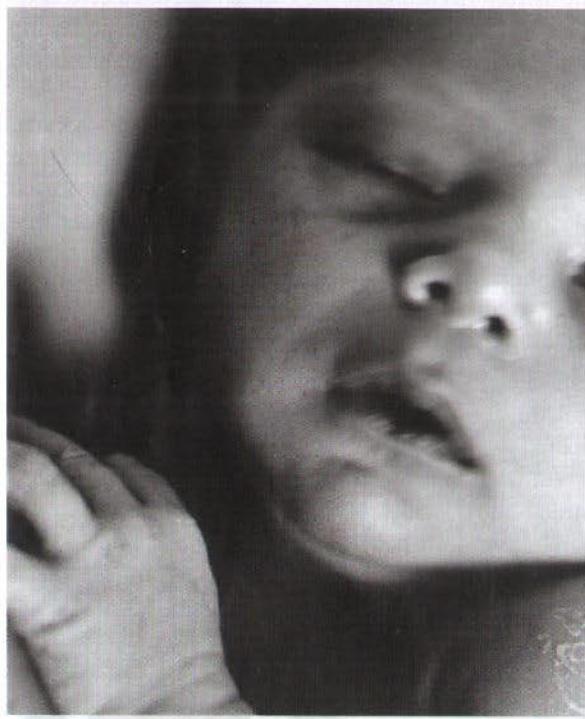
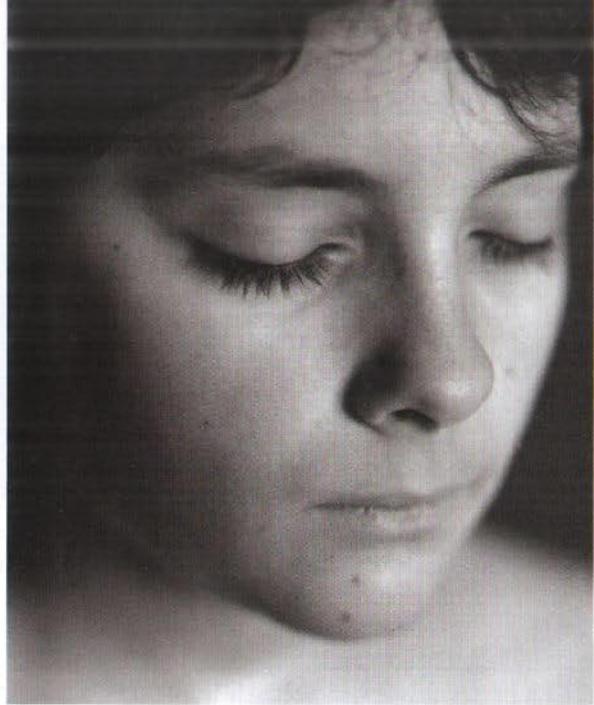
Die zunächst erschlafften Muskeln werden im Verlauf der nächsten Stunden steif, die Leichenstarre setzt ein. Denn die Muskelzellen können ohne frischen Sauerstoff und Nährstoffe eine bestimmte energiereiche Substanz nicht mehr neu bilden. Daher bleiben Eiweißstrukturen, die sich bei der Muskelkontraktion normalerweise gegeneinander verschieben, nun aneinander haften und machen den Muskel unbeweglich.

Jetzt beginnt der Körper, sich selbst zu verdauen. Enzyme, die sonst von den Zellen der Magen- und Darmschleimhaut ins Innere der Organe abgegeben werden, um die Nahrung aufzuschließen, bauen nun deren Wände ab. Daraufhin breiten sich Bakterien, die eigentlich im Darm eingeschlossen sind, im Leichnam aus, nutzen ihn als gigantisches Nahrungsreservoir.

## 50 Millionen Zellen produziert der Körper in jeder Sekunde seines Lebens

storbene hatte eine plötzliche Wandlung erfahren, die selbst nicht religiösen Menschen wie das Entweichen eines „göttlichen Funkens“ erscheinen mag.

Denn selbst wenn ein Körper kurz vor dem Ende eines langen Lebens krank und gebrechlich wirkt, so ist er doch noch immer vital: Das Blut zirkuliert in den Adern und versorgt jede Zelle, Muskeln und innere Organe arbeiten, Nervenzellen feuern ihre elektrischen Impulse durch Hirn, Rumpf und Gliedmaßen.



**Weshalb die Haut faltig und spröde, die Muskeln kraftlos werden, war lange Zeit ein Rätsel. Jetzt aber sind die Forscher den molekularen Geheimnissen des Alterns auf der Spur**

Zudem gerät die zuvor fein abgestimmte Biochemie in den Körperzellen aus den Fugen. Eiweiße bauen dort nach wie vor Stoffe ab – doch es kommen keine neuen hinzu, weil Energie und Nachschub fehlen. Schließlich platzen die Zellen auf, ihr Inhalt mitsamt den verdauenden Eiweißen ergießt sich in den Zwischenraum, löst benachbarte Zellen und ganze Gewebe auf.

Die Macht des Chaos triumphiert über das Prinzip Ordnung, das den Körper ein Leben lang definiert hat.

Dies ist der letzte Akt eines Dramas, das mit der Zeugung begonnen hat und aus einer Abfolge von Entwick-

lungsstadien des Körpers besteht. Am Anfang konstruierte er sich selbst, baute sich dann auf, indem er wuchs, komplexer wurde und immer bessere Fähigkeiten erlangte. Er erklimmte einen Gipfel der körperlichen Fitness, um anschließend zu altern, schwächer und anfälliger für Krankheiten zu werden und zu zerfallen.

Es ist ein Lebensweg, der dem Besteigen eines gewaltigen Berges ähnelt und nach dem Abstieg endet.

In jedem Moment dieses Weges – der unterteilt ist in vier Phasen: Konstruktion, Wachstum, Zenit, Zerfall – musste der Körper dabei fit sein, musste Energie von



Eine Fotoserie, die den deutschstämmigen US-Amerikaner Karl Zentmaier über seine gesamte Lebensspanne begleitet hat, zeigt ihn im Alter von drei, neun, zwölf, 28 (oben) sowie 39, 57, 70, 82 Jahren (rechts)

außen aufnehmen, um seine Stabilität und Ordnung zu erhalten. Er musste sich vielfach wandeln, erneuern und trotz dieses Wandels seine Identität bewahren.

Und immer wieder das Gesetz der Natur umsetzen: Chaos in Ordnung zu verwandeln.

### I. Konstruktion Der Embryo erschafft sich selbst

Am Anfang unserer Existenz steht ein Wettrennen. Es findet unter mehreren Hundert Millionen Spermien statt, und der Gewinner dringt in die Eizelle ein, um sich mit ihr zu vereinigen. Dabei mischen sich Erbgutanteile von Mutter und Vater neu – zu einer Kombination, die es nie zuvor gegeben hat und die es so nicht noch einmal geben wird. Das ist der magische Moment, in dem ein einzigartiger Mensch entsteht.

Alle Zellen seines zukünftigen Körpers werden diese einmalige Erbsubstanz enthalten. Sie macht ihn so unverwechselbar, dass er unter Milliarden zu identifizieren sein wird. Erst mit seinem Tod wird sie vergehen.

Rund 30 Stunden nach der Befruchtung teilt sich die Zelle erstmals, nach drei bis vier Tagen hat sich der Keim in eine Kugel aus 16 gleichen Zellen gewandelt.

Doch anschließend entwickeln sich die Zellen unterschiedlich, sie spezialisieren sich. Manche verlagern sich so, dass ein Scheibchen aus zunächst zwei, später drei Zellschichten entsteht, den Keimblättern. Aus ihnen werden sich die verschiedenen Organe formen.

Ein wundersamer Prozess hat begonnen, den die Natur bereits vor rund 750 Millionen Jahren erfunden hat. Er ermöglicht es, statt simpler Organismen aus den immergleichen Zellen eine ungeheure Mannigfaltigkeit von Lebewesen mit den unterschiedlichsten Körperfestalten und Funktionen herzustellen.

Der Vorgang lässt sich mit der Berufsausbildung eines Menschen vergleichen. Zunächst sind alle Kinder einer Schulklasse auf dem gleichen Niveau, haben ähnliche Fähigkeiten und erarbeiten den gleichen Stoff. Doch später lernen sie ganz unterschiedliche Dinge,

spezialisieren sich auf verschiedene Berufe: Die einen werden vielleicht Maurer, die anderen Inneneinrichter, die dritten Architekten. Sie können alle dazu beitragen, ein Haus zu erbauen, doch nach ihrer Spezialisierung fällt es ihnen schwer, den Beruf nochmals zu wechseln und völlig neue Fertigkeiten zu erlernen.

Bei den Zellen ist es ähnlich und sogar noch extremer: Haben sie sich erst einmal spezialisiert, gibt es für sie kein Zurück mehr. Das liegt daran, dass bei ihnen bestimmte Gene angeschaltet, andere hingegen stillgelegt wurden – und zwar unwiderruflich.

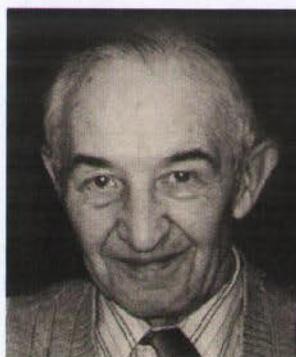
So entwickeln sich schließlich aus einer einzigen befruchteten Eizelle mehr als 200 unterschiedliche Zelltypen, obwohl sie ursprünglich alle das gleiche genetische Material enthielten. Sie verbinden sich zu Geweben, diese formen Organe, und es erwächst ein hochkomplexer Körper mit bis zu 100 Billionen Zellen.

Und während die unbelebte Natur nur aus einfachen Molekülen besteht – etwa Kohlendioxid, Wasser oder Sauerstoff –, enthält jede dieser Zellen vielfältige Eiweißverbindungen und Erbmoleküle. Sie sind zumeist aus Tausenden Atomen zusammengesetzt und haben alle ihren Platz in der Zelle. Das Leben hat aus chaotisch durcheinanderschwirrenden, simplen Substanzen eine bewundernswerte Ordnung geschaffen.

Die Zunahme an Komplexität, die ein Mensch während seiner Entwicklung im Mutterleib erfährt, gehört daher zu den erstaunlichsten Phänomenen überhaupt. Der Körper konstruiert sich quasi selbst und organisiert den eigenen Aufbau zudem auch noch. Es ist so, als würden sich alle Teile eines Automobils von selbst formen und dann von sich aus zu einem funktionierenden Fahrzeug zusammenfügen.

Das geht nur, weil die Zellen offenbar aufgrund eines komplizierten Codes in ihrer Erbsubstanz „wissen“, welchen Teil des Ganzen, welches Organ sie bilden sollen. Manche bewegen sich dazu sogar quer durch den embryonalen Körper an ihren Bestimmungsort.

Doch auch der Tod hat jetzt schon eine Funktion. Denn in den Zellen gibt es ein genetisches „Selbst-



mordprogramm“. Einmal aktiviert, veranlasst es eine Zelle, abzusterben und sich aufzulösen. Nur dank dieses Programms lassen sich bestimmte Strukturen überhaupt erst bilden, etwa die Hand. Sie entsteht zunächst in paddelförmiger Gestalt. Erst wenn Zellen in bestimmten Arealen dieses Paddels gezielt absterben und dadurch Zwischenräume entstehen, erhält die zukünftige Hand ihre typische Form mit fünf Fingern.

## II. Wachstum

### Der Körper reift und gestaltet sich dabei immer wieder um

Gut acht Wochen nach der Zeugung ist das Wunder der Menschwerdung im Wesentlichen abgeschlossen, haben sich die Anlagen aller Organe geformt und sind zum großen Teil funktionstüchtig. Die befruchtete Eizelle hat sich zum Embryo gewandelt und ist auf das 150-Fache ihrer einstigen Größe gewachsen. Bis zur Geburt nimmt dessen Länge nochmals um das 15-Fache zu, das Gewicht sogar um das 300- bis 400-Fache.

Nach rund 38 Wochen schließlich ist der neue Mensch bereit für den bis dahin elementarsten Umstoss in seinem Leben: die Geburt. Er selbst schüttet Hormone aus und sendet so Signale an den mütterlichen Körper, die diesen Vorgang einleiten.

Während der eigentlichen Geburt macht das Kind einen dramatischen Wechsel des Lebensraums durch, vergleichbar mit dem Übergang eines Fisches vom Leben im Meer zu dem an Land – nur dass dieser Wandel nicht in Jahrtausenden, sondern in wenigen Minuten erfolgt. Aus einer dunklen, warmen und geschützten Umgebung gerät das Kind in eine helle, kalte und von Lichtreizen und akustischen Signalen überflutete Welt, in der es atmen und Nahrung in Form von Muttermilch selbst aufnehmen muss.

Die nächste Phase, die Kindheit, wird vor allem durch zwei Vorgänge geprägt: schnelles körperliches Wachstum und das Erlernen von Fähigkeiten. Direkt nach der Geburt bestimmen angeborene Reflexe das Verhalten. Mindestens zehn dominieren in den ersten Lebenswochen, darunter der Saug-, Schluck- und Greif-

reflex. Nach und nach aber übernehmen höhere Hirnregionen die Kontrolle über die Bewegungen. Das Baby lernt, den Kopf zu heben, sich zu drehen, zu krabbeln und – mit etwa einem Jahr – auf zwei Beinen zu laufen.

Innerhalb des ersten Lebensjahres hat es sein Gewicht verdreifacht und um etwa 50 Prozent an Größe zugenommen. Das Wachstum erfolgt vor allem, indem die großen Röhrenknochen der Gliedmaßen in die Länge schießen. Dazu gibt es spezielle Zonen in den Endbereichen dieser Knochen, die – angeregt durch ein Hormon – ständig neue Knochensubstanz bilden und das Organ so verlängern.

Im Alter von drei bis vier Jahren beherrscht das Kind die wichtigsten physischen Herausforderungen, etwa das Gehen, Springen, Laufen, Treppensteigen und Hantieren mit Objekten.

Für die motorische und geistige Entwicklung entscheidend aber ist das Wachstum des Gehirns und dabei vor allem ein Vorgang, der die elektrische Leitfähigkeit in den Nerven enorm verbessert und der mit sieben Jahren weitgehend abgeschlossen ist.

Dabei geht es um eine Umkleidung der Nervenfasern mit einem isolierenden Material, die eine weitaus schnellere Weiterleitung von Reizen erlaubt. Sie ermöglicht es, eine große Anzahl feiner Neuronen zu hocheffektiven Schaltkreisen zusammenzuschließen – und so die Funktion des Gehirns für die folgenden Lebensabschnitte zu optimieren.

**Direkt nach der Geburt bestimmen nur zehn angeborene Reflexe das Verhalten eines Kindes**



Dass die Hand eines Menschen immer dieselbe bleibt, ist eine Illusion:  
Ständig werden Moleküle und Zellen ausgetauscht

Die nächste Phase beginnt bei Mädchen zwischen zehn und elf, bei Jungen meist zwei Jahre später – sie nehmen erneut kräftig an Größe zu. Doch dies ist kein reiner Wachstumsschub, sondern eine Art Revolution: Der Körper baut sich selbst nochmals kräftig um.

In dieser Phase, der Pubertät, bereitet er sich zudem auf seine wichtigste biologische Aufgabe vor – die Fortpflanzung. So prägen sich unter dem Einfluss der Geschlechtshormone die äußereren Körpermerkmale

von Frau und Mann aus. Doch ebenso wichtig sind Vorgänge im Inneren der Jugendlichen. Das Gehirn strukturiert sich in dieser Lebensphase weitgehend um und wird damit zu einer regelrechten Baustelle.

Da nun bei vielen emotionalen Entscheidungen ein älteres, für Instinktreaktionen zuständiges Zentrum (die Amygdala) dominiert und nicht der – im Umbau befindliche – Stirnlappen (ein Areal im vorderen Bereich der Großhirnrinde), bedenken viele Jugendliche die Konsequenzen ihres Handelns zu wenig. Zudem brauchen sie einen stärkeren Reiz, um einen Nervenkitzel zu verspüren, und gehen höhere Risiken ein. Andererseits können sie diese Risiken nicht richtig einschätzen, weil ihr Hirn dafür nicht reif genug ist.

In keiner Phase des Lebens ist die Gefahr von Unfällen und Verletzungen daher so hoch wie jetzt.

## Die **Pubertät** gleicht einer Revolution: Der Körper baut sich kräftig um, vor allem sein Gehirn

### III. Zenit Der Mensch auf dem Gipfel seiner Entwicklung

Wenn diese Revolution mit etwa 20 Jahren langsam ausklingt, steht der Mensch auf dem Höhepunkt seiner körperlichen Ausbildung – und wird dieses Niveau



Die Haut alter Menschen wird dünner, fältiger und empfindlicher. Altersflecken treten auf, weil bestimmte Zellen vermehrt Farbpigmente bilden

etwa ein Jahrzehnt lang halten können. Der Organismus ist nun anatomisch, physiologisch und sexuell voll ausgereift. Muskeln, Herz und andere Organe funktionieren am effizientesten. Spitzensportler sind auf dem Maximum ihrer Leistungsfähigkeit.

Der junge Mensch hat nun bereits mehr als ein Viertel seiner statistisch zu erwartenden Lebensspanne hinter sich gebracht. Seit Jahren besitzt er ein Bewusstsein seiner selbst, seiner individuellen Einzigartigkeit und lebt mit dem Gefühl, immer dieselbe Person gewesen zu sein. Doch was den Körper betrifft, ist dieser Eindruck von Beständigkeit ein Trugschluss.

Denn die meisten Zellen seines Körpers sterben schon nach einigen Tagen, andere nach Wochen oder Monaten ab und werden ersetzt. Sie durchleiden einen regelmäßigen Zyklus aus Werden und Vergehen (siehe Seite 108). Nur wenige Zelltypen, darunter Nerven-, Herzmuskel- und die meisten Sinneszellen können in der Regel nicht ausgetauscht werden und müssen ein Leben lang halten. Die Zellen aber, die die Schleimhäute von Magen und Darm bilden, existieren nur wenige Tage. Sind sie verbraucht, sterben sie und werden in das Innere der Organe abgestoßen. Ihre Nachfolger ent-

stehen aus noch teilungsfähigen Zellen, die sich etwas tiefer im Gewebe befinden.

Trotz des Gefühls eines Individuums, immer der- oder dieselbe zu sein, durchläuft sein Organismus eine Entwicklungsstation nach der anderen; die Konstanz liegt allein im Wandel.

Und noch eines dürfte einem jungen Erwachsenen in dieser Lebensphase nicht klar sein: Sein Körper, der die maximale Fitness erreicht und den Gipfel der Kraft erklimmen hat, trägt längst den Zerfall in sich. Obwohl wir es nicht wahrhaben wollen, sind wir vom Beginn unseres Daseins an dem Untergang geweiht. Denn der Körper führt einen Kampf gegen das Chaos, den er auf molekularer Ebene einfach nicht gewinnen kann.

Betroffen sind vor allem die Eiweißmoleküle. Damit eine Zelle leistungsfähig bleibt, müssen alle biochemischen Vorgänge in ihr reibungslos ablaufen. Dafür sind vor allem die Eiweiße zuständig, riesige, kompliziert gefaltete Molekülketten. Doch verlieren sie nach einiger Zeit an Wirkung, indem sich zum Beispiel ihre räumliche Struktur verändert: Sie altern – ähnlich wie ein ausgeschlagener Schraubenschlüssel, der irgendwann nicht mehr richtig zu nutzen ist.



Die Haut des Kindes ist noch faltenlos, doch bald wird das Sonnenlicht in ihr Spuren hinterlassen

Deshalb werden in der Zelle ständig neue Eiweiße hergestellt und alte vernichtet. Für ihre Produktion wird eine Bauanleitung benötigt, die in der Erbsubstanz DNS verschlüsselt ist. Doch die erleidet im Laufe eines Lebens ebenfalls Schäden – und zwar umso mehr, je länger ein Mensch existiert. Wenn aber die Bauanleitung für die Eiweiße immer neue Fehler enthält, werden immer häufiger unvollkommene Moleküle fabriziert.

Um bei dem Vergleich mit den Schraubenschlüsseln zu bleiben: Es bedeutet, dass eine Fabrik ihre Produkte nach fehlerhaften Anleitungen herstellt – also Schraubenschlüssel, die nicht passen. Und so beginnt eine Kette von Fehlern, die sich mit den Jahren summieren und uns das Überleben immer schwerer machen werden.

