

GEO kompakt

Nr. 2

Die Grundlagen des Wissens

GEO kompakt Das Wunder Mensch

Das Wunder Mensch

Expedition in den menschlichen Körper: wie er funktioniert, sich versorgt und schützt. Wie er sich entwickelt und fortpflanzt



Liebe Leserin, lieber Leser,

Ich möchte Sie einladen zu der wohl spektakulärsten mentalen Expedition, die sich ein Leser derzeit vornehmen kann: zu einer Reise in das Innere unseres Körpers. Denn selbst in den Weiten des Universums, so darf man nach heutigem Wissenstand annehmen, gibt es nirgendwo eine solche Staunen machende Vielfalt an Strukturen, Funktionen und komplexen Prozessen wie im menschlichen Mikrokosmos mit seinen Billionen von Zellen.

Sie werden auf den folgenden 160 Seiten auf bizarre Landschaften stoßen – etwa im Rückenmark, wo sich sternförmige Nervenzellen zu filigranen Kommunikationsnetzen verweben. Oder im Inneren der Zellen, in deren molekularen Fabriken vom Baustoff für alle Körperstrukturen über die genetische Substanz bis zu den hormonellen Boten alles hergestellt wird, was der Organismus zum Funktionieren braucht.

Sie werden erleben, mit welcher Raffinesse sich das Immunsystem ungebetener Besucher annimmt. Was alles dazugehört, bis wir einen Arm heben, eine Mahlzeit verdauen, einen tiefen Luftzug nehmen können. Wie fein abgestimmt die Entwicklung des menschlichen Lebens ist, die auf die Verschmelzung zweier winziger Zellen im Mutterleib folgt.



Das Team von GEOkompakt (stehend v. l.): Heidrun Günther, Dirk Krömer, Susanne Gilges, Doris Paulini, Ernst Artur Albaum, Christine Heidemann, Hannelore Koehl, Jürgen Bischoff, Jörn Auf dem Kampe, Torsten Laaker. Sitzend (v. l.): Henning Engeln, Martin Meister, Claus Peter Simon



Und sie werden – so zumindest ging es uns – ehrfürchtig sein angesichts der Komplexität all jener Prozesse, die in jedem Augenblick unserer Existenz unter anderem dafür sorgen, dass wir zu sehen und zu sprechen vermögen. Dass wir in der Lage sind, innerhalb von Millisekunden auf Schocksituationen zu reagieren. Dass wir darüber nachdenken können, wer wir sind und was wir tun und warum es uns gibt.

Wie schon in der Erstausgabe von GEOkompakt („Die Geburt der Erde“) haben wir uns bemüht, diese nicht immer leicht nachzuvollziehenden Abläufe so gut es geht zu vereinfachen – denn meist ist alles noch viel komplizierter, als von uns geschildert –, und sie so anschaulich wie möglich zu erklären. Unterstützt wurde unser redaktionelles Team von Wissenschaftlern, die jeden Beitrag kritisch prüften.

Wir haben versucht, die Vorgänge im Inneren unseres Körpers in sechs Kapiteln systematisch zu erfassen. Ein Glossar sowie das Register sollen Ihnen helfen, zu verfolgen, wie die einzelnen Beiträge miteinander vernetzt sind. Ausgelassen haben wir die Komplexe „Krankheit“ (Ausnahme: der Beitrag über das Immunsystem) sowie „Seele und Bewusstsein“ (Ausnahme: der Essay auf Seite 20).

Diese Themen auch noch aufzubereiten, hätte den Rahmen des vorliegenden Heftes gesprengt – und uns zudem die Gelegenheit genommen, Ihnen irgendwann auch dazu jeweils eine Ausgabe von GEOkompakt zu präsentieren.

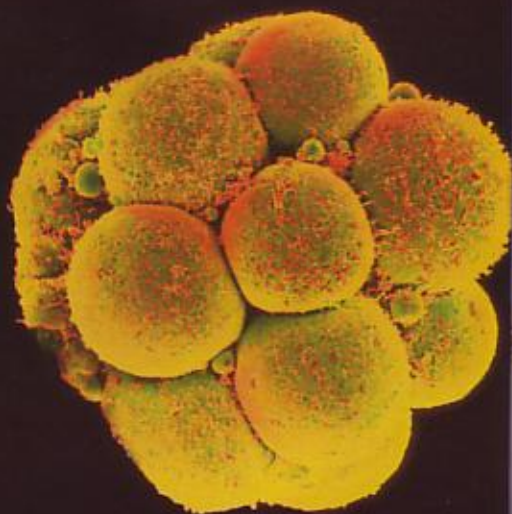
Herzlich Ihr

Michael Schaper
Michael Schaper



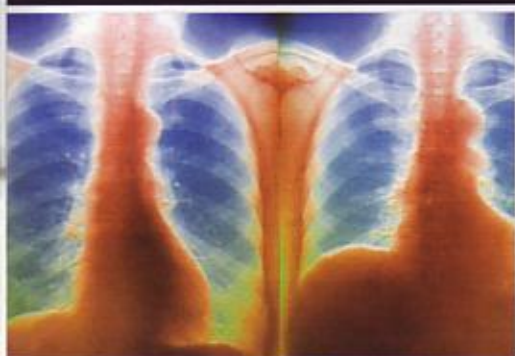
Der durchschaute Körper

Spektakuläre Foto-Kompositionen offenbaren die Welt des Inneren – etwa unser Lymphsystem. **Seite 6**



Wie Leben entsteht

Damit aus einer befruchteten Eizelle ein Mensch werden kann, müssen sich die Zellen fortlaufend teilen und zu 200 verschiedenen Varianten entwickeln. **Seite 22**



Lebenselixier Sauerstoff

20 000-mal am Tag zieht das Zwerchfell (rot) Luft in die Lunge. **Seite 80**



Das duale System

Skelett und Muskeln geben dem Körper Halt – und setzen ihn in Bewegung. **Seite 42 und 52**



Im Netz der Signale

Milliarden Impulse jagen durch Nervenzellen und versorgen den Körper mit Informationen. **Seite 98**

Bildessay Das Wunder Mensch

Textessay Billionen Zellen und ein Bewusstsein

Entwicklung >>>

Ein neues Leben Wie aus einer einzigen Zelle Gewebe, Organe und ein komplettes Wesen entstehen

Gene Die rätselhaften Moleküle, die alles steuern, was das Leben ausmacht

Zelle Die winzige Fabrik, die molekulare Bausteine für den Körper produziert

Bewegung >>>

Skelett Das System, das den Organismus trägt

Andreas Vesal Vater der wissenschaftlichen Anatomie

Muskeln Wie Mikromotoren den Körper in Bewegung setzen

Martensteins Welt (1) Die »Buddenbrooks« und der Geburtskanal

6 Versorgung >>>

20 Verdauung Zähne, Magen und Darm zerlegen Nahrung in Energie und Baustoff für den Körper **60**

William Beaumont Das Loch im Bauch **68**

22 Blut Transportmittel für Sauerstoff, Nährstoffe, Salze, Abfälle und Abwehrzellen **70**

28 Herz und Kreislauf Eine Pumpe und ein Gefäßsystem, die Blut in jeden Winkel des Organismus transportieren **74**

34 Lunge und Atmung Wie der Sauerstoff gegen Kohlendioxid ausgetauscht wird – und umgekehrt **80**

Martensteins Welt (2) Evolution und Faktor Wahnsinn **84**

42 Steuerung >>>

50 Sinnesorgane Augen, Ohren, Nase, Geschmack und Tastempfinden machen die Welt erfahrbar **86**

52 Nervensystem Kabelnetz zwischen Körper und Hirn **98**

Phineas Gage Wo liegt der Charakter? **104**

58 Gehirn Die geheimnisvolle Steuerzentrale **106**

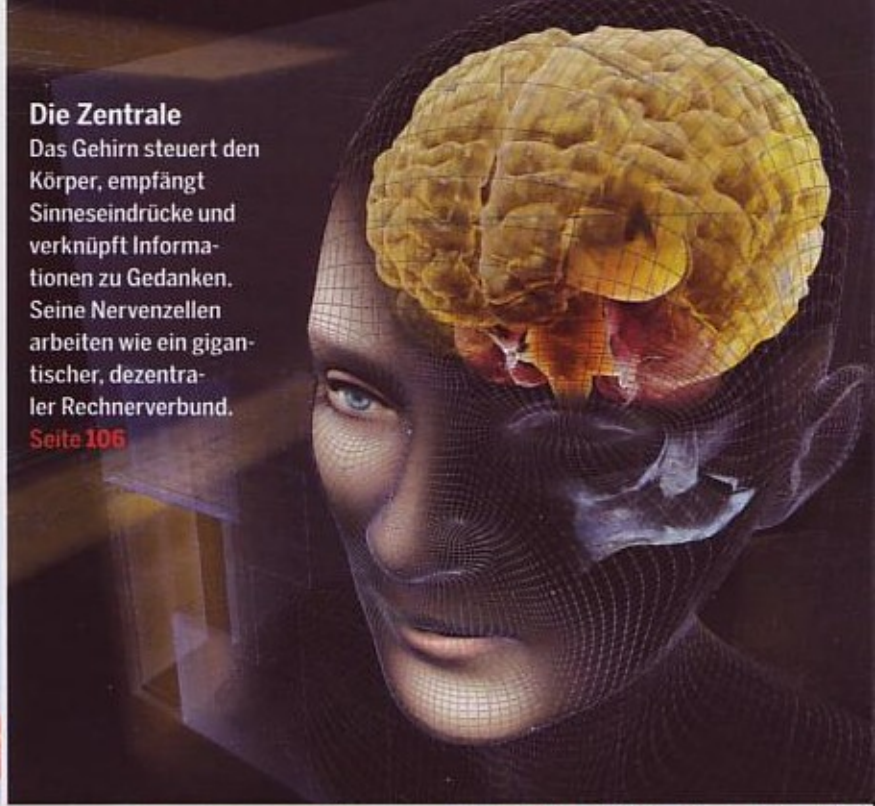


Alphabet des Lebens

Die rund sechs Milliarden Buchstaben der Erbsubstanz (DNS) in jeder Zelle legen die körperlichen und zum Teil auch charakterlichen Merkmale eines Menschen fest. **Seite 28**

Die Zentrale

Das Gehirn steuert den Körper, empfängt Sinneseindrücke und verknüpft Informationen zu Gedanken. Seine Nervenzellen arbeiten wie ein gigantischer, dezentraler Rechnerverbund. **Seite 106**



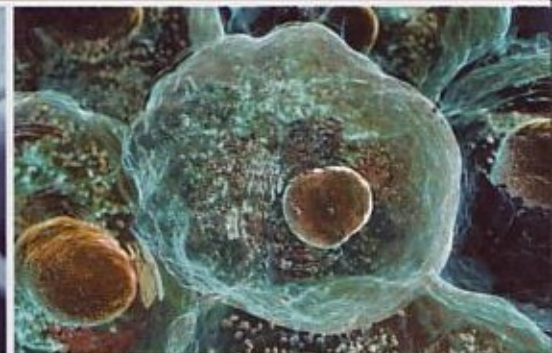
Das große Fressen

Abwehrzellen (blau) verschlingen Erreger und tote Zellen. **Seite 132**



Die Chemie der Triebe

Biologisches Kalkül: Duftstoffe und Gehirnchemie entscheiden mit, ob Frau und Mann sich finden. **Seite 144**



Der Grundbaustein

Unser Körper ist aus Billionen von Zellen aufgebaut – jede eine Minifabrik. **Seite 34**

Hirnforschung Interview mit Prof. Dr. Wolf Singer
Hormone Die Macht der Botenstoffe

114
118

_Schutz >>>

Haut, Haare, Nägel Mehr als nur eine äußere Hülle
Immunsystem Kampf gegen die Krankheitserreger
Edward Jenner Der Erfinder der Schutzimpfung

124
132
142

_Fortpflanzung >>>

Sex Wie Duftstoffe und angeborene Verhaltensweisen unsere Partnerwahl beeinflussen
Martensteins Welt (3) Der Lurch und die Stradivari
Glossar/Register Fachbegriffe – kurz erklärt
Zukunft Evolution 2.0

144
152
154
160

Impressum

57

Bildnachweis/Copyright-Vermerke

97

Vorschau

162

ÜBER DIESES HEFT:

Die wichtigsten Fachbegriffe werden im Glossar ab Seite 154 kurz erklärt. Wo diese Begriffe in den Haupttexten der Beiträge und in den Kästen erstmals erwähnt werden (oder wo sie zum Verständnis einer Textpassage besonders wichtig sind), sind sie **blau** hervorgehoben. Zu dem Glossar gehört ein Register, das wiedergibt, auf welchen Seiten die Begriffe vorkommen. Vom Register ausgenommen sind der Bildessay, die zwei Textessays, das Interview sowie die drei Kolumnen.

GEO kompakt online

Erleben Sie die Expedition in den menschlichen Körper im Internet: mit weiteren Illustrationen und Wissenstexten sowie Buchtipps zu den einzelnen Themen. Unter: **www.GEOkompakt.de**



Das Wunder Mensch

Foto-Illustrationen: Alexander Tsiaras

Ein Wesen der Art *Homo sapiens* besteht aus bis zu 100 Billionen Zellen – etwa 1000-mal mehr, als die Milchstraße Sterne hat. Dass diese unvorstellbare Zahl winziger biochemischer Fabriken einen einheitlichen, funktionierenden und in Sekundenbruchteilen reagierenden Körper formen kann, erscheint wie ein Wunder. So leisten bei einem schlichten Handstand mehrere hundert Muskeln Schwerstarbeit, das Gehirn koordiniert in feinsten Abstimmung Muskeln und Sensoren, die Lungen saugen mehr Atemluft, das Herz pumpt rascher Blut, damit Muskeln viel Brenn- und Sauerstoff erhalten. Und unablässig registrieren die Sinne Informationen aus der Außenwelt. Der Körper des Menschen: ein extrem komplexes System, das sich selbst steuert, versorgt und heilt – und das gereift ist in mehr als 500 Millionen Jahren Evolutionsgeschichte



entwicklung

Ein Programm, das Leben schafft

Haben sich Ei- und Samenzelle vereinigt, wird ein Regelwerk in Gang gesetzt, das innerhalb weniger Monate einen neuen Menschen wachsen lässt. Nach etwa 30 Stunden teilt sich die befruchtete Eizelle, und dann verdoppeln die Zellen sich etwa alle 20 Stunden. Nach fünf bis sechs Tagen nistet der Embryo sich in der Gebärmutter ein, wo ihn etwas später das mütterliche Blut versorgt. Alle Zellen des werdenden Menschen enthalten das gleiche Erbmaterial. Jedoch werden davon stets nur bestimmte Gene »angeschaltet«. Deshalb stellen unterschiedliche Zellen unterschiedliche Eiweiße her – die wiederum unterschiedliche Formen ausbilden und unterschiedliche Funktionen ermöglichen. Diese Vielfalt bringt Gewebe hervor, aus dem jeweils bestimmte Organe entstehen: So bilden sich nach 20 Tagen Anlagen für Leber, Herz, Lunge, Magen und erste Ausprägungen eines Gehirns. Kurz danach sind auch schon Arm- und Beinknospen erkennbar und acht Wochen nach der Zeugung fast alle Organe in ihrer Grundstruktur vorhanden.