#### IV. Zerfall

##### Warum wir altern – und schließlich sterben

Die Macht des Chaos, des Zerfalls, die auf der Ebene der Moleküle wirkt, macht sich schließlich auch auf den Ebenen der Zellen, der Gewebe und Organe bemerkbar. Sie alle beginnen, sich in ihren Strukturen zu verändern,

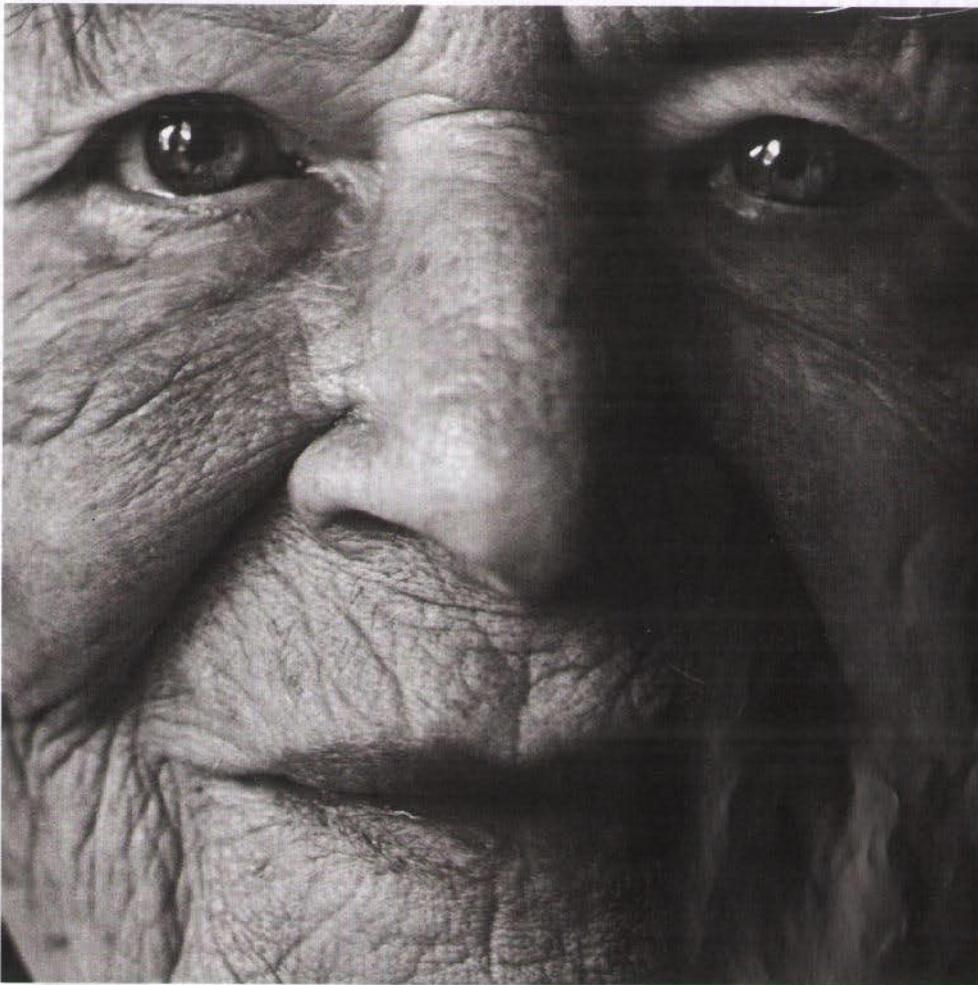
die Leistungsfähigkeit vieler Organe nimmt allmählich ab. So wird beispielsweise die Haut im Verlauf der Jahre immer schlaffer und fältiger, weil sich der Stoffwechsel in bestimmten Fasern verlangsamt und sich das darunterliegende Bindegewebe verändert.

Das Auge, das bei einem Menschen von 30 Jahren noch in nur zwölf Zentimetern Abstand scharf sieht, kann im Alter von 50 Jahren meist nur noch auf eine Entfernung von mehr als 30 Zentimetern fokussieren, weil die Augenlinse nicht mehr so elastisch ist.

Der Körper lagert vermehrt Fett ein, während seine Kraft nachlässt: Zwischen 30 und 80 Jahren verlieren die Muskeln durchschnittlich 30 Prozent ihrer Zellen.

Allerdings muss die körperliche Leistungsfähigkeit nicht zwangsläufig nachlassen. Studien an Marathonläufern haben ergeben, dass zwischen 20- und 50-Jährigen praktisch kaum Unterschiede bestehen. Offenbar haben Training und Lebensweise einen starken Einfluss auf Muskelkraft und Ausdauer. Und das gilt wohl auch für viele geistige Fähigkeiten.

Der Mensch kann sich also gegen den unaufhörlichen Verfall stemmen, kann ihn abbremsen. Verhindern aber kann er ihn – zumindest bislang – nicht.



Biochemisch ist das Altern nichts weiter als eine Anhäufung molekularer Schäden

Trotz allen Trainings verändert sich der Körper immer weiter und wird in den letzten Jahrzehnten seines Lebens immer schwächer und anfälliger für Krankheiten. Die vom Herzen beförderte Blutmenge sinkt kontinuierlich, die Atemkapazität nimmt deutlich ab, weil die Lunge an Elastizität verliert. Die Geschwindigkeit der Reizleitung in den Nerven wird geringer, und Reflexe werden langsamer. Zudem degenerieren Muskeln, werden Gelenke steifer (weil Knorpelzellen verschleißt). Die Knochen werden brüchiger, weil sie Kalzium verlieren, die Kopfbehaarung wird schütterer, da mehr Haare ausfallen als nachwachsen.

Bis dahin hat der Körper bereits Höchstleistungen vollbracht: Bei einem 80-Jährigen hat das Herz rund drei Milliarden Mal geschlagen und dabei rund 185 Millionen Liter Blut durch die Adern gepumpt. Der Brustkorb hob und senkte sich etwa 700 Millionen Mal und bewegte dabei rund 300 Millionen Liter Luft.

In jeder Sekunde seines Daseins hat der erwachsene Mensch rund 50 Millionen Zellen produziert. Das ergibt über die gesamte Lebensspanne gerechnet eine gigantische Zahl: mehr als 100 000 Billionen Zellen (eine Eins mit 17 Nullen).

Um diese Zellen herstellen zu können, benötigte der Körper Energie. Im Laufe seines Lebens nimmt ein Europäer in mehr als 100 000 Mahlzeiten etwa 90 Millionen Kilokalorien zu sich – in Form von knapp 20 Tonnen Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen.

Für einen Bundesbürger bedeutet das: Er hat im Laufe seines Lebens drei Rinder, zehn Schweine, zwei Schafe, zwei Kälber, einige Hundert Hühner, etwa 2000 Fische, 10 000 Eier, eine Tonne Käse, 100 Sack Kartoff-

**Die Pumpleistung  
des Herzens und die  
Atemkapazität nehmen  
im Alter deutlich ab**

# Bei einem 80-Jährigen hat das Herz rund **drei Milliarden Mal** geschlagen

fein, 80 Säcke Mehl und Zucker, 5000 Brote, 6000 Stück Butter und noch einiges mehr verspeist.

All diese Nahrungsmittel brauchte der Körper, um jenes hoch geordnete und empfindliche biochemische Gleichgewicht zu erhalten, das seine Organe funktionieren lässt und ihm seine Leistungen ermöglicht.

Und doch siegt am Ende der Zerfall.

Denn die sich sammelnden Schäden und Veränderungen in den Zellen bewirken, dass irgendwann die ersten Organe versagen. Bei Menschen über 70 ist zumeist das komplexe, den Körper durchziehende Versorgungssystem aus Herz und Blutgefäßen betroffen.

In der Altersgruppe zwischen 40 und 70 dagegen fordern Krebserkrankungen die meisten Opfer. Die Tumore werden ebenfalls durch molekulare Schäden ausgelöst; Veränderungen an der DNS bewirken, dass sich die Zellen unkontrolliert vermehren – so lange, bis sie Gewebe und Organe schädigen oder gar zerstören.

Auch in diesem Fall offenbart sich die Macht des Chaos. Zwar geht es beim Krebs zunächst nicht um Zerfall, sondern im Gegenteil um ungezügeltes Wachstum. Doch weil die Tumorzellen immer weiter wuchern, bringen sie den Organismus schließlich um. Ihre chaotische Vermehrung ist nicht mit dem Prinzip Leben vereinbar und führt unerbittlich zum Tod.

Auf molekularer Ebene betrachtet, ist Altern also eine Anhäufung von Schäden, die auch die Erbsubstanz betreffen und die hochkomplexe Ordnung des Lebens stören. Doch was genau verursacht diese molekularen Veränderungen? Und lassen sie sich womöglich vermeiden und damit das Altern hinauszögern?

Die Forscher haben mittlerweile etliche Faktoren entdeckt, die solche Defekte auslösen: Zum Beispiel bewirkt Strahlung – ultraviolette, kosmische oder Röntgenstrahlung – in den langen Ketten der Erbsubstanz häufig chemische Veränderungen. Oder es kommt während der DNS-Verdoppelung beim Bau einer neuen Zelle zu einem Kopierfehler. Eine entscheidende Rolle beim Altern aber spielen aggressive Sauerstoffverbindungen: sogenannte freie Radikale.

Dabei handelt es sich um Verbindungen, die vor allem bei der Energiegewinnung in den Kraftwerken der Zelle entstehen und denen ein Elektron fehlt, das während der biochemischen Reaktion von einem anderen Molekül aufgenommen wurde. Um diesen Mangel

auszugleichen, entreißen sie dem am nächsten gelegenen Molekül oder Atom ein Elektron. Wird dadurch das Erbmolekül verändert, erleidet es einen Defekt.

Als Wissenschaftler diesen Zusammenhang vor einigen Jahren erkannten, eröffneten sich aufregende neue Möglichkeiten: Eine kalorienarme Ernährung – bei der also weniger Energie umgesetzt wird und somit weniger der aggressiven Stoffe frei werden – könnte, so vermuteten sie, diesen Schädigungsmechanismus vermindern und so die Alterung aufhalten. Tatsächlich erwies sich in Tierversuchen: Eine um 30 bis 40 Prozent reduzierte Hungerdiät verlängerte das Leben von Mäusen, Fliegen sowie Würmern. Und dieser Mechanismus scheint beim Menschen ebenfalls zu greifen.

Zum einen entstehen bei geringerer Nahrungszufuhr in den Kraftwerken der Zelle offenbar geringere Mengen an schädlichen freien Radikalen. Zum anderen aktiviert der Hungerstress zusätzlich einen molekularen Mechanismus, der die DNS vor Schäden bewahrt. Das Gleiche bewirkt offenbar eine chemische Substanz: das in Rotwein enthaltene Resveratrol.

Auch etliche Gene können den Schutzmechanismus ankurbeln und die Lebensdauer steigern (allerdings sind sie bei vielen Menschen inaktiv). Es handelt sich offenbar um Kontrollgene, die der Körper normalerweise erst dann anschaltet, wenn er unter Hungerstress steht, und die dazu dienen, das Überleben in extremen Situationen zu gewährleisten.

Die Eiweiße, die diese Gene herstellen, bewirken unter anderem, dass die Erbsubstanz nicht so leicht zu schädigen ist oder dass Reparaturmechanismen der Zelle angeregt werden. So können sie das Leben verlängern und Krankheiten vorbeugen.

**DOCH SELBST** wenn ein Mensch diese lebensverlängernden Gene in ihrer aktiven Form besäße, wenn er an Kalorien sparen und sämtliche schädigenden Umwelteinflüsse vermeiden würde, wäre seine Zeit endlich. Denn Forscher gehen davon aus, dass es eine Art „Lebensuhr“ gibt, die von der Evolution hervorgebracht wurde und die Lebensspanne eines Organismus begrenzt.

Auf diese Idee kamen sie, als sie entdeckten, dass die meisten Körperzellen eine Art molekulare Zeitbombe in sich tragen. Denn an den Enden ihrer Chromosomen – die ja die Erbsubstanz enthalten – hängt eine spezielle Molekülkette. Diese Molekülsequenz ist eine Art Baugenehmigung, die signalisiert: „Ich darf mich teilen.“ Doch bei jeder Zellteilung wird ein Stückchen der Kette abgeschnitten. Schließlich ist sie ganz verschwunden und damit quasi die Erlaubnis zur weiteren Teilung erloschen. Das Signal, das die Zelle nun erhält, lautet:

„Vernichte dich selbst“, und das Selbstmordprogramm spult sich ab.

Rund 50 Mal, haben Forscher in Experimenten herausgefunden, können sich die Zellen eines menschlichen Embryos teilen, wenn man sie entnimmt und im Reagenzglas züchtet. Dann ist Schluss.

Gut 50 Teilungen scheinen nicht viel zu sein, aber da sich bei jedem Teilungsschritt die Gesamtzahl der Zellen verdoppelt, kommt man schnell auf eine gigantische Zahl. Die Zahl der Teilungen reicht, um den Körper aufzubauen und ein Leben lang mit immer neuen Zellen zu versorgen.

Doch irgendwann im Laufe eines Menschenlebens haben alle Zellen ihr Potenzial ausgeschöpft – dann, wenn die Molekülkette an den Enden der Chromosomen verbraucht ist – und können sich nicht nochmals teilen. Es werden keine neuen mehr gebildet, der Körper kann sich nicht mehr regenerieren und ist dem Untergang geweiht. Biologen haben errechnet, wie lange es dauert, bis diese Grenze erreicht ist, und daraus eine maximale Lebensspanne ermittelt: 115 bis 120 Jahre.

Wenn ein Mensch schließlich stirbt, sich die komplexen Moleküle des Lebens auflösen und zu simplen chemischen Bausteinen zerfallen, verschwindet auch die individuelle Erbsubstanz der Person, ihr genetischer Fingerabdruck.

Was biologisch bleibt, ist lediglich jener Teil des Erbgutes, den ein Mensch seinen Kindern vererbt hat. Denn nur die Ei- oder Samenzellen können Teil eines neuen Körpers werden.

**DER HOMO SAPIENS**, dieses Wunder der Evolution mit seiner Kreativität, seiner Erfindungsgabe und seinem unter den Lebewesen einzigartigen Wissen um die eigene Sterblichkeit, wäre aber nicht er selbst, wenn er sich mit dem Tod abfinden würde.

Und so arbeiten Wissenschaftler weltweit daran, die komplizierten Vorgänge des Alterns zu verstehen – in der Hoffnung, diese Mechanismen eines Tages doch noch ausmanövrieren und das Leben deutlich verlängern zu können.

Doch wäre das überhaupt wünschenswert?

Könnten die Menschen sehr viel länger als heute leben – sagen wir: 150 Jahre –, würden immer mehr

Einwohner auf der Erde um Nahrung und Wohnraum konkurrieren und die Jungen den Alten irgendwann vermutlich deren Besitz neiden.

Vor allem aber hätte das Gehirn ein Problem. Da sich Nervenzellen nicht mehr teilen, ist die Leistung des Denkorgans begrenzt. Irgendwann könnte ein Mensch nichts Neues mehr erlernen, keine weiteren Erfahrungen und Erinnerungen sammeln – es sei denn, das Gedächtnis würde alte Inhalte löschen.

Doch dann fehlte ihm die Erinnerung an Vergangenes, an das, was er einst war. Die Frage, wer man ist, würde sich also immer wieder neu stellen.

Weshalb aber wollen wir Menschen überhaupt viel länger leben? Die Antwort ist vermutlich ganz einfach: In der Geschichte der Erde hatten nur diejenigen Organismen Erfolg, die mit optimalen Fähigkeiten, aber auch mit einem enormen Überlebenswillen ausgestattet waren.

Denn nur wer sich gegenüber anderen behauptete, konnte seine Gene erfolgreich an die nächste Generation weitergeben – und damit eben auch jenen unbedingten Lebenswillen. Es gab für die Evolution also einfach keinen Grund, ein Wesen hervorzubringen, das nicht bis zum letzten Moment gegen den Tod anstreiten würde.

Andererseits hatte die Natur gute Gründe, die Lebensdauer von Organismen zu begrenzen. Denn ein genetisch programmiertes Tod macht der folgenden Generation Platz. Und weil bei der sexuellen Fortpflanzung das Erbgut immer wieder gemischt wird, entstehen Nachkommen mit

neuen Eigenschaften, die sich an veränderte Umweltbedingungen anpassen können.

Das Verschwinden der Alten beschleunigte also die Evolution – ja machte eine Fortentwicklung überhaupt erst möglich.

Das aber bedeutet: Ohne den Tod hätte es den *Homo sapiens*, dieses Spitzenprodukt der biologischen Entwicklung, vermutlich niemals gegeben. □

Der Biologe **Dr. Henning Engeln**, 56, ist Textredakteur im Team von GEOkompakt.

**Literaturempfehlung:** Markus Hengstschläger, „Endlich Unendlich. Und wie alt wollen Sie werden?“, Ecowin Verlag; eine unterhaltsame Zusammenfassung aller Aspekte des Alterns, seiner biologischen Ursachen und der Frage, ob es sich aufzuhalten lässt.



## Über 200 Reisepläne ohne Kinderkrankheiten: Reisen mit Kindern.

Kalle Balke

Weitere Themen

- Hotels an Nord- und Ostsee •
- Ferien mit Freunden •
- Traumurlaub – warum nicht? •



# Das Wunderwerk Mensch

Auch wenn wir es nicht spüren: Damit wir ganz normal leben, uns in der Welt bewegen, lachen und lieben können, müssen im Organismus eine Vielzahl komplizierter physiologischer und biochemischer Vorgänge ablaufen. Dieses Dossier gibt einen Überblick über die wichtigsten Organsysteme, die den Körper funktionieren lassen: Gehirn, Nerven und Sinne; Herz und Kreislauf; Skelett und Muskeln; Verdauung und Ausscheidung; Haut und Hormone

Texte: Sebastian Witte

Knochen geben  
dem Körper  
Halt, das Herz  
versorgt ihn  
mit Blut, Nerven  
steuern ihn



# Wie die Welt in unserem Kopf entsteht

Es lässt uns schmecken und riechen, hören und sehen, denken und fühlen: Das Nervensystem ist das komplexeste Datennetz des menschlichen Körpers

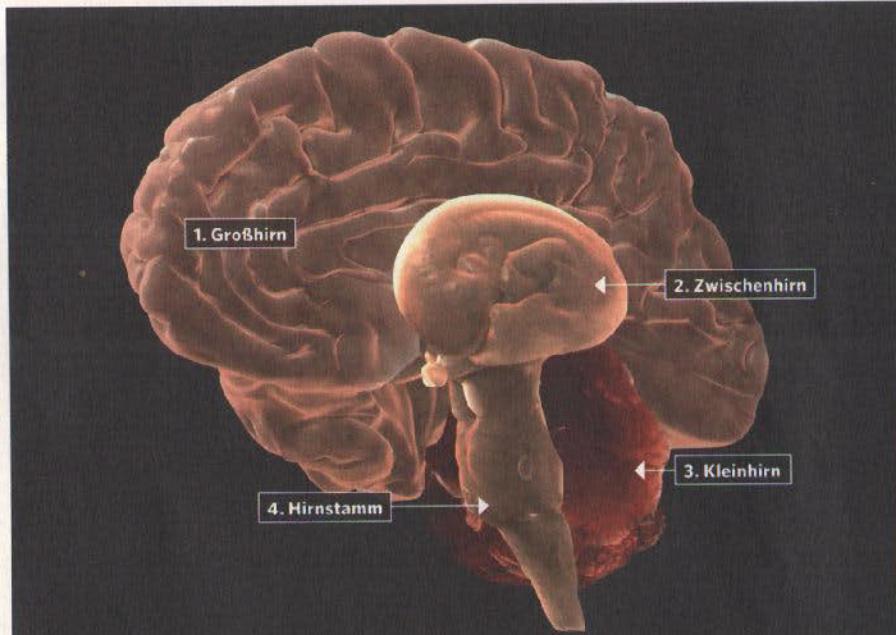
Durch unseren Körper verläuft ein 780 000 Kilometer langes Fasernetz aus Milliarden Nervenzellen, die ständig miteinander kommunizieren. Selbst wenn wir schlafen, arbeiten Neurone (von griech. *neuron* = Nerv) unentwegt in unserem Inneren. Sie verarbeiten Sinnesreize, steuern unsere Bewegungen, kontrollieren die Atmung, den Puls, die Verdauung. Und sie ermöglichen es uns, zu denken, zu fühlen und zu handeln.

Dieses hochkomplexe Datennetz setzt sich zusammen aus dem Gehirn, dem in der Wirbelsäule liegenden Rückenmark sowie den zahlreichen Nervenbahnen, die sich vom Rückenmark aus in jeden Winkel des Organismus erstrecken und dort vielfach mit Sinneszellen in Verbindung stehen (etwa in der Haut, der Zunge, den Augen, im Darm oder in den Muskeln).

So vielfältig die Aufgaben unseres Nervensystems aber auch sind – seine Grundbausteine, die Neurone, gleichen einander in Aufbau und Funktionsweise. Sie verfügen zum einen über mehrere Hundert, mitunter gar Tausende fadenförmige Ausläufer, mit denen sie hauptsächlich Signale von anderen Nervenzellen empfangen, und zum anderen über einen langen Fortsatz, mit dem sie diese Signale in Form elektrischer Impulse an andere, weiter entfernte Nervenzellen weiterleiten.

Dieser Fortsatz, das Axon (von griech. *áxon* = Achse), bildet an seinem Ende zahlreiche Kontaktstellen zu anderen Nervenzellen. Auf diese Weise stehen die Neurone miteinander über gut eine Billiarde Kontaktstellen in Verbindung.

Sekunde für Sekunde jagen elektrische Impulse durch dieses weit verzweigte Nervennetz. Denn ununterbrochen



## Die Anatomie des Hirns

**1. Großhirn.** Der evolutionär jüngste Teil des Hirns ist von einer stark gefurchten Rinde umgeben und beherbergt den Großteil der Neurone. Es ist die höchste Instanz des zentralen Nervensystems. Hier entsteht das Bewusstsein, hier bewerten wir unsere Erfahrungen, treffen moralische Entscheidungen, planen für die Zukunft, reflektieren über uns selbst.