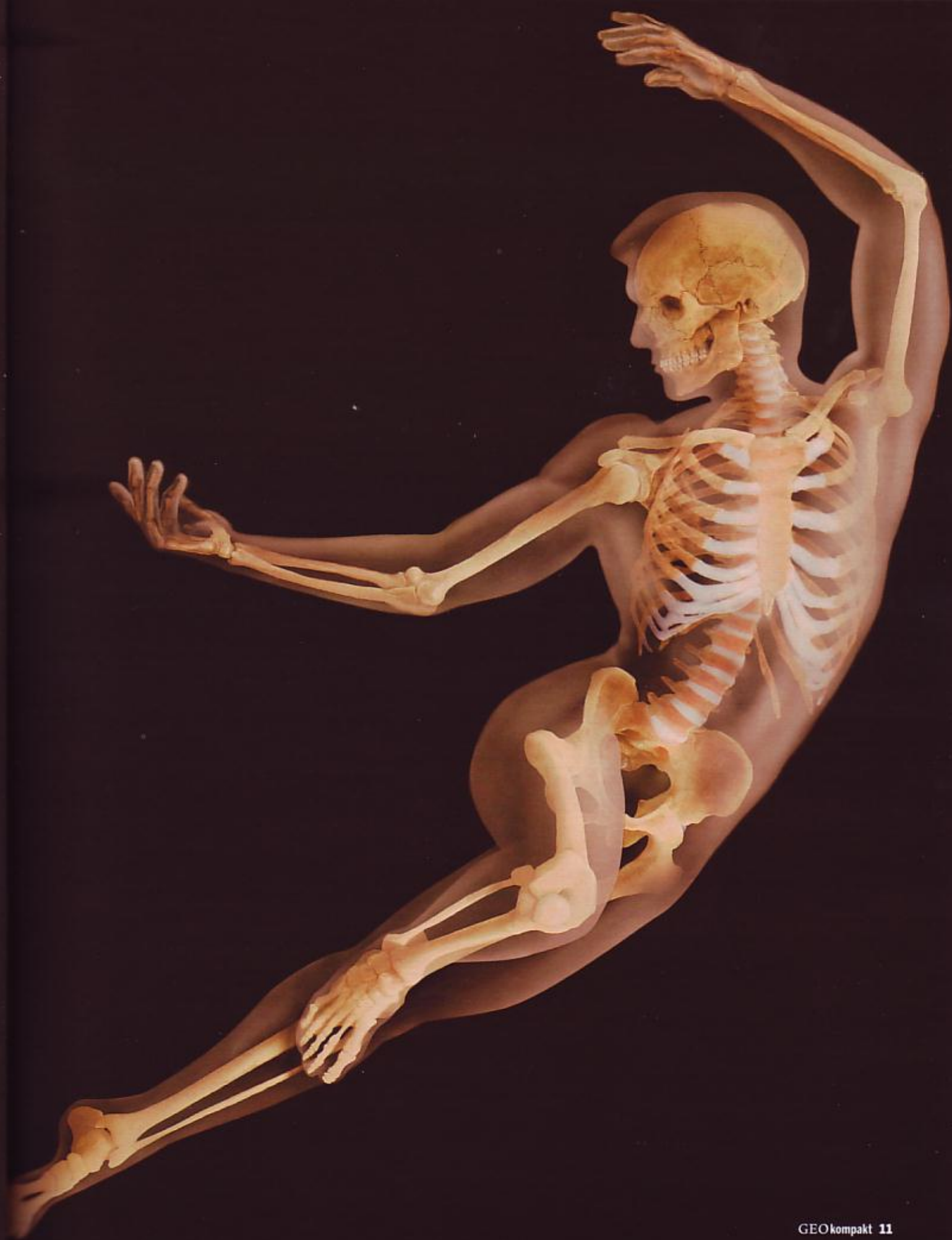


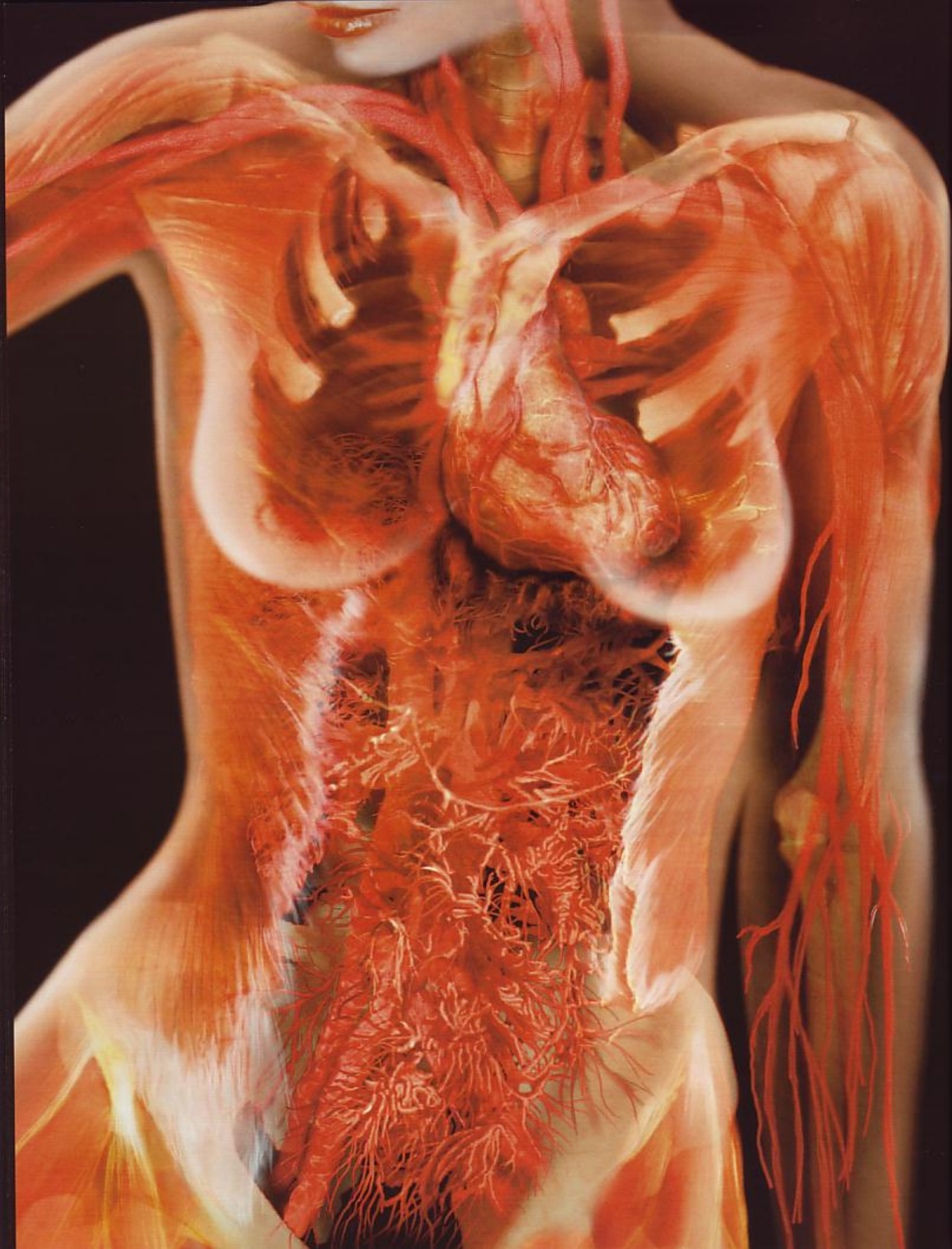


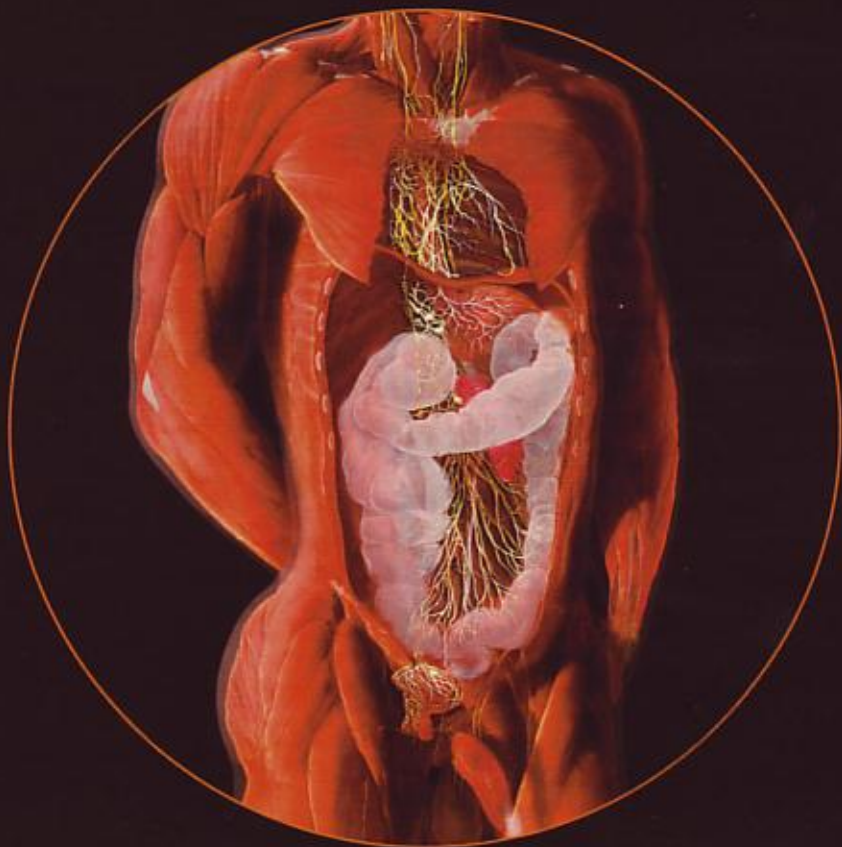
_bewegung

Flexibel dank Muskeln, Bändern und Gelenken

Knochen geben dem Körper Halt und Statur. Sie halten enorme Belastungen aus, schützen als Schädel das Gehirn und als Rippen Herz und Lunge. Sie speichern aber auch Minerale und bilden Blutzellen. Flexibel wird das Skelett, weil die Knochen durch Gelenke und Bänder verbunden sind. Und bewegt werden kann es mithilfe der Muskeln. Die sind jeweils aus Bündeln von Fasern aufgebaut – aus Zellen, in denen winzige molekulare Motoren arbeiten. Das menschliche Bewegungssystem ist enorm anpassungsfähig: Durch regelmäßiges Training legen Knochen und besonders die Muskeln an Substanz zu, bei mangelnder Belastung dagegen – etwa bei Astronauten in der Schwerelosigkeit – bauen sie sich ab







_versorgung

Ein System, das sich selbst erhält

Fast alles, was er braucht, produziert der Menschenkörper aus Rohstoffen selbst: Aus der Nahrung gewinnt er sowohl Brenn- als auch Baumaterial. Was durch Mund, Speiseröhre und Magen den Darm erreicht, wird dort in Moleküle zerlegt, von den Darmzellen aufgenommen und gelangt dann ins Blut. Der mächtige, vom Herzen angetriebene Strom des Blutkreislaufs (links) verteilt diese Nährstoffe im ganzen Organismus. Aus einem Teil dieser Substanzen – vor allem aus Eiweißbausteinen – stellen die Zellen Körpermateriale her. Aus anderen, vor allem aus Zuckern und Fetten, gewinnen sie mithilfe des eingeatmeten Sauerstoffs Energie. Was der Körper nicht oder nicht mehr braucht, scheidet er über Darm, Haut und Nieren aus. Auch mit Giftstoffen wird er meistens fertig – dank der Leber, seiner speziellen Chemiefabrik. Und wenn er nicht allzu sehr beschädigt ist, wenn ein Knochen bricht oder die Haut verletzt wird, repariert er sich sogar selbst.

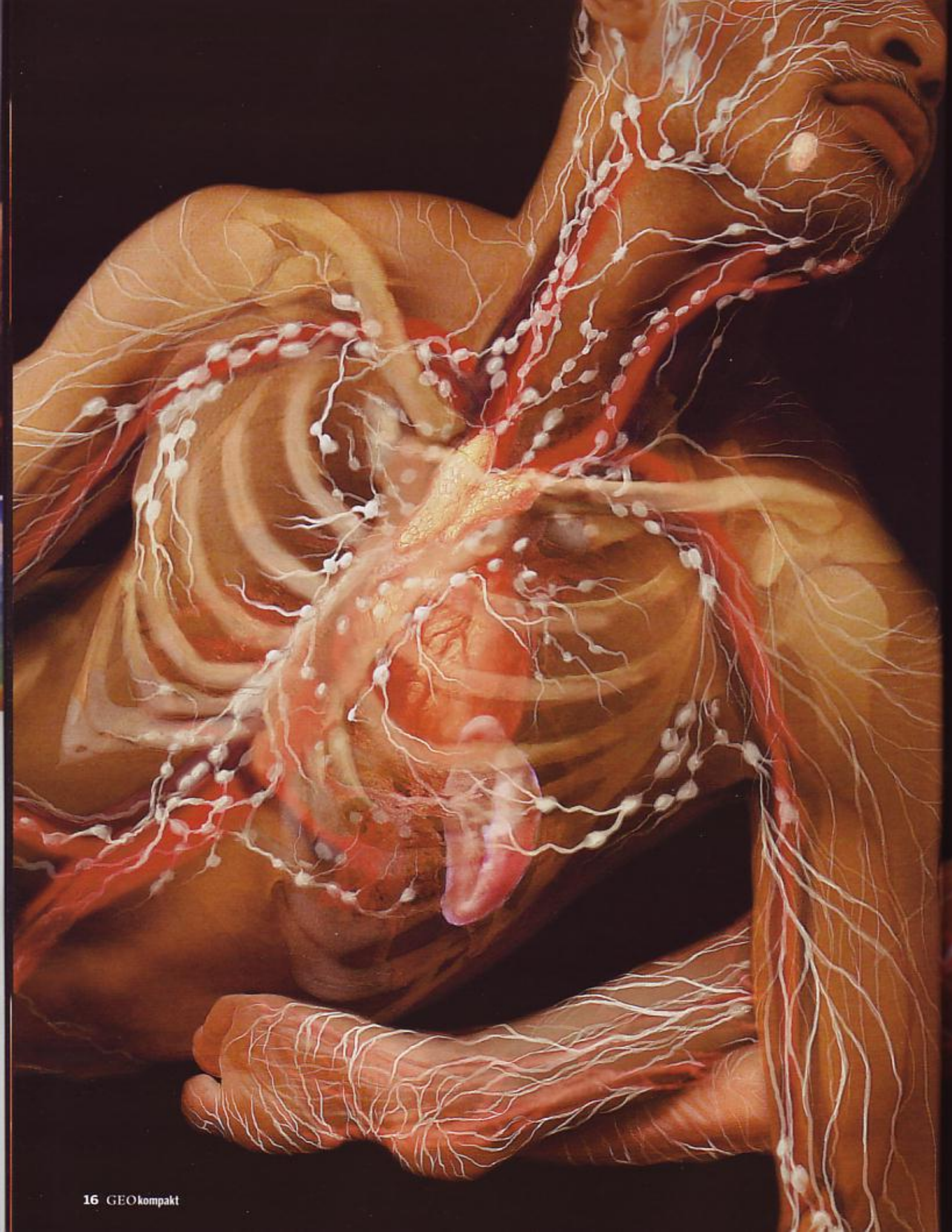
steuerung

Das komplexeste aller Datennetze

Die Nervenfasern des Menschen sind 780 000 Kilometer lang. Mehr als 100 Milliarden Nervenzellen sind über insgesamt eine Billion Kontaktstellen – die Synapsen – miteinander verbunden. Daraus ergeben sich weit mehr Kombinationsmöglichkeiten, als das Weltall Atome besitzt. Über das Nervensystem – rechts die Verteilung der Faserstränge – und mithilfe chemischer Botenstoffe, der Hormone, kommuniziert das Gehirn mit dem Körper, empfängt Informationen von den Sinnesorganen, steuert Muskeln und innere Organe und reguliert Vorgänge in Geweben. Das Gehirn koordiniert all diese Prozesse, lernt Sprachen und speichert Erfahrungen, verhilft dem Menschen zu Kreativität und entwirft ihm ein Bild von der Welt. Es lässt ihn planen und vermittelt ihm – als einzigem Lebewesen auf der Erde – das Bewusstsein seiner Sterblichkeit.







_schutz

■ Abwehr mit großem Waffenarsenal

Wehe, wenn fremde Lebewesen in unseren Körper gelangen; wenn Krankheitserreger durch einen Riss in der schützenden Haut oder durch die Schleimhäute der Lunge oder des Magen-Darm-Traktes dringen. Dann wären wir ohne eine effiziente Abwehr verloren, denn Bakterien oder Viren würden sich in unserem inneren Kosmos ungehemmt vermehren, bis er zusammenbräche. Unser Immunsystem aber aktiviert Fresszellen, die sich auf die Eindringlinge stürzen, um sie zu verschlingen. Oder es verwandelt sie in biochemische Bomben, die das Heer der Erreger zerstören. Oder es schickt Lymphozyten mit raffinierten Molekülwerkzeugen in den Abwehrkampf. Diese Spezialisten unter den Zellen patrouillieren im Bindegewebe und vor allem in den Bahnen und Knoten des Lymphsystems (hier weißlich wiedergegeben), einem »Entwässerungssystem« des Körpers, aus dem sie vor allem Erreger herausfischen



_fortpflanzung

■ Liebe hilft den Tod überleben

Wenn sich zwei Menschen sexuell vereinen, dann zielt das, rein biologisch gesehen, auf nichts anderes als das Zusammenfinden zweier Keimzellen, aus denen ein neuer Mensch entstehen soll. Gelingt das, werden zwei der vielen Billionen Zellen, die mit dem Tod der Körper untergehen, gleichsam unsterblich. Doch bevor es zu einem Geschlechtsakt kommt, müssen die Partner sich erst finden. Was Frauen und Männer füreinander attraktiv macht, was beim Flirt geschieht oder welche Rolle die Biochemie beim Verlieben spielt, können Forscher heute ziemlich gut beschreiben. Auch dass geschlechtsspezifische Interessenkonflikte die Partnerwahl mitbestimmen: Während Frauen die möglichst besten Gene – und einen verlässlichen Versorger – für ihre zu gebärenden Kinder zu suchen scheinen, herrscht bei Männern offenbar die Tendenz, ihre Gene bei möglichst vielen Partnerinnen unterzubringen.