**2. Zwischenhirn.** Dieses Areal reguliert den Tag-Nacht-Rhythmus, steuert die Ausschüttung von Hormonen und verarbeitet Emotionen. Zudem dient es als Filterstation von Signalen, die von anderen Hirnteilen zum Großhirn gelangen.

**3. Kleinhirn.** Die blumenkohlartige Ausstülpung am Hinterkopf reguliert Bewegungen und sorgt dafür, dass wir unser Gleichgewicht halten.

**4. Hirnstamm.** Der entwicklungsgeschichtlich älteste Teil unseres Gehirns steuert lebenswichtige Grundfunktionen wie den Herzschlag, die Atmung und die Verdauung. Zudem überwacht er den Wärme-, Wasser- und Energiehaushalt des Körpers.

nehmen Sinneszellen Informationen aus der Peripherie des Körpers auf. So erfassen etwa die Sehzellen in unseren Augen Lichtreize. Die Geschmacksknospen auf unserer Zunge registrieren unter anderem Bitter- oder Süßstoffe. Die Riechzellen in unserer Nasenschleimhaut erspüren Duftmoleküle. Die mit winzigen Härchen bekleideten Hörzellen in unseren Ohren detektieren Druckwellen, die im Inneren des Gehörganges

aus Schall erzeugt werden. Und die Tastzellen in unserer Haut nehmen Berührungen oder Stöße wahr.

Sämtliche Reize von außen werden von den entsprechenden Sinneszellen auf komplexe Weise in elektrische Impulse übersetzt und dann in unser neuronales System eingespeist. Je heftiger ein Reiz – etwa ein schmerhafter Stich, ein Lichtblitz oder ein lautes Geräusch –, desto größer ist die Anzahl der Impulse,

## MEMO: Gehirn, Nerven, Sinne

- Das Nervensystem besteht aus dem Gehirn, dem Rückenmark und Nervenbahnen, die sich in den Körper erstrecken.

- Die Grundbausteine des Nervensystems sind die Neurone.

- Diese Zellen verfügen meist über Hunderte Ausläufer, mit denen sie Signale empfangen, und einen Strang, über den sie die Impulse an andere Neurone weiterleiten.

- Das Gehirn besteht aus vier Abschnitten: dem Hirnstamm, dem Kleinhirn und Zwischenhirn sowie dem Großhirn.

- Das Denkorgan verarbeitet Sinnesreize, steuert Bewegungen, kontrolliert Atmung, Puls, Verdauung und lässt uns denken, fühlen und handeln.

die sich entlang der Nervenbahnen fortpflanzen, und desto schneller folgen sie aufeinander.

In der Regel gelangen die elektrischen Signale aus der Peripherie des Körpers in das Rückenmark und von dort ins Gehirn. Erst hier werden die Reize ausgewertet und interpretiert.

Wissenschaftler unterteilen das Gehirn in vier Bereiche, die bei der Verarbeitung der Sinneseindrücke und der Steuerung des menschlichen Körpers unterschiedliche Aufgaben übernehmen:

- den Hirnstamm; das evolutionär älteste Gebiet liegt unmittelbar oberhalb der Wirbelsäule, gleicht einem dicklichen Stab und verbindet das Großhirn mit dem Rückenmark. Der Hirnstamm steuert unter anderem Herzschlag und Atmung;

- das Kleinhirn; diese blumenkohlartige Ausstülpung befindet sich an der Rückseite des Hirnstamms. Sie reguliert unsere Bewegungen und sorgt dafür, dass wir unser Gleichgewicht halten können;



780 000 Kilometer Nerven durchziehen den Körper eines Menschen

- das Zwischenhirn; diese Hirnregion oberhalb des Hirnstamms steuert die Ausschüttung von Hormonen, reguliert den Tag-und-Nacht-Rhythmus und dient als Filterstation für Informationen, die von anderen Hirnarealen ins Großhirn gelangen.

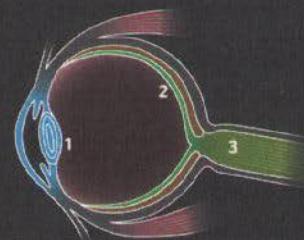
- das Großhirn; der mächtigste Teil der Steuerzentrale wölbt sich über dem Hirnstamm, dem Zwischenhirn und dem Kleinhirn und erinnert durch seine Furchen und Windungen an eine Walnuss. Hier entstehen durch ein hochkomplexes und bisher nicht vollständig verstandenes Zusammenspiel Zehntausender Neurone all unsere Empfindungen. Alle Formen und Farben, Klänge und Geräusche, Gerüche und Geschmacksindrücke. Hier also setzt sich aus der Flut elektrischer Impulse ein Bild unserer Wirklichkeit zusammen.

So verknüpfen wir ständig frische Sinneseindrücke mit Gedächtnisinhalten, erinnern uns etwa an eine zuvor gehörte Tonfolge oder vergleichen das Aroma eines Bonbons mit vergangenen Geschmackserfahrungen. Und wir treffen Entscheidungen: greifen etwa zu einem bestimmten

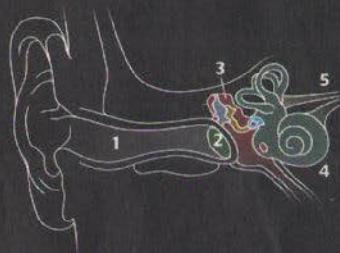
Getränk und senden dazu gezielt Steuerbefehle an die Muskeln.

In einem stirnnahen Areal, das zur stammesgeschichtlich jüngsten Zone des Großhirns zählt, befindet sich schließlich der Sitz höherer geistiger Fähigkeiten. Hier, im Stirnlappen, formen sich unsere Gedanken, fassen wir moralische Entschlüsse. Und hier entsteht das wohl wundersamste Ergebnis sämtlicher neuronaler Aktivität: das menschliche Bewusstsein.

Jenes verblüffende Naturphänomen, das den *Homo sapiens* von Zeit zu Zeit über die eigene Vergänglichkeit grübeln lässt – und den tieferen Sinn seiner Existenz.

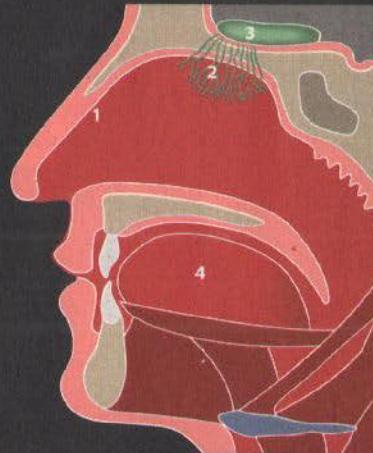


**Sehen:** Fällt Licht ins Auge, wird es von der Linse (1) gebündelt und auf die Netzhaut (2) projiziert. Dort nehmen 130 Millionen Sehzellen Lichtsignale auf, wandeln sie in elektrische Impulse und leiten sie über den Sehnerv (3) ins Hirn.



**Hören:** Schallwellen dringen durch den Gehörgang (1), versetzen Trommelfell (2) und Gehörknöchelchen (3) in Schwingung und werden als Druckwellen aufs Innenohr (4) übertragen. Dort registrieren Sinneszellen die Reize und senden sie über den Hörnerv (5) an das Großhirn.

**Riechen:** In der Nasenschleimhaut (1) sind rund 20 Millionen Riechzellen (2) die Duftmoleküle detektieren und Signale an den Riechkolben (3) senden. Von dort steigen sie in unser Bewusstsein auf.



**Schmecken:** Sinneszellen auf der Zunge (4) vermögen fünf Geschmacksrichtungen – süß, salzig, bitter, sauer und umami (fleischig) – zu erspüren. Die Impulse werden in der Insula, einem Areal des Großhirns, verarbeitet.

# Der Kreislauf, der uns antreibt

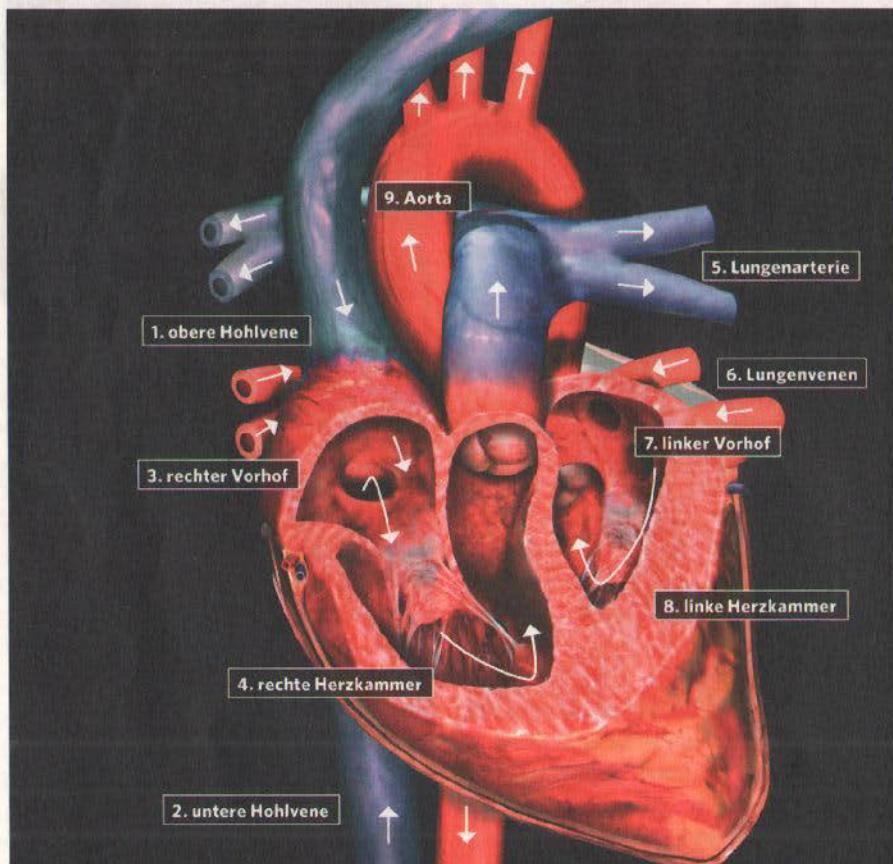
Herz und Lunge vollbringen Großtaten: Die eng miteinander verzahnten Organe führen Sauerstoff und Energie in jede einzelne Körperzelle. Fallen sie für wenige Minuten aus, sterben wir

**O**hne Nahrung und Wasser können wir tagelang auskommen – ohne Sauerstoff nur wenige Minuten, denn alle Zellen des Körpers benötigen das Gas. Deshalb muss es ihnen kontinuierlich zugeführt werden. Wie ein Blasebalg saugt unser Brustkorb daher Luft in die Lunge: zwölf

bis 15 Atemzüge pro Minute, 20000 Atembewegungen am Tag. Mit jedem Zug gelangen 0,5 Liter Luft in die Lunge eines Erwachsenen, pro Tag mehr als 10 000 Liter.

Frischluft, die in die Lunge strömt, besteht unter anderem aus knapp 21 Prozent Sauerstoff und 0,03 Prozent Kohlendioxid. Beim Ausatmen ist der

Sauerstoffanteil auf 16 Prozent gesunken, der Anteil an Kohlendioxid ( $CO_2$ ) – einem Abfallprodukt des Zellstoffwechsels im Körper – hat sich dagegen mehr als verdreifacht: Er beträgt nunmehr etwa vier Prozent. In nur ein oder zwei Sekunden zwischen Ein- und Ausatmen schafft es die Lunge also, die Zusammensetzung der inhaalierten Luft drastisch zu



**Wie das Herz arbeitet:** Sauerstoffarmes, verbrauchtes Blut aus dem Körper gelangt über obere und untere Hohlvene (1, 2) in den rechten Vorhof (3) des Herzens. Von dort wird es in die rechte Herzkammer (4) gepumpt. Ziehen sich die Muskelfasern dieser Kammer zusammen, schießt der Körpersaft durch die Lungenarterie (5) zur Lunge, wo er sich mit Sauerstoff anreichert. Wenn der Herzmuskel erschafft, wird das Blut durch die Lungenvenen (6) in den linken Vorhof (7), dann in die linke Herzkammer (8) gesogen. Der nächste Herzschlag drückt das sauerstoffreiche Blut durch die Aorta (9) in den Kreislauf, wo es über ein Netz von Adern alle Organe und Gewebe versorgt. Im Körper gibt es den Sauerstoff ab und wird über Gefäße, die in die zwei Hohlvenen münden, wieder dem Herzen zugeführt.

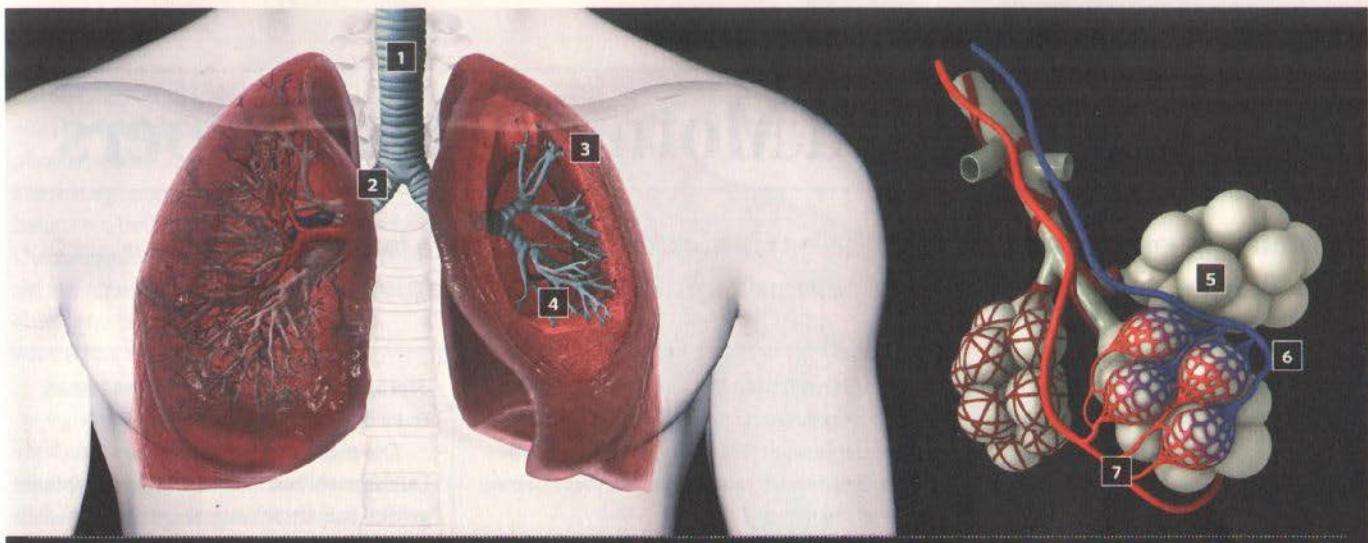
## MEMO: Lunge und Herz

- **Pro Tag** atmen Menschen 20000-mal ein und aus.
- **Mit jedem Atemzug** gelangt rund ein halber Liter Luft in die Lunge.
- **Alle 60 Sekunden** wälzt das Herz fast das gesamte Blutvolumen einmal um.
- **Aus den Lungenbläschen** dringt Sauerstoff ins Blut. Kohlendioxid wandert aus dem Blut in die Lunge.
- **Ausgetatete Luft** enthält 100-mal mehr Kohlendioxid als Frischluft.
- **Die feinsten Kapillaren** sind 0,008 Millimeter dünn, die dickste Ader (die Aorta) zwei Zentimeter stark.
- **Ohne Sauerstoff** kann ein Mensch nur wenige Minuten überleben.

ändern: ihr Sauerstoff zu entziehen und andererseits Kohlendioxid zuzufügen.

Dieser ungemein effiziente Austausch ist nur möglich, weil der Atem über die Hauptbronchien tief in das Innere jeweils eines Lungenflügels eindringt, wo sich die Bronchien immer weiter verzweigen. An den Enden der feinsten Verästelungen sitzen insgesamt mehr als 300 Millionen Lungenbläschen.

Mit jedem Atemzug blähen sich diese winzigen Ballons auf und ziehen sich beim Ausatmen wieder zusammen. Sie sind jeweils von feinen Blutgefäßen umgeben, und nur ein äußerst dünnes Häutchen trennt das Blut von der Atemluft. Während diese Barriere für Flüssig-



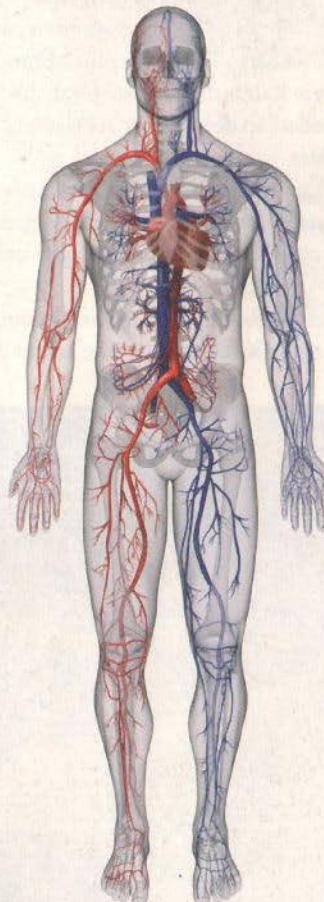
**Der Weg der Luft:** Beim Einatmen strömt frische Luft durch die Luftröhre (1) in die beiden Bronchien (2), die in die Lungenflügel (3) münden. Dort verzweigen sich die Bronchien und bilden immer feinere Verästelungen, die Bronchiolen (4). An deren Spitze befinden sich die Lungenbläschen (5). Erwachsene verfügen über mehr als 300 Millionen dieser ballonähnlichen Gebilde, die jeweils von einem dichten Netz aus feinsten Kapillaren umschlossen sind. Aus

den Lungenbläschen dringt Sauerstoff in die Gefäße und reichert das aus dem Körper kommende sauerstoffarme Blut (6) mit dem Atemgas an. Das nun sauerstoffreiche Blut wird über weitere Kapillaren (7) zum Herzen geführt. Gleichzeitig tritt Kohlendioxid – ein Gas, das beim Stoffwechsel entsteht – aus dem Blut in die Lungenbläschen und damit in die Atemluft über. Beim Ausatmen presst der Brustkorb die verbrauchte Luft aus unserem Körper.

keiten undurchlässig ist, können Gasmoleküle sie ungehindert durchdringen. Hier gelangt der Sauerstoff aus den Bläschen ins Blut; umgekehrt dringt  $\text{CO}_2$  aus dem Körpersaft in die Lungenbläschen. Mit dem Blut erreichen die Sauerstoffmoleküle jede einzelne Körperzelle. Dort wird jener Teil unserer Nahrung, der Kohlenstoff enthält, verbrannt; bei diesem Prozess verbindet sich der Sauerstoff mit Kohlenstoff – es entsteht Kohlendioxid. Und es wird Energie frei, die jede Zelle für mechanische oder chemische Prozesse in ihrem Inneren benötigt. Anschließend befreit das Blut die Zelle von Abfallprodukten wie dem  $\text{CO}_2$ , das zurück zur Lunge befördert wird.

Damit dieser lebenswichtige Kreislauf nicht zum Erliegen kommt, pumpt ein etwa faustgroßer Muskel das Blut des Körpers durch das weitverzweigte Gefäßsystem des Menschen. Wie die Atemzüge vollziehen sich auch die Schläge des Herzens ganz und gar autonom. Alle 60 Sekunden wälzt es nahezu die gesamte Blutmenge im Organismus einmal um.

Genau genommen besteht das Herz aus zwei synchron arbeitenden Pumpen, die zeitgleich zwei unterschiedlich große Kreisläufe bedienen und im Herzmuskel durch eine Scheidewand getrennt sind: Die eine Pumpe treibt sauerstoffarmes



Durch das 100 000 Kilometer lange Adergeflecht eines Erwachsenen strömen fünf bis sechs Liter Blut, das Arterien (rot) vom Herzen weg und Venen (blau) zum Herzen hinführen

Blut in den kleineren, den Lungenkreislauf, wo es wieder mit Sauerstoff angereichert wird. Dann fließt es in die zweite Kammer und wird von dieser Pumpe in den weit größeren, den Körperkreislauf gedrückt. Nachdem es alle Zellen des Körpers mit Sauerstoff beliefert (und  $\text{CO}_2$  aufgenommen) hat, strömt es wieder zurück zum Herzen.

Der mächtige, vom Herzmuskel angetriebene Blutkreislauf versorgt den Körper aber nicht nur mit Sauerstoff, er verteilt auch Nährstoffe wie Eiweiße, Zucker oder Fette, die über die Darmschleimhaut aufgenommen und in die Blutbahn abgegeben werden. Aus einem Teil dieser Substanzen, vor allem aus Eiweißbausteinen, stellen die Zellen Körpermaterial her. Aus anderen, vor allem aus Zucker und Fetten, gewinnen sie mithilfe des eingeatmeten Sauerstoffs Energie.

Sinkt die Sauerstoffkonzentration im Blut und steigt die des  $\text{CO}_2$  über einen kritischen Wert, registrieren Sensoren in den Gefäßen den Mangel. Sofort signalisiert ein für die Atmung zuständiges Hirnareal der Atemmuskulatur, schneller und tiefer Luft zu holen. So muss unsere Lunge bei längerem Radfahren etwa fünfmal mehr Luft umschlagen als im Normalzustand, bei Höchstleistung sogar das Zehnfache.