Die in diesem Bildessay gezeigten Einblicke in den menschlichen Körper sind dem New Yorker Fotojournalisten **Alexander Tsiaras** gelungen – unter Einsatz mehrerer bildgebender Verfahren wie Röntgenaufnahmen, Computer- oder Kernspintomographie. Die Informationen hat er mit elektronenmikroskopischen und anderen Detailinformationen ergänzt und mithilfe gefilmter Sequenzen und eigens entwickelter Computerprogramme zu dreidimensionalen Illustrationen verarbeitet.



Billionen Zellen und ein Bewusstsein

Unser Körper ist ein komplexes System von Organen, jedes eine kleine Fabrik mit speziellen Aufgaben und Fähigkeiten, die auf raffinierte, vielfältig vernetzte Weise zusammenarbeiten und ein Gesamtkunstwerk hervorbringen: den Homo sapiens, den vernunftbegabten Menschen

Text: Henning Engel

Der neunjährigen Sandeep Kaur aus dem nord-indischen Ort Chak Khurd widerfuhr im Jahr 1994 ein schrecklicher Unfall. Das Mädchen geriet mit den Zöpfen in eine Mähmaschine, die seine Haare mitsamt der Kopfhaut und fast der gesamten Gesichtshaut vom Schädel riss. Der entsetzten Mutter gelang es, Haar und Haut aus der Maschine zu ziehen und ihre Tochter mit dem Moped in ein dreieinhalb Stunden entferntes Hospital zu bringen.

Dort machte sich der Mikrochirurg Abraham Thomas daran, die abgetrennte Gesichtshaut mit den verbliebenen Resten zu vernähen und die Blutgefäße anzuschließen. Es war die weltweit erste Gesichts-„Retransplantation“, und zehn Jahre später zeugen nur noch Narben am Kopf der jungen Frau und ein etwas steifes Lachen von dem schlimmen Ereignis.

Was dieser Fall belegt, ist neben dem hohen Niveau der heutigen Chirurgie vor allem eines: die ungeheure Regenerationsfähigkeit des menschlichen Körpers. Zwar bringen die Chirurgen verletzte Teile wieder in die richtige Position – doch dass die Gewebe zusammenwachsen und heilen, das leistet der Organismus selbst.

Der menschliche Körper ist ein Wunder an Lebenskraft, und er verfügt über erstaunliche Fähigkeiten der Reparatur, Regeneration und Abwehr von Gefahren. Allein seine Entstehung aus einer einzigen befruchteten Eizelle, die innerhalb weniger Monate zu einem perfekt organisierten und funktionierenden Gebilde von vielen Billionen Zellen in mehr als 200 unterschiedlichen Formen heranwächst, übersteigt alle bisherigen technischen Errungenschaften der Menschheit bei weitem.

Ein Auto zum Beispiel, das ähnliche Eigenschaften wie der menschliche Körper haben sollte, müsste wie folgt entstehen und funktionieren: Die künftigen Eigentümer hinterlegen in ihrer Garage einen klein gefalteten Bauplan, geben ein paar Säcke mit Metall- und Kunststoffteilen sowie einige Kanister mit Benzin hinzu. Dann warten sie in Ruhe ab, und nach ein paar Monaten ist wie von selbst ein Fahrzeug herangewachsen.

Die Nutzer können einsteigen und damit nach Belieben fahren, ohne sich um die Versorgung zu kümmern: Das Auto steuert die Tankstelle von selbst an, und es braucht nie zur Inspektion, denn es erneuert permanent alle Verschleißteile. Und wenn eine Beule hinein gefahren wird – kein Problem. Der Wagen braucht nur über Nacht in der Garage zu stehen, und am folgenden Morgen ist alles wie neu.

Was für ein Auto utopisch klingt, ist für unseren Körper Alltag. Die Energie und die Baustoffe, die er für seinen Betrieb benötigt, nimmt er in Form von Nahrung, Sauerstoff und Wasser zu sich. So versorgt, vermag der Organismus seine rund 200 Knochen mithilfe von etwa 400 Skelettmuskeln in Bewegung zu setzen. Er steuert dieses komplexe System mithilfe von rund 100 Milliarden Nervenzellen. In seiner Umwelt findet er sich zurecht, weil Augen, Ohren, Nase und Tastrezeptoren ihm Informationen zu tragen, die sein Gehirn auswertet und die es ihm unter anderem ermöglichen, sich Nahrung zu verschaffen und Bedrohungen zu erkennen. Gefahren für sein Inneres wehrt der Organismus mit seinem Immunsystem ab, dessen Zellen sich millionenfach opfern, um Bakterien, Viren und Parasiten abzutöten oder außer Kontrolle geratene Körperzellen zu vernichten.

Zu erklären ist dieses sich selbst erschaffende, regulierende und erhaltende System „Körper“ nur durch eine Hunderte von Jahrmillionen dauernde Entwicklungsgeschichte, während derer es sich durch zahllose Experimente perfektioniert hat. Und weil die sich zum Menschen entwickelnden Organismen im Lauf der Evolution stets mit dem Problem „fressen oder gefressen werden“ konfrontiert waren, wuchs auch die Steuerzentrale des Körpers, das Gehirn, zu immer besseren Fähigkeiten heran.

Besonders in der letzten Evolutionsphase, als sich schimpansenähnliche Tiere in Afrika auf zwei Beine aufrichteten und in einer Jahrmillionen dauernden Periode zum Menschen entwickelten, wurde das Gehirn immer komplexer. Heute ermöglicht es *Homo sapiens*, sich mit Sprache zu verständigen, langfristig zu planen, Raumstationen zu entwerfen, Opern zu komponieren, sich in das Denken und Empfinden von Mitmenschen einzufühlen – und vor allem, wohl einmalig in der Natur, sich seiner selbst und seiner Vergänglichkeit bewusst zu sein.

Dabei ist der anatomische Aufbau der Gehirne bei allen höheren Primaten (Affen) und beim Menschen in den Grundzügen gleich. *Homo sapiens* verfügt lediglich über ein ungewöhnlich großes Gehirn, dessen Zellen sich im Verlauf der langen Schwangerschaft häufiger teilen und das auch nach der Geburt noch stärker reift als bei seinen Verwandten.

Besonders ausgeprägt ist die Großhirnrinde und darin der „assoziative Kortex“ – ein gleichförmig strukturierter Hirnteil aus 30 Milliarden Nervenzellen, der nicht für bestimmte „Aufgaben“ zuständig ist, sondern Informationsinhalte miteinander verknüpft („assoziiert“). Er ist offenbar der Ort im Gehirn, an dem das den Menschen so prägende Bewusstsein entsteht.



Mit raffinierten Techniken können Mediziner den menschlichen Körper durchschauen – zum Beispiel mit PET, Röntgen- oder Magnetresonanztomographie –, und sie haben Grundfunktionen dieses unendlich komplexen Systems aus Zellen, Geweben und Organen verstanden. Doch noch immer birgt es jede Menge Geheimnisse – zum Beispiel, wie aus den Impulsen von Milliarden Nervenzellen Bewusstsein entsteht

Von zentraler Bedeutung im assoziativen Kortex ist das Arbeitsgedächtnis, das unterschiedliche Gedanken etwa 15 bis 30 Sekunden lang bewusst hält und miteinander verknüpfen kann – quasi der Flaschenhals für unsere sämtlichen geistigen Fähigkeiten. Das Arbeitsgedächtnis sowie das so genannte Broca-Areal sind jene Teile des Gehirns, durch die Menschen sich am stärksten von Schimpansen unterscheiden.