# Die Stützen und Motoren des Körpers

Die Knochen geben dem Menschen seine Gestalt, und die Muskeln lassen ihn agieren – ohne sie wäre der Mensch ein zur Bewegung unfähiger Gewebehaufen

**D**er Mensch fiele in sich zusammen und käme nicht mehr voran: Ohne Skelett und Muskeln hätte er nichts, was ihm Halt gäbe oder ihn antriebe; seine Augen blieben geschlossen, er bekäme keinen Bissen herunter, sein Herz stünde still.

Die Muskeln – Hunderte von Kraftpaketen, in denen winzige molekulare Motoren arbeiten – sowie stabile Knochen, auf die die Kraft dieser Muskeln übertragen wird, bilden einen hocheffizienten Verbund, der den Körper des *Homo sapiens* stützt und zugleich mobil macht.

Den wechselnden Belastungen, denen der menschliche Körper dabei ausgesetzt ist, passt sich das Bewegungssystem dynamisch an: Wo immer es regelmäßig beansprucht wird, baut es zusätzliche Substanz auf; bei mangelnder Bewegung (etwa bei Astronauten in der Schwerelosigkeit) bildet es sich dagegen zurück. Das gilt ebenso für alle rund 640 Muskeln, die

ein Mensch besitzt, wie für die mehr als 200 Knochen, aus denen sich sein Grundgerüst zusammensetzt.

Anatomen unterscheiden vier Formen von Knochen:

- flache Knochen; sie sind plan, bilden beispielsweise die Rippen oder umschließen als schützende Kapsel das Gehirn;
- Röhrenknochen; zu ihnen zählen die langen Knochen, etwa der Arme, und sie sind durch Gelenke miteinander verbunden, die den Extremitäten besonders großen Bewegungsspielraum verleihen. Zudem dienen sie, wie alle Knochen, als Speicher für Minerale wie Kalzium und Phosphor, die bei Bedarf an den Körper abgegeben werden;
- kurze Knochen; diese quadratischen oder rundlichen Versatzstücke fügen sich unter anderem zu den Hand- und Fußwurzelknochen;
- unregelmäßige Knochen; zu ihnen zählen alle Knochen, die sich keiner der

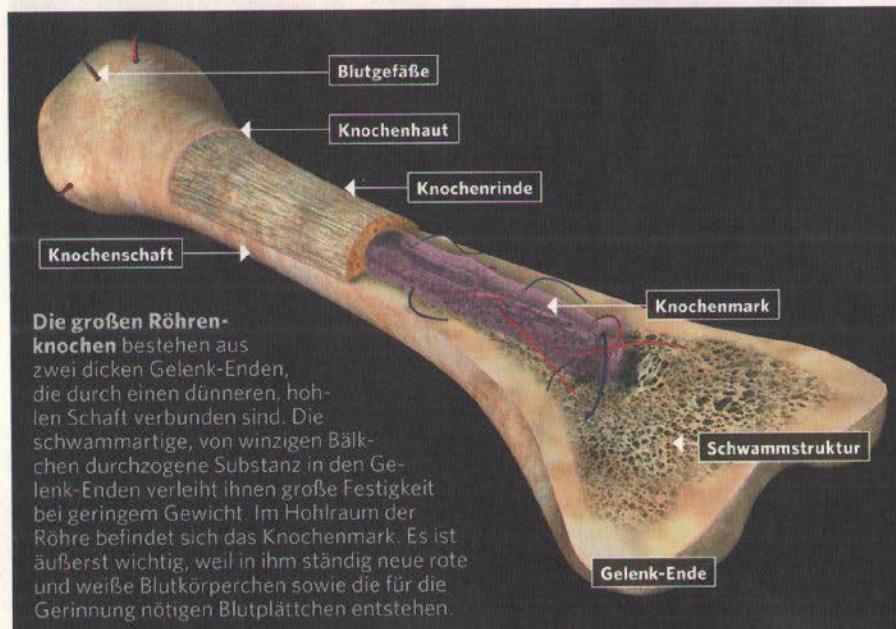
drei anderen Formen zuordnen lassen, etwa die Wirbel.

Die menschlichen Gebeine sind Leichtgewichtkonstruktionen: Sie bieten größte Stabilität bei geringstem Materialaufwand. Ein Oberschenkelknochen etwa kann einer Belastung von bis zu 1,6 Tonnen Gewicht standhalten.

Die Röhrenknochen bestehen aus einem hohlen Schaft mit fester Wand, die

## MEMO: Skelett und Muskeln

- **Kalzium und Phosphor** sind die Minerale, aus denen Knochen bestehen.
- **Es gibt vier** verschiedene Formen von Knochen im Körper.
- **Röhrenknochen** können bis zu 1600 Kilogramm Gewicht aushalten.
- **Die Muskeln des Magens** gehören zur glatten Muskulatur; daneben gibt es quergestreifte Muskeln, etwa den Bizeps.
- **Die eigentlichen Muskelmotoren** sind Bruchteile eines Millimeters groß.
- **Allein rund 40 Muskeln** sind nötig, um ein Bein zu bewegen.
- **Bei schwerer körperlicher Arbeit** steigt der Sauerstoffverbrauch im Muskel um das 500-Fache.



umhüllt ist von einer feinen Haut. Der Hohlräum enthält gelbes, fettriches Mark. Das massig anmutende Kopfende entspricht eher einer schwammartigen Substanz: Sie setzt sich aus winzigen, balkenähnlichen Elementen zusammen, die so ausgerichtet sind, dass sie Zug- und Druckkräfte optimal weiterleiten und der Konstruktion trotz ihrer geringen Masse große Stabilität verleihen. In Hohlräumen zwischen den Balken-Elementen lagert das rote Knochenmark, in dem sich die Zellen des Bluts und des Immunsystems bilden.

Zusammengehalten, stabilisiert und bewegt werden die einzelnen Knochen

durch Gelenke, Bänder, Sehnen – und vor allem durch die Muskeln. Bei komplexen Bewegungen sind stets mehrere Muskeln gleichzeitig aktiv: 40 etwa heben ein Bein und bewegen es vorwärts, Dutzende halten uns bei einem Balanceakt auf einem schmalen Steg, und Hunderte leisten Schwerstarbeit bei einem Handstand.

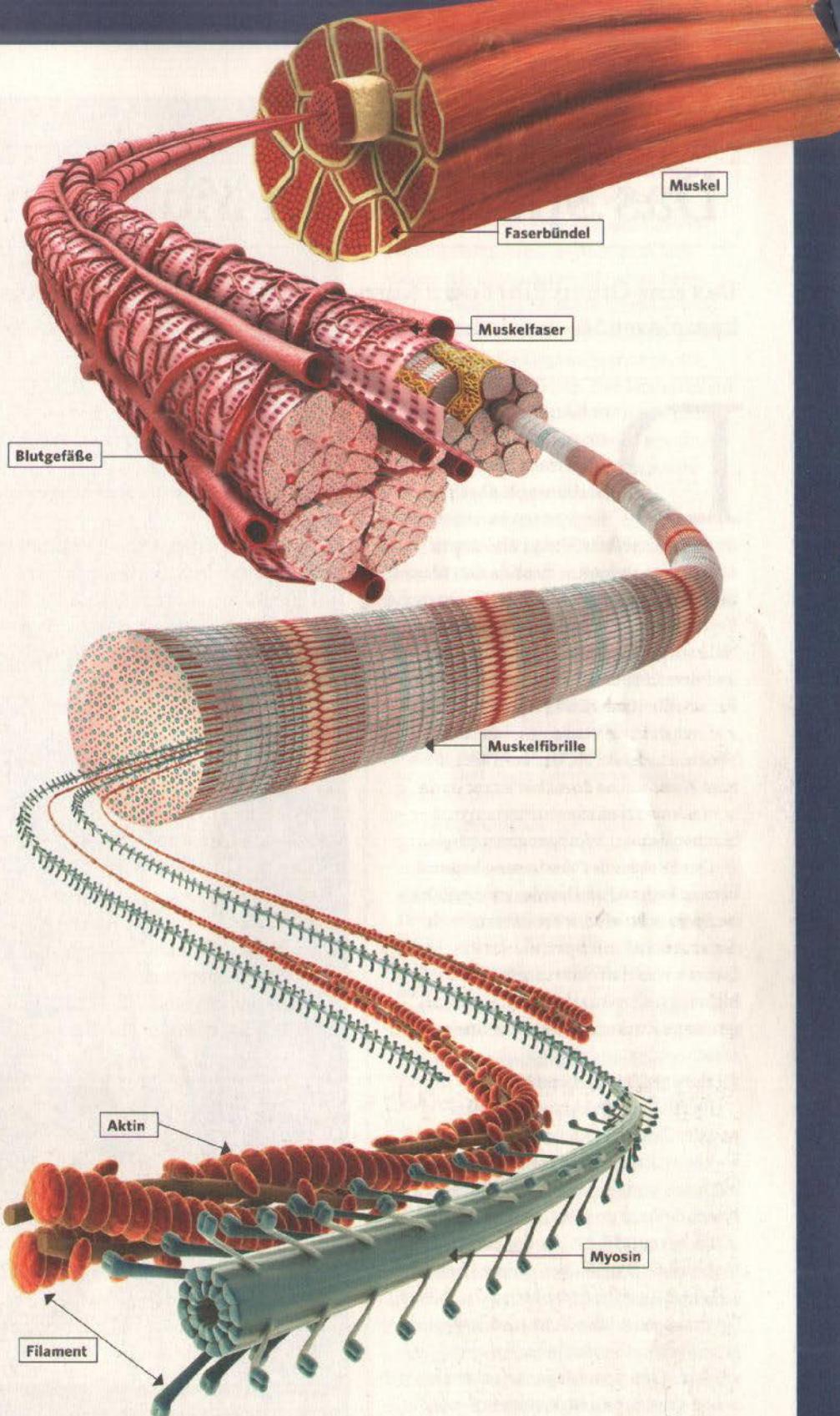
Es gibt zwei Arten von Muskeln:

- glatte Muskeln (mehr als 200); sie kleiden Hohlorgane aus, etwa den Magen-Darm-Trakt oder die Harnblase; sie können sehr lange angespannt bleiben, ohne zu ermüden (wie der Schließmuskel am Anus) – und arbeiten, ohne dass es uns bewusst ist;
- quer gestreifte Muskeln (mehr als 400), so genannt, weil sie unter dem Mikroskop betrachtet ein gleichmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen aufweisen; zu ihnen zählen alle Muskeln, die über Sehnen direkt mit den Knochen verbunden sind, etwa der Bizeps.

Die meisten Muskeln bestehen aus derben Muskelbinden, die jeden Skelettmuskel umschließen. Der teilt sich auf in Bündel kleiner Fasern. Das sind 15 Zentimeter lange Zellen, die Hunderte von Fibrillen enthalten, die eigentlichen „Muskelmotoren“. Diese nur Tausendstelbruchteile eines Millimeters großen Maschinen bewegen den Muskel, indem sich in ihnen längliche Strukturen auf ähnliche Weise verkürzen oder verlängern wie ein zusammenschiebbare Teleskop (siehe Illustration rechts). Für diese Leistung benötigen sie Energie. Die produzieren die Kraftwerke der Zellen und verbrauchen dabei Sauerstoff, der vom Blut angeliefert wird: bei schwerer körperlicher Arbeit bis zu 500-mal mehr als im Ruhezustand.

Für diese Tätigkeit sind Skelettmuskeln besonders gut vernetzt mit dem Nervensystem und lassen sich, anders als zum Beispiel der Herzmuskel, willentlich steuern – etwa beim Beugen eines Arms.

Das ständige Benutzen unseres Bewegungssystems ist lebenswichtig: Drei Wochen Bettruhe, so zeigen Studien, schwächen Muskeln und Knochen mehr als zwei Jahrzehnte des Alterns.



**Das Kraftpaket eines Muskels** ist aus vielen winzigen Filamenten aufgebaut, die sich zu größeren, stärkeren Einheiten bündeln. Jedes dieser Filamente besteht aus zwei Molekülsorten: dem Myosin (blau) und dem Aktin (orangefarben). Durch einen komplizierten biochemischen Mechanismus, der Energie benötigt, gleiten etwa beim Anspannen eines Muskels die beiden Molekülsorten aneinander vorbei. Dabei schieben sie sich wie eine Teleskopstange ineinander – der Muskel verkürzt sich und übt eine Kraft aus. Die Filamente sind zu Fibrillen zusammengefasst, mehrere Fibrillen bilden eine Muskelfaser, die formen ein Faserbündel und schließlich den Muskel.

# Das Spektakel nach der Mahlzeit

Das eine Organ führt dem Körper Nährstoffe zu, das andere scheidet Gifte aus: Nur dank komplexer Mechanismen können Darm und Niere diese Meisterleistung vollbringen

Der Körper will, dass wir essen – damit er versorgt wird mit Baustoffen und Energie. Doch um die Speisen zu verwerten, muss er erhebliche Vorarbeit leisten: zuerst alles zerkaufen, dann in den Magen befördern und schließlich im Darm in die Bestandteile zerlegen. Nur so können die Nährstoffe aus der Kost ins Blut gelangen und den Körperzellen in Form winziger Rohstoffhäppchen zugeführt werden.

Der gesamte Vorgang spielt sich im Verdauungstrakt ab, der vom Mund bis zum Anus reicht und über ein erstaunliches Arsenal an mechanischen und biochemischen Werkzeugen verfügt.

Der Prozess der Verdauung beginnt bereits in der Mundhöhle, wo die Zähne Speisen zu einem Brei zermahlen, der sich dabei mit Speichel vermischt. Der zersetzt den Nahrungsbrei mit hilfe spezieller Enzyme, die wie Scheren lange Zuckerketten in der Speise zerschneiden und sie so vorbereiten für die weitere Verdauung.

Ist die Kost zerkleinert, wird sie von der Zunge in Richtung Rachen und weiter in die Speiseröhre befördert, meist in Dosen von fünf bis 15 Millilitern. Anschließend erreicht sie den Magen.

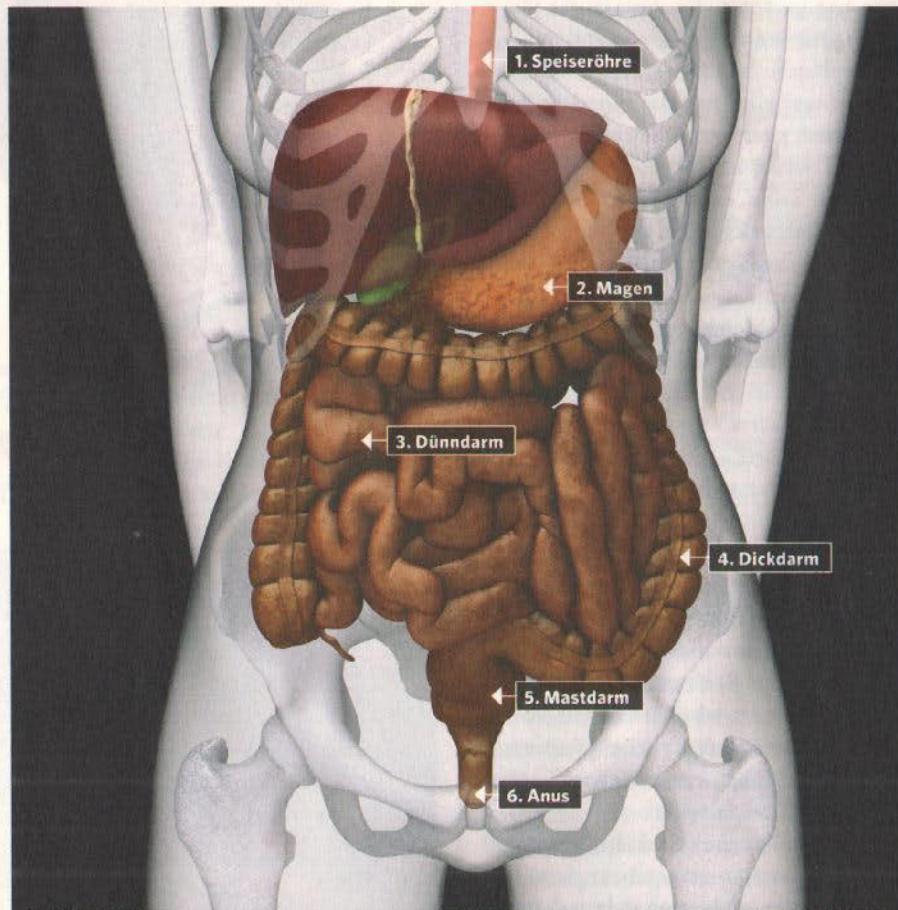
Dieser rund 1,5 Liter fassende Hohlraum dient als Vorratsbehälter, der selbst eine größere Mahlzeit zwischenlagern kann, sie durch Muskelbewegung gründlich durchmischt und weiter verdaut. Denn der Magensaft enthält neben Verdauungsenzymen 0,5-prozentige Salzsäure, die sogar eine Rasierklinge aufzulösen vermag und mit der Speise eingeschleppte Keime abtötet.

In diesem aggressiven Bad, gegen das der Magen selbst durch eine dicke Schleimhaut geschützt ist, lösen sich die groben Nahrungspartikel auf. Der Brei

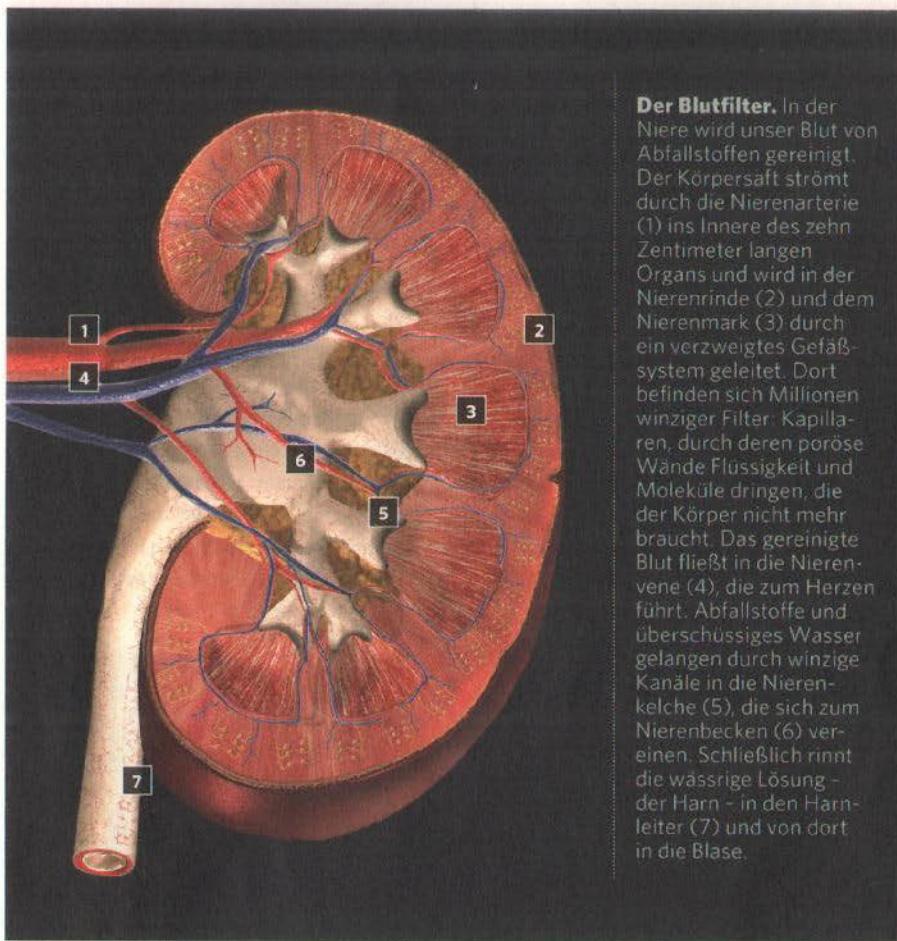
wird flüssig – und langsam durch rhythmische Muskelbewegungen zum Dünndarm befördert.

Der muskulöse, vier bis sechs Meter lange Schlauch mit einem Durchmesser von etwa 2,5 Zentimetern spielt beim Verdauungsprozess die Hauptrolle. In

einem ersten, nur 20 bis 30 Zentimeter langen Abschnitt sondern Gallenblase und Bauchspeicheldrüse höchst wirksame Verdauungssäfte ab. Die verteilen sich im Dünndarm und spalten vor allem Zucker, Fette und Eiweiße in einzelne Moleküle auf. Gut zehn Stunden nach der



**Die Passage der Nahrung.** Speisen gelangen über die Speiseröhre (1) in den rund 1,5 Liter fassenden Magen (2). Dort tötet die Magensäure Keime ab. Enzyme spalten Fette und Eiweiße. Anschließend drückt der Magen den Speisebrei in den Dünndarm (3), in dem etwa Gallensäure und Enzyme die Nahrung weiter zersetzen. Die Zellen der Darmschleimhaut nehmen die in kleine Moleküle aufgeschlossenen Nährstoffe auf: Amino- und Fettsäuren oder Zucker. Diese Substanzen gelangen über Blutgefäße, die den Darm umschlingen, in den Blutkreislauf. Muskelkontraktionen befördern die Speisereste in den 1,5 Meter langen Dickdarm (4), in dem der Nahrung Wasser entzogen wird. Obendrein bauen Bakterien Unverdautes ab und produzieren dabei Vitamine und Fettsäuren. Der Stuhl wird in den Mastdarm (5) gedrückt und über den Anus (6) ausgeschieden.