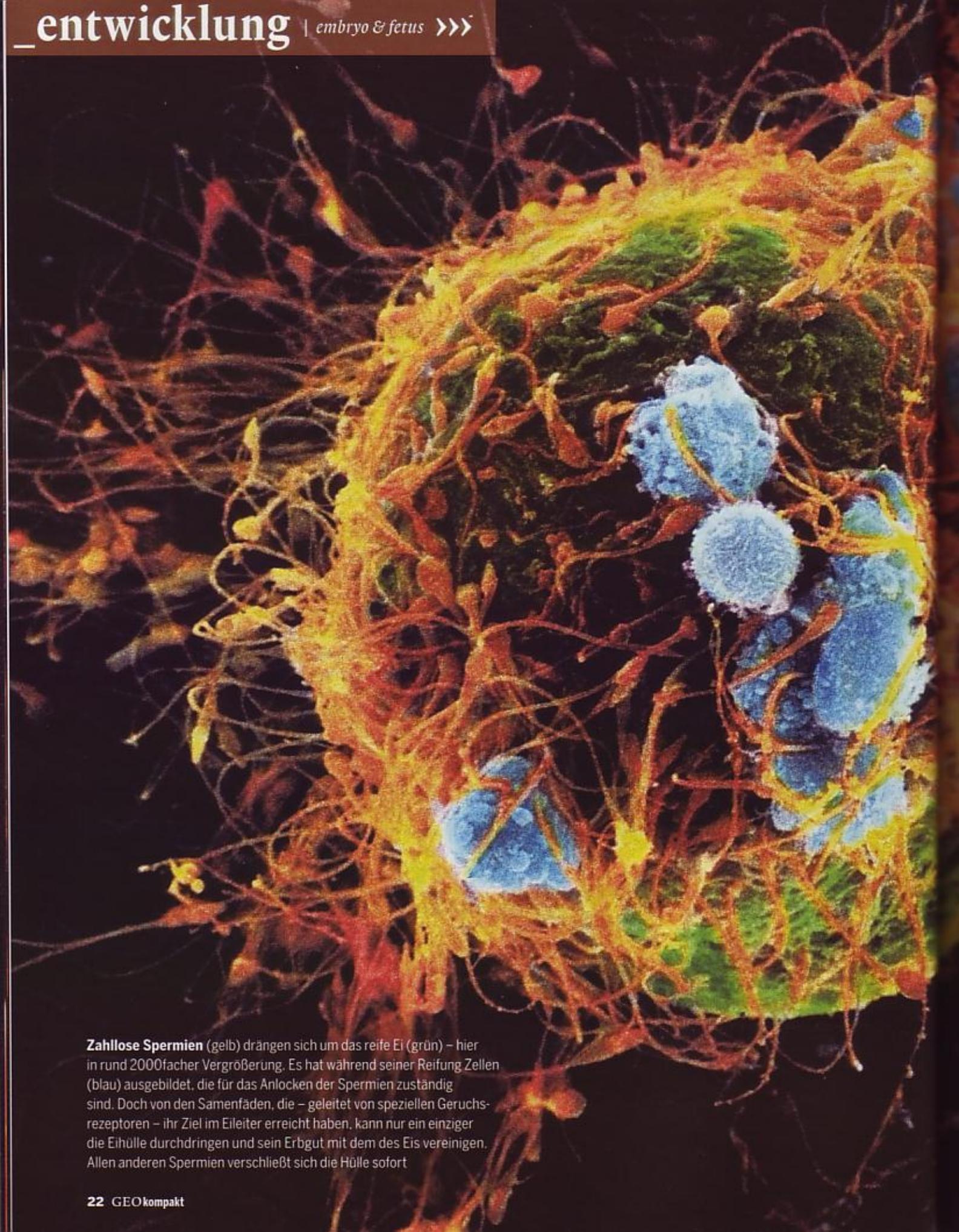
Während manche Forscher glauben, auch die Entstehung von Bewusstsein auf zellulärer Ebene erklären zu können – und zwar als „geordnete Erregung“ eines neuronalen Netzwerks von Nervenzellen –, sind andere der Meinung, dieses Phänomen sei noch völlig unverstanden. Einig ist man sich zumindest, dass Bewusstsein ohne neuronale Strukturen nicht vorstellbar ist und es sich wahrscheinlich nicht nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip einstellt, sondern erst mit der Reifung des Gehirns entwickelt. Kinder zum Beispiel erkennen sich selbst in einem Spiegel erst in einem Alter von etwa anderthalb Jahren. Und „lügen“ können sie erst mit etwa vier Jahren – denn die Voraussetzung dafür ist es, sich in einen anderen hineinversetzen zu können.

Die Existenz des eigenen Körpers ist diesem Bewusstsein nicht ständig präsent. Gleichwohl jagen vom Gehirn aus in jeder Sekunde Millionen von Nervenimpulsen in unsere Organe und Muskeln, um den Körper zu regeln und zu bewegen – und ebenso viele von den Sinnesrezeptoren zurück ins Gehirn, um die Zentrale über die Außenwelt und den Zustand des Körpers zu informieren.

Viele Informations- und Bewegungsabläufe sind dabei so weitgehend automatisiert, dass wir beispielsweise, ohne unseren Geist besonders anstrengen zu müssen, auf zwei Skiern einen steilen Hang hinabrasen, im Millisekunden-Takt höchst komplexe Bewegungen koordinieren und nebenbei den Anblick der Landschaft genießen können. Denn die Körpersteuerung wird von den überwiegend unbewussten Instanzen unseres Nervensystems übernommen – damit der Kopf frei bleibt, um sich auf die wirklich wesentlichen Fragen zu konzentrieren.

Etwa, ob uns der Snowboarder schräg rechts jetzt nicht gefährlich nahekommt. Oder wo die nächste Hütte für einen Einkehrschwung liegt. Oder auch: Wie die Natur es vermocht hat, unseren Körper aus etlichen Billionen Zellen hervorzubringen und was wohl der tiefere Sinn seiner Existenz sein mag. □

Dr. Henning Engeln, 50, Biologe und viele Jahre Redakteur bei GEO, hat dieses Heft redaktionell betreut und bereits an der ersten Ausgabe von GEOkompakt, „Die Geburt der Erde“, mitgearbeitet.

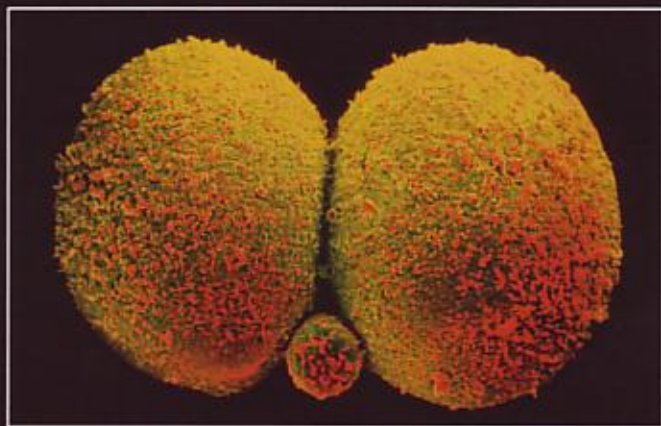


Zahllose Spermien (gelb) drängen sich um das reife Ei (grün) – hier in rund 2000facher Vergrößerung. Es hat während seiner Reifung Zellen (blau) ausgebildet, die für das Anlocken der Spermien zuständig sind. Doch von den Samenfäden, die – geleitet von speziellen Geruchsrezeptoren – ihr Ziel im Eileiter erreicht haben, kann nur ein einziger die Eihülle durchdringen und sein Erbgut mit dem des Eis vereinigen. Allen anderen Spermien verschließt sich die Hülle sofort

Ein neues Leben

Am Anfang gibt es nur das Ei und den Samen – eine mikroskopisch kleine Menge menschlicher Substanz.

Mit deren Verschmelzung jedoch beginnt eine Vielzahl komplexer und fein abgestimmter Prozesse. Wenn alles gut geht, verlässt neun Monate später ein Mensch den Mutterleib, an dem jedes Organ, an dem jeder Zeh an der richtigen Stelle sitzt. Und der schließlich sogar darüber nachdenken kann, wie es dazu gekommen ist



Etwa 30 Stunden nach der Befruchtung hat sich das Ei erstmals geteilt. Das »Polkörperchen« dazwischen wird verkümmern: Es ist vom reifen Ei separiert worden – und enthält jenen Teil des Erbguts, der für die Fortpflanzung nicht gebraucht wird

Von den etwa 300 Millionen Spermien eines Samenergusses gehen die meisten schon auf dem Weg zum Ei zugrunde

Text: Cornelia Stolze

Bevor das so staunenswerte Schauspiel von der Entstehung menschlichen Lebens beginnt, existiert im weiblichen Körper nur eine winzige Kugel. Gerade mal ein Zehntelmillimeter misst die Eizelle, aus der nach der Befruchtung im Verlauf von rund 266 Tagen ein Mensch entstehen wird: ein Wunderwerk mit Händen und Füßen, mit Augen und einem Gehirn – und ausgestattet mit der unter allen Lebewesen einzigartigen Fähigkeit, über sich selbst zu reflektieren und die Umwelt zu gestalten.

So komplex wie das Ergebnis ist auch die Entwicklung dorthin. Denn die Eizelle ist, wenn man so will, nur eine halbe Sache: In ihrem Kern befinden sich – nach Abspaltung des so genannten **Polkörperchens** – nur noch 23 Chromosomen, die Träger des Erbgutes (siehe Seite 28). Jede normale Körperzelle aber wartet mit der doppelten Anzahl auf –

mit dem kompletten Satz von 46 **Chromosomen**. Die für die Menschwerdung fehlenden müssen erst dazukommen. Das geschieht mit dem Spermium, der männlichen Samenzelle.

Erst wenn sich nach einem Geschlechtsverkehr eines der bis zu 300 Millionen Spermien eines Samenergusses zu der Eizelle durchgekämpft, deren Hülle durchbohrt und seinen Teil des Erbgutsatzes bei ihr abgeliefert hat, beginnt jene neun Monate dauernde Entwicklung, die mit der Geburt eines neuen Menschen endet wird. Und schon im Moment der Befruchtung, in dem die beiden Chromosomensatz-Hälften im Kern der Eizelle fusionieren, ist aus dieser etwas Neues geworden: ein Keimling, ein **Embryo**.

Bereits zu diesem Zeitpunkt steht fest, ob daraus ein Mädchen oder ein Junge wird. Denn ein Teil der Spermien trägt unter seinen 23 Chromosomen ein weibliches, ein so genanntes X-Chromosom, der andere ein männliches,

ein Y-Chromosom. Bringt die Samenzelle nun ein Y-Chromosom mit, entsteht aus der Eizelle – die stets ein X-Chromosom trägt – ein Junge (XY), bei einem X-Chromosom wird es ein Mädchen (XX).

Nur wenige Spermien überleben die Passage von der Scheide zum Eileiter, in dem sich das Ei befindet (das sich während des monatlichen Eisprungs von den Eierstöcken gelöst hat). Und nur ein einziges Spermium wird in die Eizelle eindringen. Denn sobald es mit Enzymen aus seiner Spitze die Hülle der Eizelle durchbohrt hat, ist die für andere Spermien versperrt.

Etwa 30 Stunden danach teilt sich die befruchtete Eizelle zum ersten Mal. Dabei werden beide Tochterzellen mit je 23 vom Vater und von der Mutter eingebrachten Chromosomen bedacht – ein Vorgang, der sich von nun an etwa alle 20 Stunden wiederholt.

Aus zwei werden vier, acht und schließlich 16 Zellen. Und dabei ist das Zellkugeln gegenüber der Eizelle noch kaum gewachsen.

Drei bis vier Tage nach der Befruchtung erreicht der Embryo die Gebärmutter:

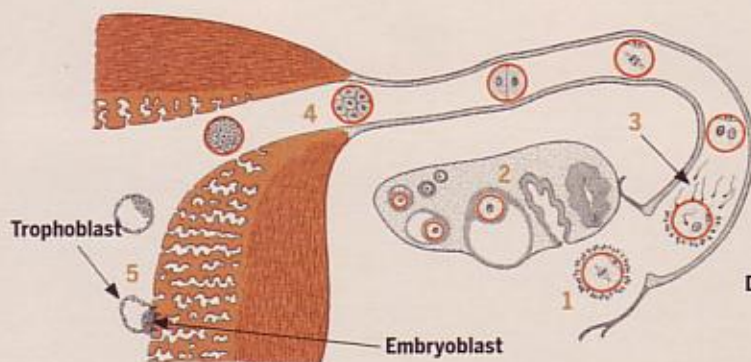
Ein Flüssigkeitsstrom sowie Härchen im Eileiter haben ihn dorthin befördert. Und nun kommt auch Bewegung in die Kugel, die jetzt schon aus bis zu 64 Zellen besteht.

Flüssigkeit dringt in ihr Inneres und drückt die Embryo-Zellen auseinander. Sie werden flacher und kompakter und bilden schließlich eine Hohlkugel aus zwei Zellschichten: aus dem äußeren **Trophoblasten** und dem inneren **Embryoblasten**.

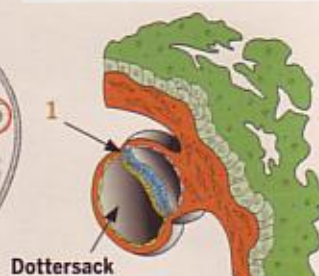
Damit hat sich im Embryo die erste entscheidende Weichenstellung vollzogen. Zumindest grob sind jetzt schon die Aufgaben unter den Zellen verteilt:

- Aus dem Trophoblasten wird die äußere Embryonalhülle und später ein Teil des so genannten „Mutterkuchens“ (**Plazenta**), der den Keim teilweise umgibt und mit Nährstoffen versorgt;
- aus den inneren Zellen entwickelt sich das Kind. Und das bedeutet, dass aus jeder der wenigen Zellen des Embryoblasten (den **embryonalen Stammzellen**) jede der rund 200 Zellarten hervorgehen kann, die im Körper eines Erwachsenen Funktionen haben.

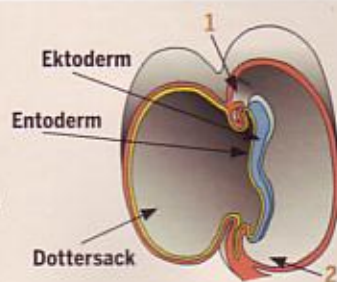
Vom Zellhaufen zum Baby



Erste Woche: Nach ihrer Reifung verlässt die Eizelle [1] den Eierstock [2]. Spermien erreichen sie im Eileiter [3]. Auf dem Weg zur Gebärmutter teilt sich die nun befruchtete Eizelle bereits mehrfach [4]. Etwa nach sechs Tagen nistet sie sich in der Gebärmutterwand ein [5].



Zweite Woche: Die Zellen ordnen sich zu einer zweischichtigen „Keimscheibe“ [1]: Aus dem „Ektoderm“ (blau) formt sich später das Äußere, aus dem „Entoderm“ (gelb) teilweise das Innere des Organismus.



Dritte Woche: Die Keimscheibe beginnt sich zu verlängern und zu krümmen – zu einer Kopf- und einer Schwanzfalte [1 und 2]. Zwischen Entoderm und Ektoderm wird sich das „Mesoderm“, eine weitere Zellschicht, schieben.

Nach fünf bis sechs Tagen besteht der Keimling aus gut 100 Zellen und muss sich nun in der Gebärmutter, dem Uterus, einnisten, um Kontakt mit dem Blutkreislauf der Mutter aufzunehmen. Dazu sondern die Trophoblast-Zellen Enzyme ab, die einige Zellen in der obersten Schicht der Gebärmutter Schleimhaut auflösen. Der Embryo kann sich nun in das Bindegewebe der Schleimhaut schieben. Über ihm wachsen neue Hautzellen und schließen die „Wunde“.

Während dieses Einnistens nimmt der Embryo Proteine, Zucker, Fette und Reste der zerstörten Schleimhaut auf. Das hat Folgen: Sein Durchmesser wächst auf mehr als das Doppelte. Im Trophoblasten entstehen kleine, mit Blut gefüllte Hohlräume (Lakunen). Schließlich lösen die Zellen des Trophoblasten die mütterlichen Blutgefäße in der Gebärmutter Schleimhaut teilweise auf.

Am Ende der zweiten Woche kann daraufhin mütterliches Blut in die Lakunen einströmen und sie durch kleine Blutgefäße wieder verlassen. Auf diesem Weg wird der Embryo nun von der Mutter mit



Vier Tage nach der Befruchtung hat sich der Embryo bereits mehrfach geteilt. Aus den äußeren Zellen entwickelt sich Nährgewebe. Aus den inneren Zellen wächst das Kind heran



Nach 28 Tagen weist dieser vier Millimeter große Embryo erste Körperstrukturen auf: Am Kopf entwickeln sich bereits die Augenbecher [1] und Ohrenbläschen [2]

allen lebensnotwendigen Ressourcen versorgt.