**Der Blutfilter.** In der Niere wird unser Blut von Abfallstoffen gereinigt. Der Körpersaft strömt durch die Nierenarterie (1) ins Innere des zehn Zentimeter langen Organs und wird in der Nierenrinde (2) und dem Nierenmark (3) durch ein verzweigtes Gefäßsystem geleitet. Dort befinden sich Millionen winziger Filter: Kapillaren, durch deren poröse Wände Flüssigkeit und Moleküle dringen, die der Körper nicht mehr braucht. Das gereinigte Blut fließt in die Nierenvene (4), die zum Herzen führt. Abfallstoffe und überschüssiges Wasser gelangen durch winzige Kanäle in die Nierenkelche (5), die sich zum Nierenbecken (6) vereinen. Schließlich rinnt die wässrige Lösung – der Harn – in den Harnleiter (7) und von dort in die Blase.

Mahlzeit stehen die meisten der zerlegten Nährstoffe dem Organismus zur Verfügung. Gelöst im Nahrungsbrei, gleiten die Moleküle an die Zellen der Darmschleimhaut. Dort werden etwa Zuckerteilchen von speziellen Transportmolekülen aufgenommen. Die befördern jeweils nur bestimmte Substanzen und reichen sie an ein Netz feinster Blutgefäße weiter. So gelangen die Teilchen in den Blutstrom und mit diesem schließlich in jede einzelne Körperzelle. Was jetzt noch an unverdauten Speiseresten übrig ist, transportiert die Muskulatur in den Dickdarm.

Dieser 1,5 Meter lange und sechs Zentimeter dicke Schlauch beherbergt den Großteil der Billionen Darmbakterien, die sich nun über bisher unverdauten Nahrungsbestandteile hermachen. Jeder Mensch verfügt über einen individuellen Pool Hunderter verschiedener Bakterienarten und bildet mit ihnen eine einzigartige Lebensgemeinschaft (siehe Seite 70). Einige Mikroben produzieren beim Abbau der Speisereste Substan-

zen, die für den Körper wichtig sind, etwa Vitamine oder spezielle Fettsäuren. Andere lösen besonders lange Kohlenhydratverbindungen auf, wie sie in Kohl oder Hülsenfrüchten vorkommen.

Die Resteverwertung braucht Zeit: Zwischen 20 und 50 Stunden bleiben die Nahrungsrelikte im Dickdarm. Unverdauliche, durch Wasserentzug verdickte Klumpen drückt er schließlich ins Rektum und scheidet sie aus.

All jene Stoffe aber, die der Körper über die Darmschleimhaut in seine Blutbahn aufgenommen hat, werden nun verwertet. Zucker etwa dient den Körperzellen als Brennstoff. Fette werden unter anderem als Energiespeicher in Depots gelagert. Und aus den aufgenommenen Eiweißen setzen die Zellen des Organismus neue Proteine zusammen.

Die sind nicht nur das wichtigste Baumaterial des Körpers, sie überbringen auch – etwa als Hormone – Botschaften, dienen als Antikörper der Infektionsabwehr, zerschneiden als Enzyme chemi-

sche Verbindungen und bauen daraus wiederum andere Substanzen auf.

Neben den Nährstoffen aus der Verdauung zirkulieren im Blut auch jede Menge Abfallprodukte, die etwa beim Zellstoffwechsel anfallen. Deshalb wird unser Körpersaft ununterbrochen durch zwei faustgroße Organe gepumpt, die ihn reinigen: die Nieren. Die bestehen aus einem hochkomplexen, mikroskopisch feinen Filtersystem, durch das wie durch ein Sieb Minute für Minute insgesamt rund 1,2 Liter Blut strömen.

Ist es danach gereinigt, fließt das Blut zurück in den Körper. Das Filtrat aus unbrauchbaren Stoffen hingegen wird zusammen mit überschüssigem Wasser

#### MEMO: Verdauung und Niere

- Bei Erwachsenen misst der Verdauungstrakt gut acht Meter.
- Die Nahrung passiert drei Stationen: den Magen, den Dünndarm und den Dickdarm.
- Die Magensäure tötet Bakterien, Enzyme beginnen Eiweiße und Fette zu spalten.
- Gut zehn Stunden nach der Mahlzeit stehen dem Organismus die meisten Nährstoffe zur Verfügung.
- In der Niere wird Blut gefiltert: Schadstoffe gelangen in den Harn, werden in der Blase gesammelt und über die Harnröhre ausgeschieden.
- In Nierenmark und -rinde befinden sich Millionen Mikrofilter, die das Blut reinigen.

aus dem Blut über mehrere Zwischenstationen in die Harnblase geleitet, die es letztlich als Urin entlässt.

Unser Verdauungs- und Filtersystem arbeitet ununterbrochen und leistet dabei Schwerstarbeit: Rund 20 Tonnen Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße muss es im Laufe eines Menschenlebens verwerten. Für die reibungslose Versorgung messen druckempfindliche Nervenzellen in der Magenwand permanent den Füllstand des Speichers und melden ihn dem Gehirn. Leert er sich zusehends, bekommen wir automatisch Appetit, verleiben uns die nächste Portion Nahrung ein.

Und das Spektakel nach der Mahlzeit beginnt von Neuem.

# Der schützende Spiegel unserer Seele

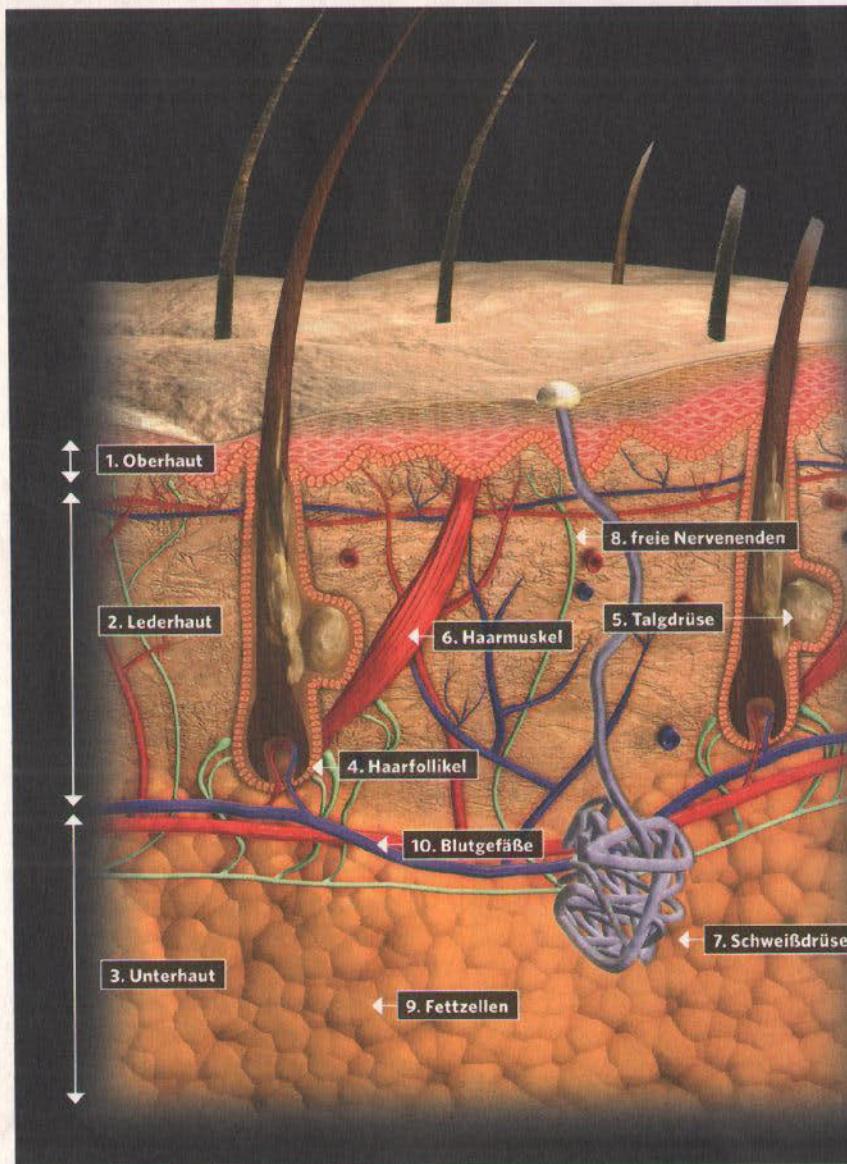
Sie bewahrt vor Infektionen, dient als Kälteschutz und als Energiereserve:  
Ohne die Haut könnten wir nicht leben

**M**an könnte sie auch als unser „äußeres Gehirn“ bezeichnen. Denn was den Körper wie eine Hülle umgibt, ist im Mutterleib aus der gleichen Zellschicht hervorgegangen wie das Denkorgan. Und

tatsächlich ist die Haut weit mehr als eine Verpackung, die uns vor dem Austrocknen bewahrt, vor Kälte und Sonnenstrahlung abschirmt, vor Schmutz schützt und Krankheitserreger abhält. Vielmehr ist sie ein hochkomplexes Organ, das so vielfältige Funktionen erfüllt wie kaum

ein anderes. Mit einer Fläche von 1,5 bis zwei Quadratmetern bei Erwachsenen ist es zugleich auch das größte.

Vor allem aber: Die Haut ist ein Kommunikationssystem mit Millionen Nervenfasern, deren Enden unter anderem mit Sinneszellen verbunden sind



1. Die Oberhaut (Epidermis) besteht aus verhornten, abgestorbenen Hautzellen. Die Hornsubstanz schützt die darunterliegenden Hautschichten.
2. Die Lederhaut (Dermis) gibt der Hülle Festigkeit und Elastizität. Hier liegen Nerven, Blutgefäße, Drüsen.
3. Das fettreiche Bindegewebe der Unterhaut (Hypodermis) ist besonders locker, weshalb sich die Haut leicht hin und her schieben lässt.
4. In den Follikeln wachsen die Haare heran. Nerven an der Wurzel (grün) registrieren feinste Bewegungen des Haares. Menschen besitzen bis zu sechs Millionen Haare, die Tag für Tag rund 0,35 Millimeter wachsen.
5. Talgdrüsen an den Haarwurzeln produzieren ein Fett, das die Haare schützt und geschmeidig macht.
6. Jedes Haar kann mithilfe eines kleinen Muskels aufgerichtet werden.
7. Etwa zwei Millionen Schweißdrüsen scheiden eine wässrige Salzlösung aus, die unsere Haut kühlt und vor Bakterien schützt.
8. Die Enden feiner Nervenstränge nehmen mechanische Reize wahr, Druck und Temperaturunterschiede.
9. Fettzellen isolieren den Körper vor Kälte und dienen unter anderem als Energiereserve.
10. Feine Blutgefäße (Kapillaren) versorgen das Gewebe mit Sauerstoff und Nährsubstanzen - und transportieren Abfallstoffe ab.

und die uns Temperaturschwankungen erfassen lassen sowie Vibrationen, Druck- und Tastreize.

Grob gegliedert besteht die Haut aus drei Lagen:

- der Oberhaut; die nur Bruchteile eines Millimeters dicke äußere Schicht setzt sich im Wesentlichen aus verhornten Zellen zusammen und schützt die darunterliegenden Lagen. Sie wird laufend von nachrückenden, frischen Zellen aus den unteren Regionen ersetzt. Die alten sterben ab und werden als winzige Schüppchen abgestoßen. Einige jener Oberhautzellen stellen zudem gelblich-rötliche bis braunschwarze Pigmente her, Melanine, die der Haut ihre Farbe verleihen.

Vorsichtig dosierte UV-Strahlung regt die Melaninbildung an. Die

Haut wird nach einigen Tagen braun und ist dann besser vor Schäden durch stärkere Sonnenstrahlung geschützt;

- der Lederhaut; sie variiert in ihrer Dicke zwischen 0,3 Millimetern an den Augenlidern und 2,4 Millimetern an

Handflächen und Fußsohlen und ist aus untereinander verbundenen Kollagenfasern aufgebaut, die sie stabilisieren, elastisch und reißfest machen:

- der Unterhaut; diese dritte, weniger als einen Millimeter bis einige Zentimeter starke Schicht besteht aus

lockerem Bindegewebe, in das Klumpen von Fett eingelagert sind. Sie dienen als elastischer Puffer gegen Stöße, als Kälteschutz und Energiespeicher. Weil sich die Fettklumpen außerdem verschieben lassen, ist unsere Haut flexibel.

Frische Zellen (1) der Epidermis teilen sich, rücken allmählich nach oben (2), sterben ab (3) und bilden Hautschuppen (4)

lockeres Bindegewebe, in das Klumpen von Fett eingelagert sind. Sie dienen als elastischer Puffer gegen Stöße, als Kälteschutz und Energiespeicher. Weil sich die Fettklumpen außerdem verschieben lassen, ist unsere Haut flexibel.



Insgesamt ist unsere dreilagige Körperhülle an manchen Stellen nur wenige Millimeter, an anderen dagegen bis zu mehrere Zentimeter dick.

Darin eingebettet sind Blutgefäße, Lymphkanäle sowie die Nerven des Kommunikationssystems, die sich nach oben hin immer feiner verästeln. Filigrane Kapillare versorgen die Körperhülle über das Blut mit Nährstoffen und leisten zugleich einen wichtigen Beitrag zur Regulation der Körpertemperatur: Bei Kälte ziehen sie sich zusammen und drosseln den Blutfluss, so wird weniger Energie an die Umwelt abgegeben; bei Hitze dehnen sich die Gefäße dagegen aus, ihre Oberfläche vergrößert sich, und das Blut vermag mehr Wärme nach außen abzustrahlen.

Damit unser Körper nicht überhitzt, leiten etwa zwei Millionen Drüsen den Schweiß – 99 Prozent Wasser und geringe Mengen säurehaltiger Stoffe wie Harnstoff oder Salze, die vielfach aus dem umliegenden Gewebe stammen – auf die Hautoberfläche. Die verdunstende Flüssigkeit kühlst den Körper, das darin enthaltene Sekret bildet den Säureschutzmantel und verhindert, dass sich unerwünschte Bakterien ausbreiten. Erst die Fähigkeit der Haut,

durch Schwitzen Hitze auszugleichen, ermöglichte es *Homo sapiens*, sich zu einem ausdauernden Jäger zu entwickeln.

Ebenso tief wie die Schweißdrüsen sind auch Haarfollikel, schmale Einstülpungen, in der Haut versenkt. Aus ihnen sprühen rund fünf bis sechs Millionen Haare, davon bis zu 150 000 auf dem Kopf. Jedes Haar wächst einzeln aus einer Art Keimzelle. An ihr heftet jeweils eine Talgdrüse, die eine Mischung aus Fett und zerfallenen Zellen abgibt und so dafür sorgt, dass die schuppige Oberfläche unserer Haare geschmeidig bleibt.

Dabei hilft ein kleiner Muskel, der den meist schräg in der Haut steckenden Haarbalg aufzurichten vermag: Zieht er sich zusammen, drückt er auf

die Drüse und presst, wenn sich das Haar bewegt, ein Tröpfchen des Schmiermittels empor.

Mehr als uns zuweilen lieb ist, verrät das winzige Kraftpaket mitunter auch den Zustand unseres Gemüts. Denn Menschenhaare sträuben sich vor allem in jenen Momenten, in denen wir etwa frösteln, uns ekeln, erregt sind. Dann wird die Haut, deren Nervenenden sofort Signale an das Gehirn senden, zu einer Art emotionaler Visitenkarte: gleichsam zu einem Spiegel der Seele.

#### MEMO: Haut

- **Mit einer Fläche** von bis zu zwei Quadratmetern ist die Haut das größte Organ des Menschen.

- **Ihre Oberfläche** besteht aus abgestorbenen, verhornten Zellen.

- **Melanine**, braunschwarze Pigmente, verleihen der Haut ihre Farbe.

- **Sensoren** für Druck, Vibration und Temperatur machen sie zu einem der wichtigsten Sinnesorgane.

- **Finger- und Fußnägel** sind Ausbildung der oberen Hautschicht.

- **Zwei Millionen** Schweißdrüsen sorgen für Kühlung und Schutz vor Bakterien.

- **Rund sechs** Millionen Haare sprühen aus sogenannten Haarfollikeln.

# Die Macht der stillen Boten

Ohne Hormone würde in unserem Körper Chaos herrschen, denn die biochemischen Signalkörper übermitteln über weite Strecken Nachrichten zwischen Zellen und Organen

**S**ie koordinieren das Wachstum, lassen uns einschlafen, erzeugen Glücksgefühle und dirigieren den Stoffwechsel: Hormone sind chemische Botenstoffe, die an diesen und vielen anderen Vorgängen im menschlichen Organismus beteiligt sind.

Der Begriff Hormon (von griech. *ormen* = antreiben) beschreibt die Aufgabe eines solchen Boten: Er operiert in einem fein verzweigten Kommunikationssystem, in dem er Nachrichten zwischen Zellen und Organen über große Distanzen übermittelt. So ermöglicht er Abläufe im Körper wie den Tag-Nacht-Rhythmus und beeinflusst entscheidend unser Verhalten und unsere Gefühle.

Bei Gefahr etwa regelt eine Kaskade von Stresshormonen jene Regungen herunter, die – wie etwa Hunger – die Aufmerksamkeit beeinträchtigen. Andere Botenstoffe kurbeln die Fett- und Zuckerverbrennung an, um Gehirn und Muskeln mit reichlich Energie zu versorgen. Erst wenn die Gefahr vorbei ist, ebbt der Hormonkick wieder ab.

Zwar werden elektrische Signale, etwa des Nervensystems, weitaus schneller weitergegeben. Doch dafür wirken sie auch nur auf bestimmte Zellen. Hormone dagegen haben eine viel breitere Wirkung: Ausgeschüttet ins Blut, treiben sie durch die Gefäße, sickern ins Gewebe und durch Zellmembranen und können jede einzelne Zelle erreichen sowie chemische Prozesse an mehreren Stellen des Körpers gleichzeitig auslösen.

Manche Botenstoffe wirken eher kurzfristig, binnen Sekunden – so die Stresshormone Adrenalin und Noradrenalin, aber auch jene Signalgeber, die Ernährung und Stoffwechsel regulieren, etwa das Insulin. Andere dagegen, wie die Sexualhormone Östrogen und Testosteron, entfalten ihre Kraft erst in

bestimmten Lebensphasen. Sie prägen unsere jeweils geschlechtsspezifischen Merkmale, lassen bei Männern Bärte spritzen, Muskeln wachsen und Samenzellen entstehen, steuern bei Frauen den Menstruationszyklus und lassen Eizellen reifen. Oder sorgen dafür, dass während des Wachstums alle Knochen zur gleichen Zeit länger, Herz und Nieren synchron größer werden.

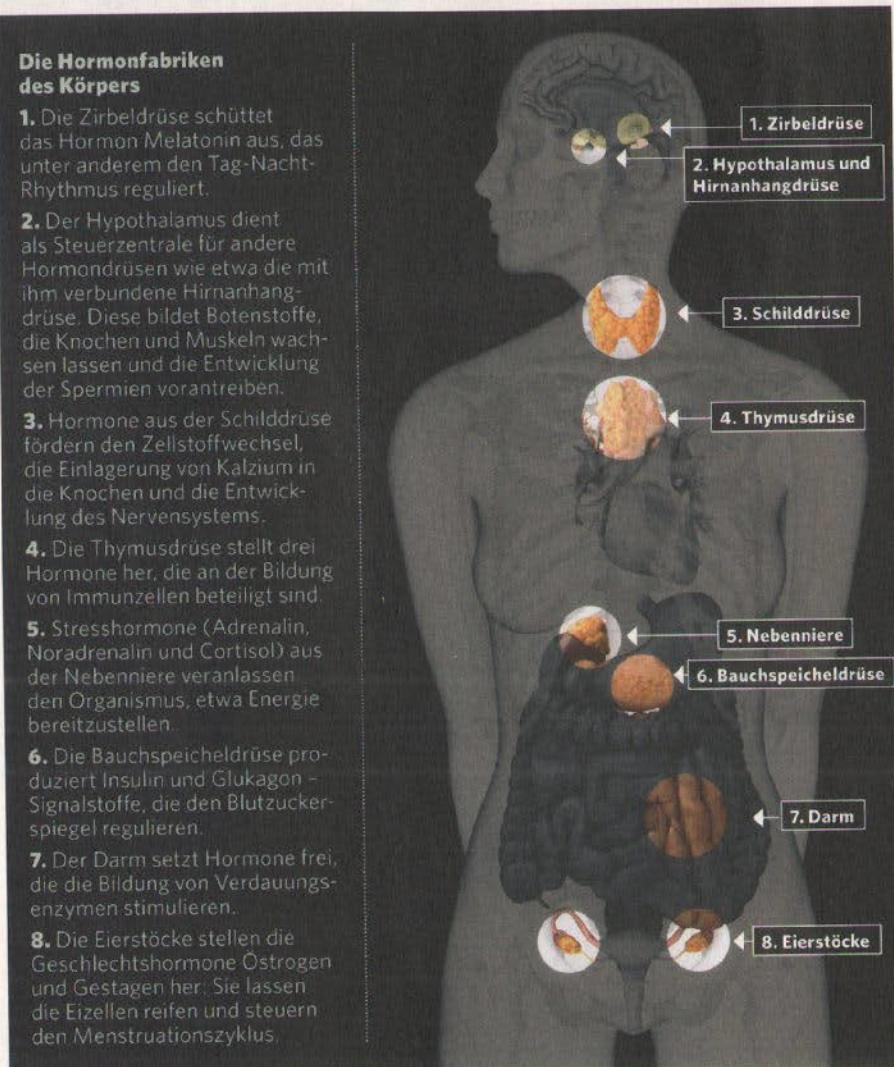
Wie viele und welche Hormone zu einem bestimmten Zeitpunkt durch den

Körper strömen, das entscheidet zumeist der Hypothalamus (siehe Illustration). Als Teil des Gehirns übersetzt er Nervensignale in chemische Botschaften.

Etwa 150 verschiedene Botenstoffe sind bisher bekannt. Schätzungen gehen jedoch von mindestens 10 000 aus, möglicherweise gibt es sogar doppelt oder dreimal so viele. Und noch wissen die Forscher nicht einmal im Detail, wie das Zusammenspiel der bereits bekannten Hormone funktioniert. □

## Die Hormonfabriken des Körpers

1. Die Zirbeldrüse schüttet das Hormon Melatonin aus, das unter anderem den Tag-Nacht-Rhythmus reguliert.
2. Der Hypothalamus dient als Steuerzentrale für andere Hormondrüsen wie etwa die mit ihm verbundene Hirnanhangdrüse. Diese bildet Botenstoffe, die Knochen und Muskeln wachsen lassen und die Entwicklung der Spermien vorantreiben.
3. Hormone aus der Schilddrüse fördern den Zellstoffwechsel, die Einlagerung von Kalzium in die Knochen und die Entwicklung des Nervensystems.
4. Die Thymusdrüse stellt drei Hormone her, die an der Bildung von Immunzellen beteiligt sind.
5. Stresshormone (Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol) aus der Nebenniere verlassen den Organismus, etwa Energie bereitzustellen.
6. Die Bauchspeicheldrüse produziert Insulin und Glukagon – Signalstoffe, die den Blutzuckerspiegel regulieren.
7. Der Darm setzt Hormone frei, die die Bildung von Verdauungs-enzymen stimulieren.
8. Die Eierstöcke stellen die Geschlechtshormone Östrogen und Gestagen her. Sie lassen die Eizellen reifen und steuern den Menstruationszyklus.



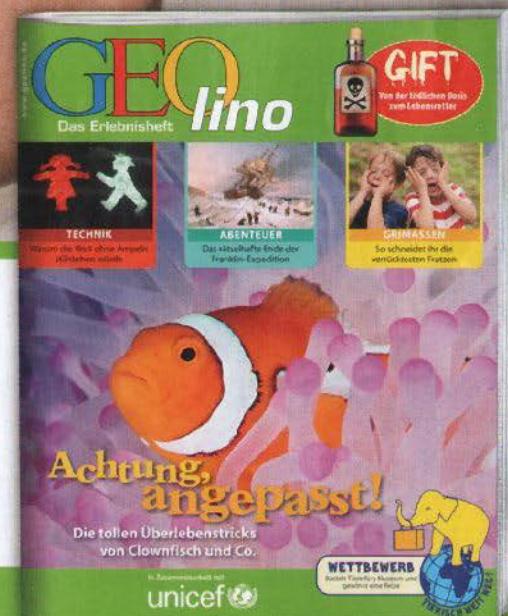
FÜR KINDER AB  
8 JAHREN



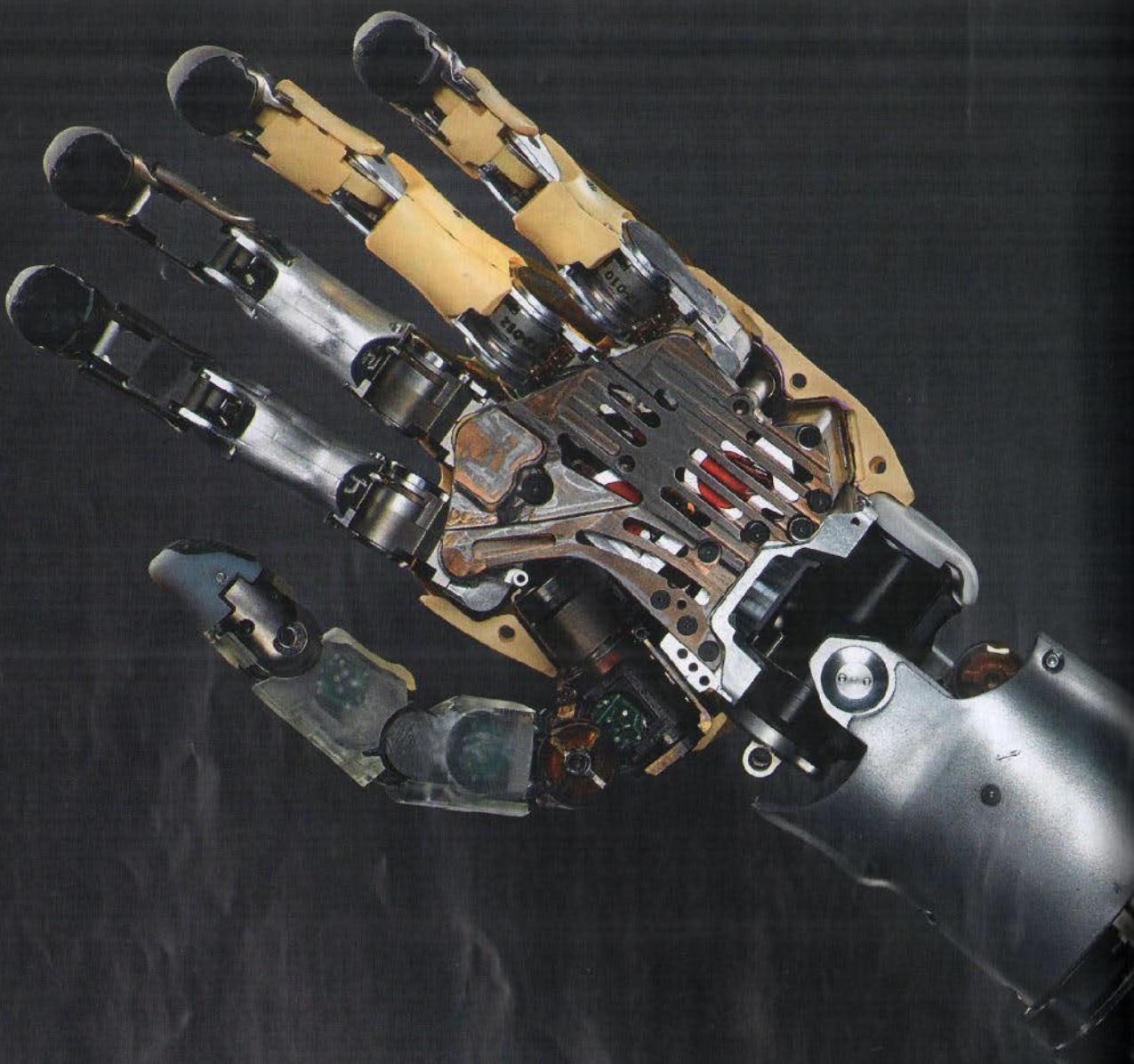
Können große Nasen besser  
riechen?

Alles, was Kinder wissen wollen. Jeden Monat in GEOlino.

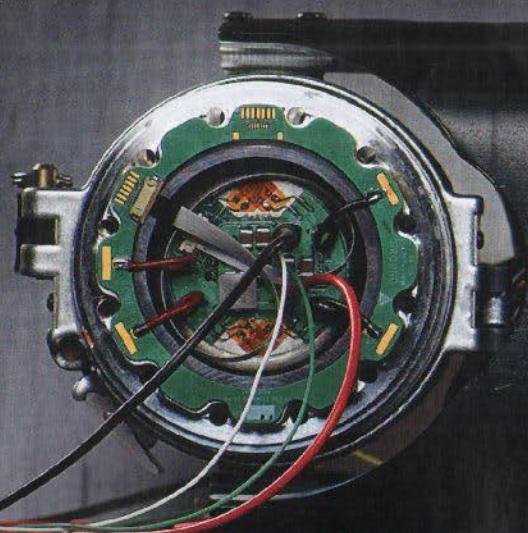
[www.geolino.de](http://www.geolino.de)



GEOlino. Wissen macht Spaß

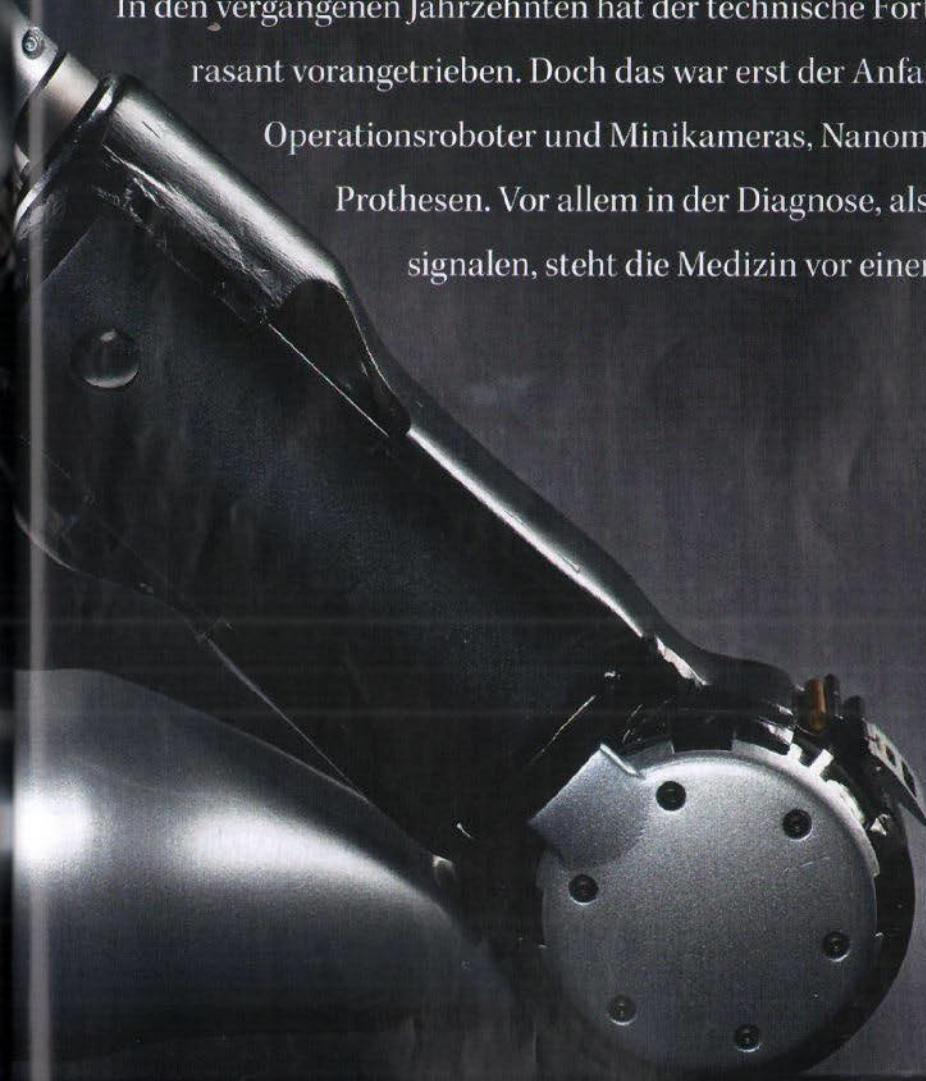


Eine maßgeschneiderte Medizin prognostizieren viele Forscher. Im US-Bundesstaat Arizona arbeiten Wissenschaftler bereits daran: Sie entwickelten diese Armprothese, die der Patient mit Nervenimpulsen steuert – und mit der er sogar Berührungen wahrnehmen kann



# Die Medizin von morgen

In den vergangenen Jahrzehnten hat der technische Fortschritt die Heilkunde rasant vorangetrieben. Doch das war erst der Anfang: Schon heute erproben Ärzte Operationsroboter und Minikameras, Nanomaschinen und Hightech-Prothesen. Vor allem in der Diagnose, also der Deutung von Körpersignalen, steht die Medizin vor einer Revolution



Jahrtausendelang waren Ärzte darauf angewiesen, nur mittels Erfahrung und Beobachtung zu ermitteln, welche Art von Erkrankung ein Mensch hatte. Sie versuchten, das Leiden des Patienten zu ertasten, horchten auf seinen Atem und den Herzschlag, fühlten den Puls. Und dann, nach intensiver Befragung, stellten sie ihre Diagnose.

Das änderte sich, als der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen 1895 seine geheimnisvollen „X-Strahlen“ entdeckte und damit die Grundlage für die Röntgengeräte legte. Nun wurde es

## Ärzte wollen eines Tages originalgetreue Kopien von Gelenken mit 3-D-Druckern anfertigen

möglich, in einen lebenden Körper hineinzugucken und seine Knochen sichtbar zu machen, ohne ihn zu verletzen.

Es war das erste einer Reihe von Verfahren, die man inzwischen „bildgebend“ nennt, weil sie Bilder aus dem Körperinneren liefern, und die die Diagnosemöglichkeiten in der Medizin revolutionierten. Heute nutzen Mediziner unter anderem Computertomographen (eine Weiterentwicklung des Röntgengerätes), Magnetresonanztomographen (die mit magnetischen Feldern arbeiten), Positronen-Emissionstomographen (die die Strahlung bestimmter, schwach radioaktiver Substanzen registrieren)

und Ultraschallgeräte (die hochfrequente Töne erzeugen und aus dem Echo ein Bild berechnen), um den menschlichen Körper zu durchleuchten und zu ermitteln, was ihn krank macht.

Doch die bildgebenden Verfahren sind bei Weitem nicht die einzigen Möglichkeiten, mit denen Ärzte die Krankheit eines Patienten ergründen können. In Laboren etwa analysieren sie sein Blut, denn ein Leiden beeinflusst oft dessen Zusammensetzung oder hinterlässt chemische Substanzen, die sonst nicht vorhanden sind.

Auch andere Veränderungen des Körpers signalisieren, wenn etwas nicht stimmt, und sogar das Erbgut gibt der modernen Medizin Indizien, woran ein Mensch leidet oder für welche Erkrankungen er anfällig ist.

Doch all das ist erst der Anfang, denn die Heilkunde ist dabei, sich rasant weiterzuentwickeln und vor allem die diagnostischen Verfahren grundlegend zu verändern. Vier Trends prägen diese technologische Revolution:

- Computer werden noch weitaus stärker als bisher alle Bereiche der Medizin durchdringen. Sie werden automatisch Blutproben untersuchen und die Daten dorthin übermitteln, wo sie gerade benötigt werden – in die Hausarztpraxis oder auf die Intensivstation. Software wird dreidimensionale Bilder aus dem Körperinneren liefern, und Roboter werden im Operationssaal die Chirurgen unterstützen.

- Medizinische Geräte werden immer kleiner und kompakter. Minilabore in der Arztpraxis liefern die Ergebnisse von Blutuntersuchungen binnen Minuten. Bei chronisch Kranken – etwa Diabetikern oder Herzpatienten – überwachen Sensoren direkt an den Organen deren Funktionen und warnen, wenn sie zu versagen drohen.

- Die Nanotechnik ermöglicht es, winzige Maschinen aus nur wenigen

Molekülen zu konstruieren. Sie könnten eines Tages einzelne Körperzellen ansteuern, dort nach Krankheitszeichen suchen und gezielt Medikamente abladen. Vielleicht werden sie sogar ins genetische Material eingreifen und Erbdefekte korrigieren.

- Die Medizin wird zunehmend auf den individuellen Menschen abgestimmt. Implantate, Prothesen und Therapien werden maßgeschneidert. Und die Wohnungen von Patienten mit chronischen Krankheiten oder Altersleiden werden mit medizinischen Sensoren ausgestattet, die automatisch den Arzt rufen, wenn sie bei den Betroffenen auffällige Werte feststellen.

### 1. Computer und Roboter werden immer wichtiger

Und so könnte ein chirurgischer Eingriff im Operationssaal einer gut ausgestatteten Klinik in 15, vielleicht 20 Jahren aussehen: In der Mitte des Raumes steht der OP-Tisch, auf dem der Patient liegt. Über ihm schwebt ein von der Decke absenkbares Gerät.

Es enthält jene Technik, die nötig ist, um einen Körper mit Röntgenstrahlen, Magnetfeldern oder Ultraschall zu durchleuchten. Kein Kabel ist zu sehen und kaum ein Schlauch. Denn die meisten der Geräte werden über ein Datennetz gesteuert und sind miteinander verbunden.

Der Chirurg spricht noch kurz mit dem Patienten, bevor der in der Narkose versinkt. Dann geht er hinüber zu seinem einige Meter entfernten Arbeitsplatz. Er muss nicht mehr am OP-Tisch stehen, Roboter unterstützen ihn bei der Arbeit.

An einem zweiten Arbeitsplatz sitzt der Anästhesist und dosiert von dort das Narkosemittel, das in die Adern des Patienten fließt. Auf einem Monitor verfolgt er die Betäubung und erhält ständig Daten über den Zustand des zu

Operierenden. Auch alle Informationen aus der elektronischen Krankenakte kann er jederzeit aufrufen. Der Assistenarzt neben ihm hat an seinem Bildschirm Herzschlag, Blutdruck und Atmung des Patienten im Blick.

Am Arbeitsplatz des Chirurgen stehen zwei große Monitore. Die Bildschirme zeigen dem Arzt dreidimensionale Ansichten, die eine Software aus den Magnetresonanz- und Röntgenbilddaten des Patienten errechnet.

Auf dem einen Monitor ist die zu operierende Körperregion zu sehen – die Blutgefäße, die Organe.

Das Bild auf dem zweiten lässt sich je nach Bedarf verändern, von der Ansicht des gesamten Körpers als 3-D-Röntgenbild bis hin zur Vergrößerung kleinsten Gewebeabschnitte, in denen die Magnetresonanz sogar den Stoffwechsel der Zellen sichtbar macht – also zeigt, wie aktiv sie sind.

Und wenn der Arzt den gegenwärtigen Zustand mit älteren Daten vergleichen will, kann er Bilder aus früheren Untersuchungen abrufen.

Vor allem eines aber mutet gespenstisch an, verglichen mit heutigen Operationen: Bei der Arbeit bleibt der Chirurg Meter vom Patienten entfernt und hantiert mit „Manipulatoren“. Das sind Steuerungsgeräte, die jede Handbewegung des Mediziners exakt auf Roboter übertragen, die die eigentliche Arbeit am Patienten verrichten.

Handelt es sich bei dem Patienten zum Beispiel um einen Mann mit einer zu spät diagnostizierten, bösartigen Wucherung im Magen, die nun dringend entfernt werden muss, schicken die Ärzte einen „halbautonomen“ Operationsroboter in seinen Körper.

Ohne dass ein Tropfen Blut fließt, findet der Roboter mithilfe von Magnetfeldern seinen Weg bis in den Magen. Das macht die Maschine noch allein. Anderes dagegen übernimmt der Ope-



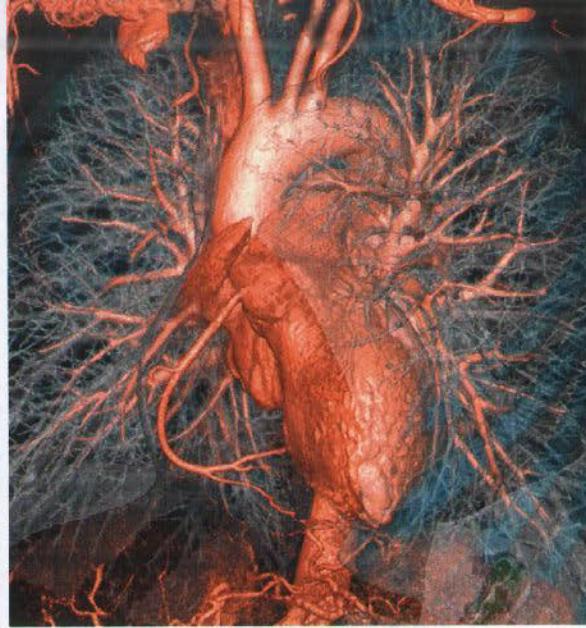
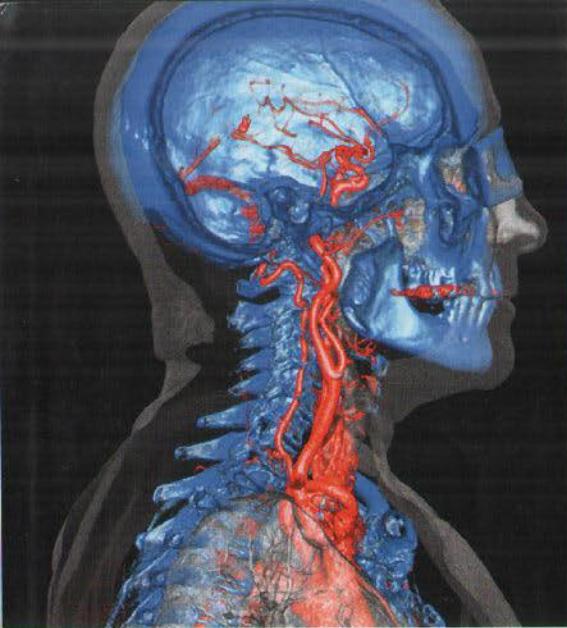
Das Zusammenspiel von Nerven und Gelenken, Muskeln und Sehnen vermögen Ingenieure inzwischen verblüffend genau zu imitieren: Die motorisierten Federn in diesem Prototyp einer Beinprothese könnten bald vielen Patienten neue Sprungkraft verleihen

rateur. So steuert er vor den Bildschirmen sitzend mit den Manipulatoren eine Endoskopkamera, die den Magen und das Geschwulst inspiziert.

Dann beginnt der Chirurg, den Tumor zu entfernen. Nicht durch Schnitte, sondern durch „Ablation“, durch Verödung. Drucksensoren an Messern und Zangen des Roboters übertragen per Funk ihre Informationen auf die Griffe, mit denen der Arzt hantiert. So kann der Operierende genau spüren, welchen Druck der Roboter auf das Gewebe

ausübt – als würde er selbst im Magen die Geräte führen. Die Sensoren übermitteln kleinste Kräfte zurück auf die Steuerungseinheiten, die der Chirurg in seinen Händen hält. So nimmt er sogar das Pulsieren eines Blutgefäßes wahr.

Wenn der Arzt fertig ist, kann er am Monitor sofort erkennen, ob die Operation erfolgreich war. Denn die Magnetresonanztomographie enthüllt den Stoffwechsel von Zellen. Tumorzellen zum Beispiel zeigen eine höhere Aktivität als gesunde. Offenbar sich der



»Bildgebende Verfahren« wie die Computertomographie liefern Ärzten immer präzisere Darstellungen des Körperinneren – etwa vom Schädel (o. l.) oder von Herz und Lunge (o. r.). In Zukunft wollen Mediziner diese Technik aber nicht nur zur Diagnose, sondern auch bei Operationen einsetzen

Stoffwechsel der Zellen dem Arzt auf normalem Niveau, kann er sicher sein, alle Krebszellen vernichtet zu haben.

## 2. Die Geräte schrumpfen immer weiter

Nicht nur zunehmend komplexere Technologien werden die Medizin von morgen prägen, sondern auch: immer kleinere. Bereits recht weit entwickelt ist eine Minikamera, die in einer Plastikkapsel steckt, drei Zentimeter lang und gut einen Zentimeter dick, und vom Patienten verschluckt werden muss. Ärzte testen sie derzeit in einem französischen Forschungslabor.

Das Gerät soll bei Magenuntersuchungen den heute noch üblichen, unangenehmen Endoskop-Schlauch überflüssig machen, der gegen den Würge- und Brechreiz des Patienten durch die Speiseröhre in den Magen geschoben werden muss. Stattdessen verschluckt der Betreffende dann die Pillenkamera.

Im Magen angekommen, lässt sie sich ebenfalls mithilfe von Magnetfeldern an jeden beliebigen Ort steuern und auf das zu untersuchende Gewebe ausrichten. Der Arzt manövriert sie per Joystick und betrachtet am Monitor die drahtlos übertragenen Bilder aus dem Inneren des Verdauungsorgans.

Der Trend zur Verkleinerung lässt auch die medizinischen Labore schrumpfen.

Internisten oder Allgemeinmediziner etwa werden in ihren Arztpraxen kleine, kompakte Laboratorien verwenden, mit denen sie Blutproben des Patienten auf jene Stoffe untersuchen können, die eine Krankheit entlarven. Und das wird nur wenige Minuten dauern – nicht mehrere Tage wie heute.

Gegenwärtig müssen Laboranten die Inhaltsstoffe einer Probe häufig noch mit einer Zentrifuge in schwere und leichte Anteile aufspalten, anschließend erhitzen und mit Enzymen vermischen, um bestimmte biochemische Reaktionen zu bewirken. Erst dann lassen sich die Stoffe untersuchen.

In den Minilaboren der Zukunft dagegen leistet ein Computerchip die Dia-

charakteristisch für eine Erkrankung sind. Der Arzt muss nur eine Kartusche mit der Blutprobe in das Gerät einlegen und das Programm starten. Eine halbe Stunde später liegt das Ergebnis vor.

Ein anderes System arbeitet mit Mikrochips, die jenen in Digitalkameras ähneln. Auf dem Chip liegt ein Papier, das mit speziellen Molekülen getränkt ist. Diese „Fänger- moleküle“ reagieren auf bestimmte Stoffe in der Probe – etwa auf Eiweiße, die bei erhöhter Konzentration auf einen Herz-

infarkt hindeuten. Fänger- moleküle und gesuchte Stoffe passen dabei zusammen wie der Schlüssel zum Schloss. Das bedeutet: Ausschließlich eine bestimmte Sorte von Eiweißmolekülen bindet sich an einen bestimmten Typ von Fänger- molekül.

Kommt eine solche Verbindung zustande, geben die Fänger- moleküle Elektronen – also elektrischen Strom – an den Chip ab. Je mehr des Proteins im Blut vorhanden ist, desto mehr Bindungen ergeben sich und desto stärker ist der Elektronenfluss. So kann das Gerät innerhalb weniger Sekunden den Gehalt des gesuchten Eiweißes ermitteln.

Die Einsatzmöglichkeiten derartiger Minilabore sind äußerst vielfältig. Ärzte könnten noch in der Sprechstunde testen, ob ihre Patienten ein empfohlenes Medikament auch vertragen. Blut ließe sich innerhalb von Minuten auf eine Vielzahl von Stoffen untersuchen. Sogar krebserzeugende und andere Viren wären auf diese Weise in den Gewebeproben zu entdecken.

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Biomedizinische Technik im Saarland entwickeln zurzeit einen Chip, der in manchen Ländern großes Unheil verhindern könnte. Denn mit seiner Hilfe lässt sich Blut einfach und schnell auf die Erreger mehrerer unterschiedlicher Infektionskrankheiten untersuchen –

**Ein Herz-  
Sensor sendet bis  
zu 200 Messwerte  
pro Sekunde an  
ein handliches Gerät**

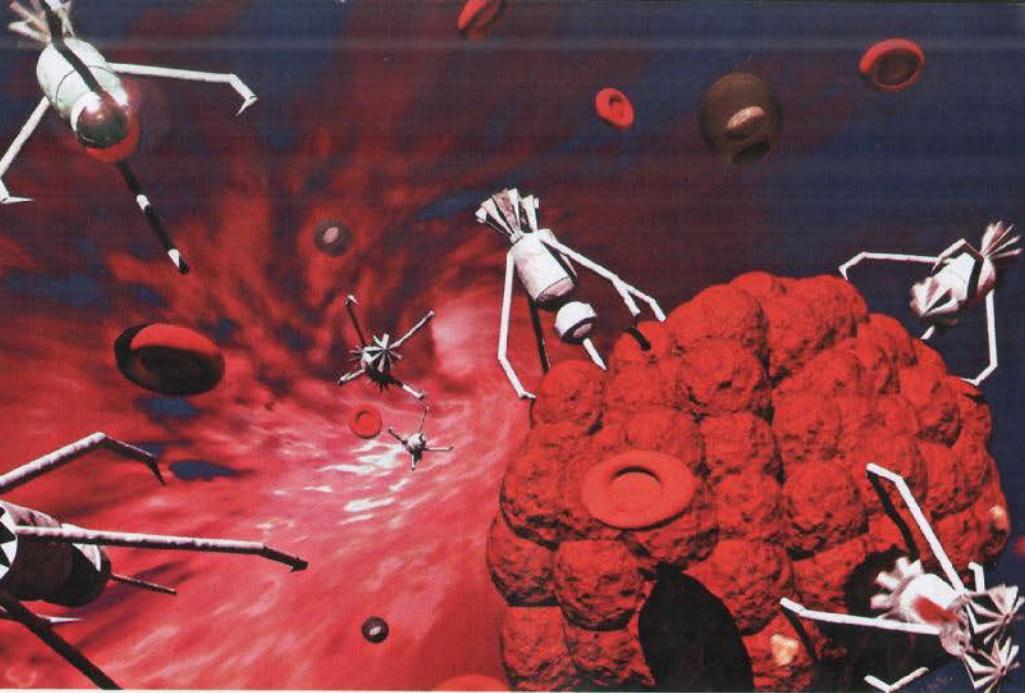
gnosearbeit, und zwar umgehend. Zu diesem Zweck trägt er feinste Sensoren, an die sich Bakterien, Viren, Antikörper oder Gifte binden – also jene Stoffe, die

etwa Aids- und Hepatitis-Viren. Der Chip wird Teil eines fahrbaren Labors sein, mit dem ägyptische Ärzte in den Dörfern am Nilufer Blutspenden einsammeln und testen wollen. Der Virencheck soll verhindern, dass bei einer Bluttransfusion auch tödliche Krankheiten übertragen werden.

Selbst Tumore werden sich mit den neuartigen Kleinstlaboratorien identifizieren lassen. So haben Wissenschaftler der britischen Universität Newcastle einen vier Quadrat-millimeter kleinen Chip konstruiert, der bestimmte Krebsarten diagnostizieren soll. Auch er funktioniert mithilfe von Fänger-molekülen, die auf einer von elektrischen Kontakten umgebenen Membran sitzen.

In diesem Fall fischen die Fänger-moleküle einzelne Eiweiße oder bestimmte Abschnitte der Erbsubstanz aus der Probe des Patienten heraus. Es sind Stoffe, die für ganz bestimmte Krebsarten charakteristisch sind, weil die Tumorzellen sie abgeben. Ducken solche Stoffe an den Fänger-molekülen an, nimmt deren Masse zu, und damit ändert sich die Schwingungsfrequenz der Membran.

Das wiederum kann der Chip registrieren, und eine Software vermag aus



Gezielt könnten Ärzte eines Tages mit winzigen Nanorobotern wuchernde Krebszellen im Körper bekämpfen. Noch vermögen sich Forscher dieses Szenario nur in Computersimulationen auszumalen, doch die ersten funktionstüchtigen Nanomotoren von der Größe einiger Moleküle gibt es bereits

den Daten zu ermitteln, welche Stoffe sich angelagert haben und auf welchen Tumor sie hinweisen. Schon in kürzester Zeit werden die Ergebnisse vorliegen und die Betroffenen Gewissheit haben – im Guten wie im Schlechten. Heute müssen die Patienten noch tagelang, manchmal gar über Wochen warten und bangen.

Die Verkleinerung der Geräte und die enorme Geschwindigkeit, mit der sie ihre Diagnosen abgeben, wird die Medizin stark verändern. In gut 20 Jahren werden in den Hausarztpraxen neben kleinen Ultraschall- und EKG-Geräten auch solche Minilabore stehen.

Der Arzt kann die Krankheitsursache eines Patienten damit sofort ermitteln und ihn gleich behandeln. Der Erkrankte muss weder von einem Arzt zum nächsten geschickt noch auf spätere Termine vertröstet werden. „Krankheitserkennung am Behandlungsort“ („Point of care“-Diagnostik) nennen die Mediziner diesen neuen Ansatz.

Doch der Trend zur Miniaturisierung wird nicht nur die Diagnostik erleichtern, sondern auch die Behandlung und Überwachung bereits erkannter Krankheiten sowie die Vorsorge und Vermeidung von Leiden.

Mit feinsten Mikronadeln bestückte Pflaster könnten etwa bei Grippeschutz-

impfungen die Spritze ersetzen und ihren Wirkstoff völlig schmerzlos über die Haut an den Körper abgeben.

Und ein Team der Tokyoter Universität erprobt gerade eine Methode, die den schätzungsweise mehr als 200 Millionen Diabetikern auf der Welt künftig

**Maschinen, so  
klein wie Moleküle,  
können künftig  
unseren Körper  
erforschen**

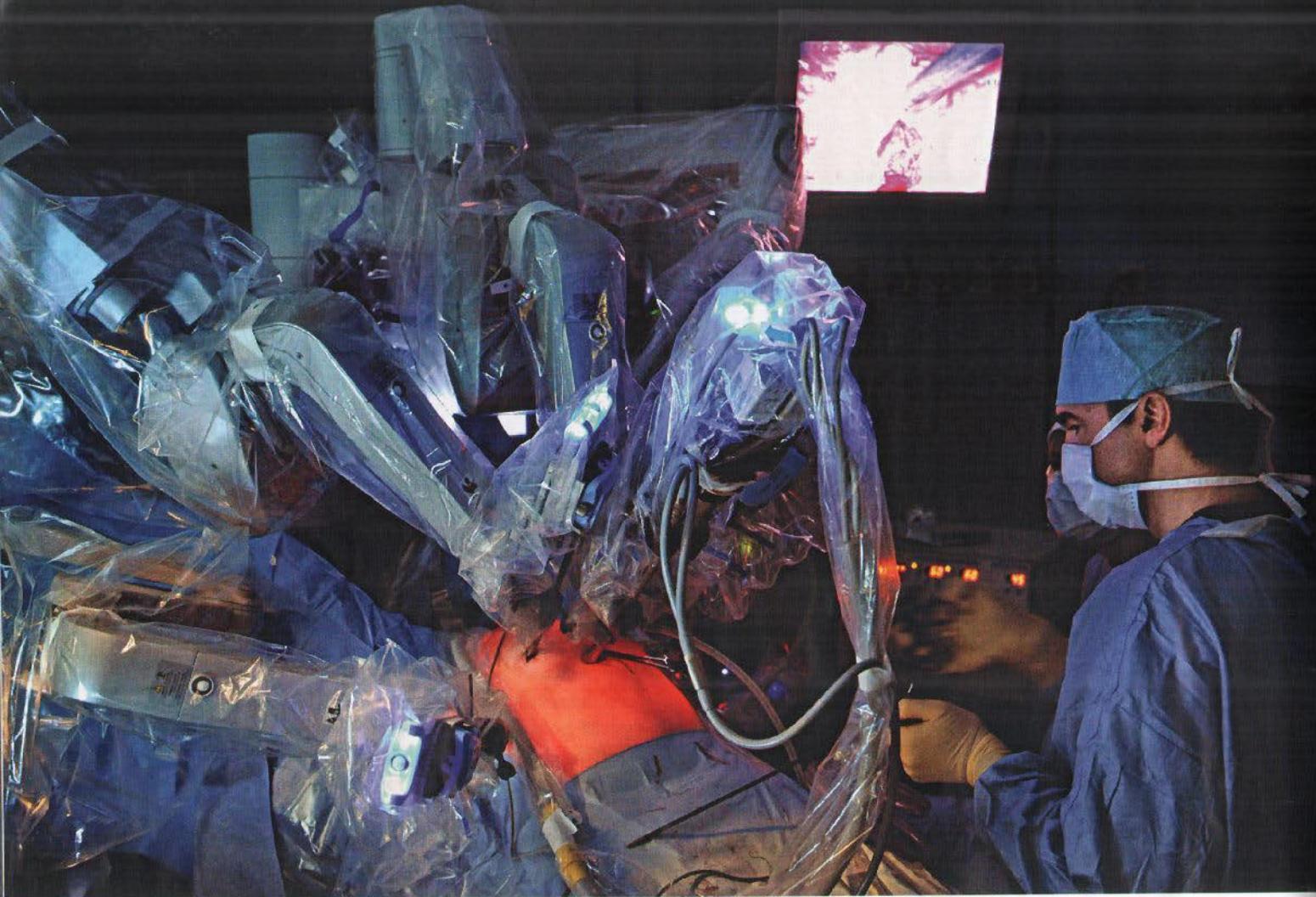
ersparen soll, sich mehrmals am Tag in den Finger zu stechen, um den Zuckergehalt im Blut zu kontrollieren.

Die Forscher haben ein winziges Kugelchen entwickelt, das bei Kontakt mit Zuckermolekülen durch einen fluoreszierenden Farbstoff zu leuchten beginnt. Das Mikrolämpchen könnte an das Handgelenk implantiert werden und dem Diabetiker signalisieren, wann er Insulin benötigt.

Wissenschaftler der Universität Boston gehen noch einen Schritt weiter:



Minikameras in Pillenform sollen Patienten die unangenehme Magenuntersuchung mit heute üblichen Endoskopen ersparen



Mit Pedalen und Handgriffen steuert der Operateur die Arme des »DaVinci«-Roboters, die Skalpelle, Scheren oder Tupfer halten. Auf einem 3-D-Monitor kann er dabei jede Bewegung der Instrumente im Körperinneren verfolgen. Mit äußerster Präzision unterstützt dieser Hightech-Apparat den Chirurgen bei der Arbeit - und hilft, menschliche Fehler zu vermeiden

Sie konstruierten das Labormodell einer künstlichen Bauchspeicheldrüse. Das Implantat soll den Blutzuckerspiegel von Diabetikern nicht nur automatisch kontrollieren, sondern ihn auch regulieren können: Bei Bedarf pumpt es entweder das Hormon Insulin (das bei Überzuckerung für die Speicherung des Zuckers in den Organen sorgt) oder dessen Gegenspieler Glucagon (das Zuckermangel ausgleicht) in den Blutkreislauf.

Hoffnung bringt die Miniaturisierung auch bei Herzkrankheiten. So könnten sich Patienten in einigen Jahren zum Beispiel einen zwei mal zehn Millimeter messenden Drucksensor direkt an der Herzwand implantieren lassen. Er sendet pro Sekunde bis zu 200 Messwerte über den Herzkammerdruck an ein handliches Empfangsgerät:

Daten über den Gesundheitszustand der zentralen Kreislaufpumpe.

Noch weiter geht eine bereits marktreife Entwicklung, die nicht nur Diagnosen liefert, sondern auch therapeutisch eingreift: ein Herzschrittmacher, der zugleich ein Defibrillator ist.

Das Gerät registriert, wenn es trotz des Schrittmachers zu Herzflimmern kommt, und aktiviert den Defibrillator, der das Organ dann mit elektrischen Impulsen wieder in Takt bringt.

### 3. Nanotechnologie: Die Macht der Moleküle

Die maximale denkbare Verkleinerung von medizinischen Geräten aber wäre, wenn sie nur noch die Größe eines oder weniger Moleküle hätten. Schon 1959 hat sich der Physiker Richard Feynman ausgemalt, welches technolo-

gische Potenzial die Herstellung von Maschinen aus einzelnen Molekülen, die Nanotechnologie, in sich birgt: „Obwohl es zunächst nach einer ziemlich verrückten Idee klingt, wäre es für die Chirurgie interessant, wenn man den Operateur sozusagen verschlucken könnte. Man setzt den mechanischen Chirurgen ins Blutgefäß, er geht ins Herz hinein und „sieht“ sich dort um. Er stellt fest, welche Herzklappe die fehlerhafte ist, nimmt ein kleines Messer und schneidet sie heraus.“

Ein halbes Jahrhundert später ist die Medizin von dieser Vision zwar noch immer weit entfernt, doch beginnt sie die molekulare Technologie inzwischen tatsächlich zu nutzen.

Ein Team an der Universität München um die Nanowissenschaftler Christoph Bräuchle und Thomas Bein

etwa verwendet Röhren aus Silikat, die einen Durchmesser von rund drei Nanometern haben, drei Millionstel Millimeter. Zusammengefügt bilden sie ein poröses System, das sich hervorragend eignet, um beispielsweise kleinste Mengen hochwirksamer Medikamente aufzunehmen und sie gezielt in einzelne Krebszellen zu tragen.

Dazu müssen die Nanopartikel in den Blutkreislauf gespritzt werden und sich im Körper verteilen. Ihre Molekülstruktur wird so gewählt, dass sie ausschließlich an speziellen Strukturen auf der Oberfläche von Tumorzellen andocken – wiederum nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip.

Heften sich diese Nanofähren an eine Krebszelle an, lösen sie in dieser einen Mechanismus aus, der normalerweise der Aufnahme von Nährstoffen dient. Auf diese Weise gelangen die Partikel in das Innere der Zelle.

Dann, so die Idee der Wissenschaftler, soll ein Signal von außen – etwa das Licht einer bestimmten Wellenlänge oder eine Änderung der Temperatur – die Nanofähre veranlassen, ihr Gift freizusetzen und die Krebszelle zu töten. In Tierversuchen ist das bereits gelungen.

Die Nanopartikel wären also in der Lage, zwei Aufgaben in einem Arbeitsgang zu erledigen: Sie könnten Krebsherde im Körper aufspüren – und sie dann gezielt vernichten.

Schon jetzt ist für die Forscher deshalb klar, dass die Nanomedizin in den kommenden Jahrzehnten vor allem beim Kampf gegen den Krebs die Waffe der Wahl sein wird.

Doch denken die Forscher noch weiter: Nanofähren sollen dereinst in den Zellen sogar defekte Gene ersetzen. Oder sie werden Steuerungselemente im Erbgut verankern, die dafür sorgen, dass bestimmte Gene ab- oder gar nicht erst angeschaltet werden. Zum Beispiel solche DNS-Abschnitte, die Erbkrankheiten auslösen würden, ließe man sie zum Zuge kommen.

Eine andere denkbare Anwendung der Nanomedizin: In Arztpraxen könnten „Nano-Tester“ verwendet werden, um den Gesundheitszustand eines Patienten zu überprüfen. Käme er etwa

zum jährlichen Check-up, würde er in ein solches Gerät atmen. Das wäre dann in der Lage, Biomarker im menschlichen Atem nachzuweisen – also Moleküle, die auf Asthma, auf ein Nierenleiden, auf Lungenkrebs und andere Krank-

## Pflaster mit feinsten Mikronadeln werden vermutlich schon bald die Spritze ersetzen

heiten deuten. Der Nano-Tester könnte sie identifizieren und die Krankheit diagnostizieren, noch ehe der Mensch irgendwelche Symptome bemerkt hat.

### 4. Die individuell zugeschnittene Medizin

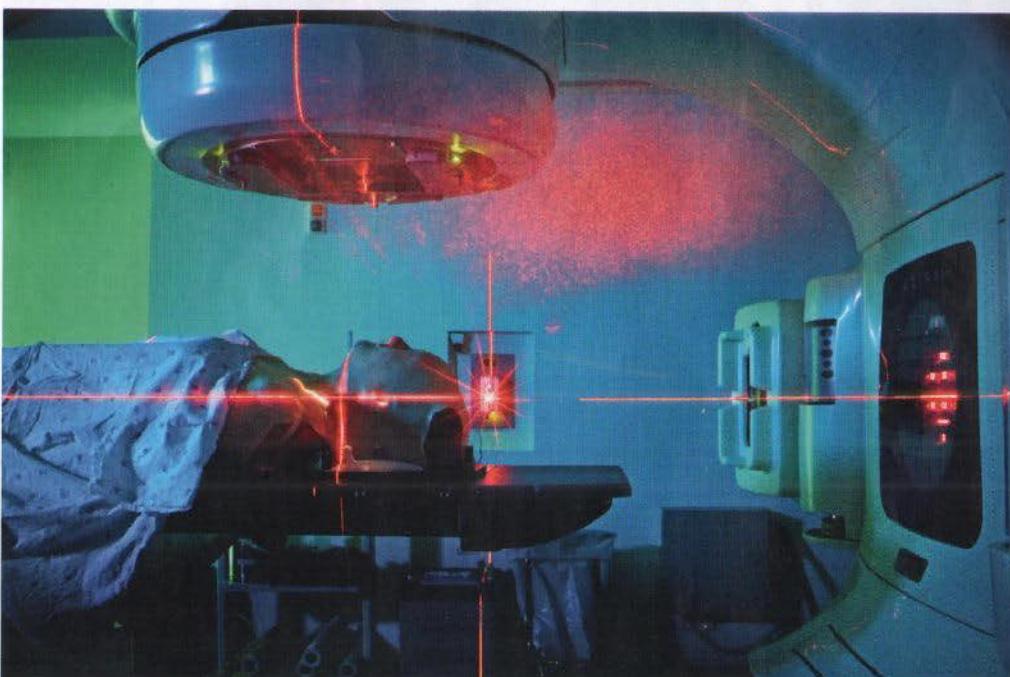
Neben der Verkleinerung sagen Experten einen anderen wichtigen Trend in der Medizin voraus: Sie wird immer

stärker auf den individuellen Menschen zugeschnitten. So sollen Medikamente zukünftig auf die jeweilige Person abgestimmt werden (siehe Seite 78), und auch in der biomedizinischen Technik will man Verfahren und Therapien an den einzelnen Patienten anpassen – Prothesen zum Beispiel.

Müssen etwa einzelne Gelenke oder ganze Gliedmaßen durch künstliche ersetzt werden, fertigen die Medizintechniker diese Ersatzteile schon bald individuell anhand des natürlichen Vorbildes. Dazu wird der Körperteil vor der Operation gescannt und vermessen. Die Daten fügt die Software eines Computers zu einer digitalen Rekonstruktion zusammen.

Diese Rekonstruktion verwendet anschließend ein 3-D-Drucker, um eine exakte Kopie des ursprünglichen Knie-, des Hüftgelenkes oder des Unterschenkels herzustellen.

Bei diesem Verfahren wird ein feines Spezialpulver in einen Behälter geleitet, das unter Laserlicht aushärtet. Der Computer steuert nun den Laserstrahl anhand von Daten der Rekonstruktion so, dass Schicht für Schicht aus dem



Im Kampf gegen den Krebs müssen Ärzte nach wie vor die Radiotherapie einsetzen, die auch gesunde Zellen angreift. Doch Forscher erproben bereits Strahlenarten, deren Energie nur im Tumor freigesetzt wird und die das umgebende Gewebe nicht schädigen

Pulver eine dreidimensionale Reproduktion des Originalknochens entsteht – eben ein 3-D-Druck.

Beiprothesen werden zudem deutlich vielseitiger sein als heute: Integrierte Technik wird registrieren, wenn ihr Träger beispielsweise eine Treppe hinaufsteigt, eine abschüssige Straße hinuntergeht oder sich ausruht – und den Krafteinsatz der Prothese flexibel den jeweiligen Aufgaben anpassen.

Dreidimensionale Kopien sollen aber nicht nur bei Prothesen helfen. Auch Nasen, Ohren oder Gesichtsknochen, die etwa bei einem Unfall oder durch Krankheit zerstört wurden, lassen sich mit dieser Technik rekonstruieren. Und Chirurgen können komplizierte Operationen – etwa am Schädel oder an der Wirbelsäule – erst am individuellen Duplikat durchspielen, ehe sie den Patienten in den Operationssaal holen lassen.

Noch auf einem weiteren Gebiet wird die Medizintechnik sehr viel stärker auf den Patienten zugeschnitten sein. Da die Menschen immer betagter werden und in hohem Alter weniger

Diagnosen übermitteln und ältere Patienten medizinisch überwachen.

Beispielsweise würden die Bewohner beim täglichen Gang auf die Waage nicht nur ihr Gewicht kontrollieren, sondern das Gerät könnte auch den Wasseranteil im Körper, die Fettwerte, den Puls sowie die Sauerstoffversorgung messen und die Ergebnisse an eine medizinische Datenbank weiterleiten. Dort

Auch die Therapien wollen Ärzte stärker individualisieren, das Erstellen einer Diagnose wird sich dank immer kleinerer, schnellerer Geräte beschleunigen, sodass die Therapie sofort beginnen kann – beides wird in der Zukunft verschmelzen.

Doch die Mediziner von morgen sollen Leiden eigentlich schon erkennen können, noch ehe sie überhaupt ausgebrochen sind. Sie werden nach kleinsten Veränderungen im Gewebe suchen, die sich zu Geschwüren entwickeln können. Sensoren werden Mutationen in einzelnen Zellen registrieren und molekulare Hinweise im Blut oder im Atem finden, die auf Krankheiten hindeuten.

Und selbst das menschliche Erbgut werden die Ärzte nach Abschnitten durchforsten, die auf drohende Erbkrankheiten wie Krebs, Multiple Sklerose oder Alzheimer hinweisen.

Die Vision der Mediziner lautet: Sie möchten den Patienten in der Zukunft nicht mehr nur reparieren – sondern verhindern, dass er überhaupt erst krank wird.

Vielleicht können die Menschen dabei einen Teil der Arbeit sogar selbst übernehmen und Diagnosen bereits zu Hause vornehmen.

Derzeit ist ein kanadisches Chemikerteam dabei, ein raffiniertes Diagnose-System für das eigene Heim zu entwickeln: Flüssigkeit des Patienten wird dafür auf eine speziell präparierte CD gegeben. Sie enthält Fänger-Moleküle, an die sich jene Stoffe binden, die auf eine bestimmte Krankheit hinweisen.

Schiebt der Proband nun die CD in seinen Heimcomputer, registriert der Abtastlaser, wo auf der CD Moleküle gebunden waren, und ein Programm kann anschließend ermitteln, welche Krankheit droht.

Nur eines wird auch in fernster Zukunft nicht anders sein als heute: Um die Krankheit am Ausbruch zu hindern oder um sie behandeln zu lassen, brauchen wir dann immer noch einen guten Arzt. □

#### Memo: DIE MEDIZIN DER ZUKUNFT

- **Computer**, Informationstechnologie sowie die Miniaturisierung durchdringen alle Bereiche der Medizin.
- In Kleinstlabore werden Ärzte binnen weniger Minuten komplexe Krankheiten diagnostizieren können.
- **Winzige Maschinen** könnten im Körper bald die Arbeit von Chirurgen übernehmen.
- **Implantierte**, künstliche Bauchspeicheldrüsen sollen den Blutzuckerspiegel von Diabetikern regulieren.
- **Prothesen**, Präparate und Therapien werden zunehmend auf den individuellen Patienten abgestimmt.

mobil sind, will man therapeutische oder diagnostische Verfahren immer mehr in das private Umfeld verlagern.

Forscher am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Erlangen beschäftigen sich daher schon seit Jahren mit individuell angepassten Funknetzwerken. Drahtlose Computerverbindungen in Wohnungen sollen zukünftig

## Sensoren im Haus- halt sollen in Zukunft wichtige Diagnose- daten direkt an die Ärzte senden

würde man sie automatisch bewerten und speichern.

Und sobald einzelne Werte auffällig wären – wenn etwa der Puls unregelmäßig wäre oder der Sauerstoffgehalt rapide abnahm –, würde die Datenbank eine Nachricht an die Praxis des Hausarztes senden oder die nächstgelegene Notfallambulanz alarmieren.

Dieses individuelle Netz ließe sich beliebig erweitern. Ältere Menschen etwa könnten ihre Wohnung mit intelligenten Bewegungssensoren bestücken lassen, die natürliches Verhalten von Unfällen unterscheiden können – und beispielsweise einen schweren Sturz oder einen Zusammenbruch auf dem Flur registrieren.

Für Personen mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen gäbe es Kleidungsstücke mit Überwachungssensoren, die kontinuierlich etwa die Herzaktivität als Elektrokardiogramm (EKG) registrieren und den Pulsschlag messen. Innerhalb der Wohnung könnten sie die Messwerte über das heimische Funkdaten-Netz schicken und beim Einkaufen zum Beispiel über das Mobiltelefon.

Vorsorge und Überwachung von Patienten werden sich also in der Zukunft immer weiter automatisieren, verbessern und personalisieren lassen.

Jürgen Bischoff, 56, schreibt für GEO und GEOkompakt regelmäßig über Technologiethemen.

# Spannende Wissenswelten mit bis zu 13% Ersparnis!



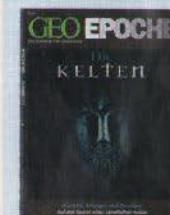
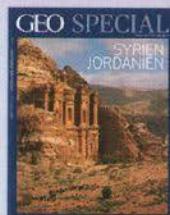
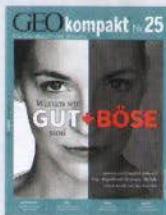
## BRESSER-Taschenfernglas

Mit einer 10-fachen Vergrößerung, Dachkant-Optik und gummierter Oberfläche. Ideal für alle, die immer und überall genau hinsehen. Maße: ca. 10,5 x 11,1 x 2,9 cm, Gewicht: 250 g.



- Ein Geschenk gratis!
- Lieferung frei Haus!
- Ein oder mehrere Magazine zur Wahl!

Ja, ich möchte mein/e GEO-Wunschmagazin/e zum Vorzugspreis:



1. Die großen Themen der Allgemeinbildung – visuell opulent, leicht verständlich.

2. Aufwendige Reportagen über den Zustand der Welt.

3. Faszinierende Erkundungen – je Heft ein Land, eine Region oder eine Stadt.

4. Die schönsten Reiseziele der Welt – einladend und informativ.

5. Auf den besonderen Spuren der Geschichte.

6. Rätsel, Bastelspaß und Spiele – für Kinder von 5 bis 7 Jahren.

7. Spielerisch-sympathisch lernen – für Kinder von 8 bis 14 Jahren.

**GEO kompakt**  
erscheint 4x jährlich zum Preis von zzt. € 7,75 statt € 8,50 im Einzelkauf mit 9% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 984  selbst lesen! 774 986  
 verschenken! 774 985  verschenken! 774 987

**GEO**  
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 5,65 statt € 6,30 im Einzelkauf mit 10% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 988  selbst lesen! 774 990  
 verschenken! 774 989  verschenken! 774 991

**GEO SPECIAL**  
erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 6,95 statt € 8,00 im Einzelkauf mit 13% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 988  selbst lesen! 774 990  
 verschenken! 774 989  verschenken! 774 991

**GEO SAISON**  
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 4,40 statt € 5,00 im Einzelkauf mit 12% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 990  selbst lesen! 774 992  
 verschenken! 774 991  verschenken! 774 993

**GEO EPOCHE**  
erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 8,00 statt € 9,00 im Einzelkauf mit 11% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 992  selbst lesen! 774 994  
 verschenken! 774 993  verschenken! 774 995

**GEO mini**  
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 2,60 statt € 2,90 im Einzelkauf mit 10% Ersparnis. Best.-Nr.

selbst lesen! 774 994  selbst lesen! 774 996  
 verschenken! 774 995  verschenken! 774 997

Senden Sie mir bzw. dem Beschenkten die oben ausgewählte(n) Zeitschriften aus der GEO-Familie ab der nächsterreichbaren Ausgabe. Mein Geschenk erhält ich nach Zahlungseingang. Nach 1 Jahr kann ich das Abonnement jederzeit beim GEO-Kunden-Service, 20080 Hamburg, kündigen. Im Voraus bezahlte Beträge erhalten ich dann zurück. Dieses Angebot gilt nur in Deutschland und nur, solange der Vorrat reicht. Auslandsangebote auf Anfrage.

Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen)

Name, Vorname

Geburtsdatum

19

Straße, Hausnummer

PLZ Wohnort

Telefonnummer E-Mail-Adresse

Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner + Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

Ich bezahle bequem per Bankenzug (jährliche Abbuchung)

Bankleitzahl Kontonummer

Geldinstitut

Ich zahle per Rechnung.

Ich verschenke ein oder mehrere Magazine aus der GEO-Familie an:

(bitte nur ausfüllen, wenn Sie ein oder mehrere Magazine aus der GEO-Familie verschenken möchten)

Geburtsdatum

19

Name, Vorname des Beschenkten

Straße, Hausnummer

PLZ Wohnort

Telefonnummer

E-Mail-Adresse

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden zwei Wochen ohne Begründung beim GEO-Kunden-Service, 20080 Hamburg, in Textform (z.B. E-Mail oder Brief) widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum

Unterschrift

Bestellen leicht gemacht:

Per Post:

GEO-Kunden-Service,  
20080 Hamburg

Per Telefon: (Bitte Bestell-Nr. angeben)

01805/861 80 00

14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.

Abonnenten-Service Österreich und Schweiz: +49 1805/861 00 00

Online mit noch mehr Angeboten:

[www.geo.de/familie](http://www.geo.de/familie)





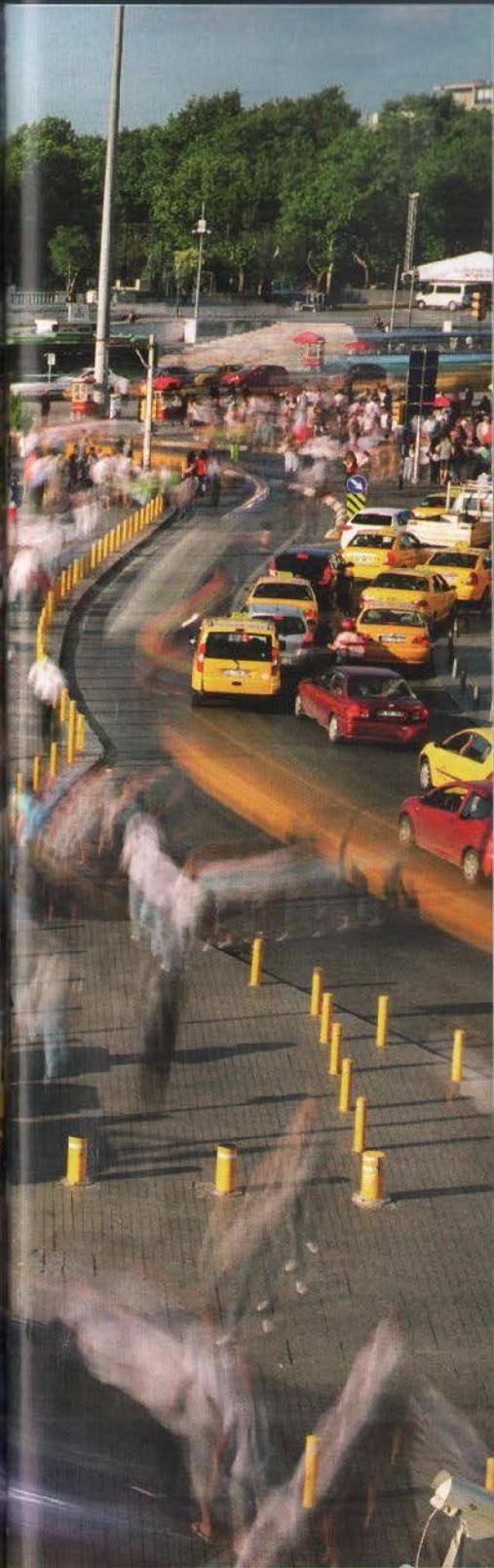
### Einige **THEMEN**

- ▶ **Hirnforschung:** Wie Zeit im Kopf konstruiert wird.
- ▶ **Amnesie:** Der Mann, der in der Gegenwart gefangen ist.
- ▶ **Kulturen:** Warum die Uhren bei manchen Völkern anders gehen.
- ▶ **Physik:** Wie Forscher das Mysterium Zeit untersuchen.
- ▶ **Kalender:** Wann der Mensch begann, die Zeit einzuteilen.

- ▶ **Gedächtnis:** Wie Neuronen unser Leben speichern.
- ▶ **Chronometer:** Die komplizierteste Armbanduhr der Welt.
- ▶ **Zukunft:** Waren Zeitreisen theoretisch möglich?
- ▶ **Uhren:** John Harrison und sein Wunderwerk.
- ▶ **Aus-Zeit:** Warum Müßiggang so wichtig ist.

# Das Rätsel Zeit

Ohne die Zeit würde es uns nicht geben, und doch vermag kein Wissenschaftler das Phänomen zu erklären. Physiker versuchen sie zu messen, Hirnforscher wollen herausfinden, wie sie im Kopf entsteht, Psychologen rätseln, warum sie immer knapper wird – aber noch immer ist sie ein Mysterium



**DAS LEBEN** der Menschen wird immer schneller, so empfinden es viele Großstädter, wie hier in Istanbul. Wir leisten mehr in derselben Zeit – um den Preis von Stress oder gar Burnout-Syndrom. Hat die Beschleunigung des Alltags bereits unser Gehirn verändert, wirkt sie sich auf Wahrnehmung und Psyche aus?



**ALLES LEBEN** verläuft – wie das Entfalten dieser Blüte – nach Rhythmen



**DIE ABSCHNITTE** dieses Eisbohrkerns enthalten ein Archiv der Erdgeschichte



**UM DIE ZEIT** zu messen, entwickeln Konstrukteure aufwendige Armbanduhren

**D**ie Zeit bestimmt das Leben der Menschen wie kaum eine andere Größe. Wir sind in ein festes Terminkorsett eingebunden, stehen nach der Uhr auf, arbeiten in festgelegten Zyklen und haben den Eindruck, die Taktung des Lebens erhöhe sich immer weiter. Schon früh in der Geschichte haben Menschen registriert, dass äußere Rhythmen – Tag und Nacht, Mondzyklen oder Jahresverläufe – ihr Leben beherrschen. Sie haben Kalender erfunden, um sich auf die Bedingungen einzustellen, und Uhren, um Tagesverläufe feiner zu unterteilen. Physiker haben zudem erkannt, dass die Zeit unterschiedlich schnell vergehen kann, dass sie etwa in der Nähe eines großen Himmelskörpers langsamer verstreicht.

Letztlich aber können sie das Phänomen Zeit nicht erklären, manche Forcher halten es gar für eine Illusion des menschlichen Geistes.

Dennoch geht der Einfluss, den die Zeit auf uns hat, noch viel tiefer: Ohne sie nämlich gäbe es uns und die Welt gar nicht. Nichts könnte sich entwickeln, nichts sich verändern. Kein Lebewesen wäre entstanden, und die Evolution hätte kein Gehirn hervorgebracht. Eine Welt ohne Zeit wäre wie ein eingefrorenes dreidimensionales Bild. Kein Relektieren wäre möglich, denn auch die geistige Tätigkeit ist nichts anderes als die Aneinanderreihung von Bewusstseinsinhalten, eine Verknüpfung von Erinnerungen und Ideen – also eine Abfolge von Prozessen, die Zeit benötigen.

In seiner nächsten Ausgabe begibt sich GEO kompakt auf eine Reise der besonderen Art: ins Zentrum der Zeit.

Rom erobert, Paris gegründet,  
London zerstört: die Kelten.

Nr. 47

**GEO EPOCHE**  
DAS MAGAZIN FÜR GESCHICHTE

DIE KELTEN

**Die  
KELTEN**



Fürsten, Krieger und Druiden  
Auf den Spuren einer rätselhaften Kultur

www.geo-epoch.de