Zudem bildet der Trophoblast vom siebenten Tag an das Hormon HCG (Human Chorionic Gonadotropin). Dieses bewirkt, dass die Gebärmutter Schleimhaut nicht wie sonst zwei Wochen nach den fruchtbaren Tagen mit der Regelblutung abgestoßen wird.

Etwa vom achten Tag an beginnt im Embryo die nächste Verwandlung. Aus den embryonalen Stammzellen formt sich die **Keimscheibe**, in der sich zwei neue Zellschichten unterscheiden lassen:

- die äußere, das **Ektoderm**, die später einmal zu Haut, zu

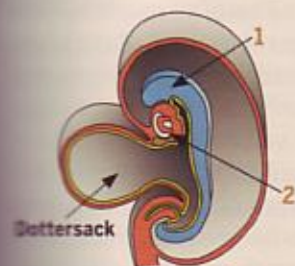
Sinnesorganen und zum Nervensystem wird;

- die innere, das **Entoderm**, die sich unter anderem zu Magen, Darm, Blase, Bronchialbaum, Kehlkopf und Luftröhre entwickelt.

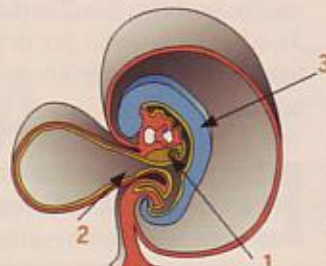
Zu Beginn der dritten Woche spezialisieren sich die Zellschichten weiter. In der Mitte der Keimscheibe kerbt sich das Ektoderm ein. Es bildet sich der „Primitivstreifen“ – eine schmale Rinne, die sich vertieft und durch die „vorn“ und „hinten“ beim Embryo endgültig festgelegt wird. Kurz darauf wandern Ektoderm-Zellen aus dem Primitivstreifen in dessen Vertiefung und schieben sich zwischen Ektoderm und Entoderm. Daraus entsteht eine

dritte, mittlere Zellschicht: das **Mesoderm**, aus dem später Muskeln, Knochen, Herz, Blutgefäß- und Lymphgefäßsystem, Nieren und ableitende Harnwege sowie die Geschlechtsorgane werden.

Ektoderm, Entoderm und Mesoderm sind die **Keimblätter**, und ihre Herausbildung ist der Auftakt zu einer Phase schneller Umgestaltungen: Einzelne Zellen beginnen zu wandern, das Mesoderm furcht und faltet sich. Die runden Keimblätter werden länglich, und zu beiden Seiten des Primitivstreifens wölben sich die **Neuralwülste**. Besonders schnell wachsen diese in den folgenden Tagen am „Kopfe“, wo sie die zwei Höcker

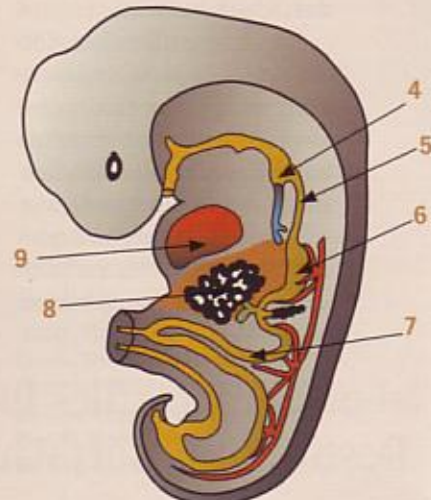


Folgende Tage: Das „Kopfe“ wächst besonders schnell [1]. Im Mesoderm lagern sich Zellen zu Gruppen, die das Zellmaterial für Muskeln und Knochen liefern. Auch der Herzschauch [2] wird aus Mesoderm-Zellen angelegt.



Ende des ersten Monats: Erkennbar entsteht nun aus der sich krümmenden Keimscheibe ein Mensch. Aus den Zellen des Entoderms bilden sich die Organe des Magen-Darm-Trakts [1]. Der Dottersack, der anfangs der

Ernährung des Embryos diente, wird nun abgeschnürt [2]. Das Ektoderm [3] bildet Hautzellen sowie das Nervensystem aus. „Lotsenstoffe“ dirigieren die Vorläuferzellen der Muskeln und Knochen an ihren Bestimmungsort. Wenige Tage später (rechts) sind typische innere Körperstrukturen wie Kehlkopf [4], Speiseröhre [5], Magen [6], Dünndarm [7], Leber [8] und Herz [9] angelegt.



der **Neuralplatte** bilden. Die Vertiefung dazwischen wird zur **Neuralrinne**.

Etwa zur gleichen Zeit setzen auch im Mesoderm Veränderungen ein: Rechts und links der Neuralrinne werden nach und nach über 40 Paare kleiner Mesoderm-Zellen-Päckchen sichtbar. Das sind die **Somiten** – Organe, die sich nur vorübergehend ausbilden und jenes Zellmaterial liefern, aus dem später die Wirbelsäule, die gesamte quergestreifte Muskulatur des Rumpfes, der Arme und Beine sowie das Unterhautgewebe entstehen.

Unterhalb der Neuralplatte formt sich wiederum aus Mesoderm-Zellen der Herzschlauch. Schon in der dritten Woche beginnt er zu pulsieren und Blut durch einen einfachen Kreislauf zu pressen.

Der nächste Akt beginnt 20 Tage nach der Befruchtung. Noch ist der Embryo nur 1,5 bis 2,5 Millimeter groß, doch schon entstehen die Anlagen für Herzklappen und -trennwände, formen sich die Anlagen für Leber, Lunge, Bauchspeicheldrüse und Magen. Außerdem schließen sich die Neuralwülste zum **Neuralrohr**, an dessen vorderem Ende das Gehirn entsteht.

Aus dem unförmigen Körper sprießen jetzt Knospenpaare – zunächst eines im oberen Teil, dann ein zweites im unteren. Nach einigen Wochen ist zu erkennen, was daraus werden soll: Arme und Beine.

Woher aber „wissen“ Zellen, dass sie Knospen bilden sollen? Wie erfahren sie, dass

sie innerhalb des Embryos zu wandern, sich zu verformen oder neue Organe auszubilden haben? Noch vor wenigen Jahren hatte niemand darauf eine hinreichende Antwort. Inzwischen aber verstehen die Forscher ziemlich gut, nach welchen Prinzipien sich einzelne Körperteile entwickeln.

Zum Beispiel die Gliedmaßen. Nachdem sehr früh im Embryo der Ort festgelegt ist, wo einmal ein Arm wachsen soll, halten sich dafür dort die ersten Ektoderm- und Mesoderm-Zellen bereit. Spezielle Regulatorgene, so genannte **Hox-Gene**, vermitteln den Zellen nach und nach ihre Aufgaben.

So erhalten die Zellen in der Armknospe eines frühen Embryos zunächst die Grundprogrammierung „Arm“. Noch aber kann aus ihnen ebenso gut eine Zelle im Finger wie eine im Oberarm werden. Schritt für Schritt werden dann innerhalb der Armknospe „vorn“ und „hinten“, „oben“ und „unten“, „rechts“ und „links“ festgelegt. An jenem Teil der Knospe, der zum Körperende hin orientiert ist, entsteht nach Anleitung eines Hox-Gens ein **Protein**. Und das wiederum aktiviert in den Knospenzellen die Steuergene für die Anlage der Finger.

Damit an den vorgegebenen Arm- und Fingerregionen auch die entsprechenden Muskeln wachsen, bedarf es weiterer Steuerung. Denn die Zellen für die Muskelbildung entstehen nicht da, wo sie gebraucht werden, sondern bilden sich in den Somiten, den Organen auf



42. Tag: Der »Mutterkuchen« [1] – gebildet aus Zellschichten des Embryos [2] und mütterlicher Schleimhaut – versorgt diesen nun über die Nabelschnur [3]. Der Dottersack [4] bildet sich zurück.

Zeit. Von dort wandern sie zu ihrem Bestimmungsort.

Wohin die Reise gehen soll, erfahren die Muskelvorläuferzellen vermutlich durch Signale, welche die Zellen in der Armknospe absondern. Fest steht, dass für die Wanderung ein „Scatterfactor“ benanntes Protein die maßgebliche Rolle spielt. Es bewirkt, dass sich die Muskelvorläuferzellen aus ihrem Verband lösen und regelrecht durch das Gewebe „kriechen“, bis sie an der sich herausbildenden Armknospe landen.

Ende der fünften Woche: Der Kopf ist auffällig stark gewachsen – eine Folge der rapiden Entwicklung des Gehirns, das sich etwa gleichzeitig mit der Heraus-

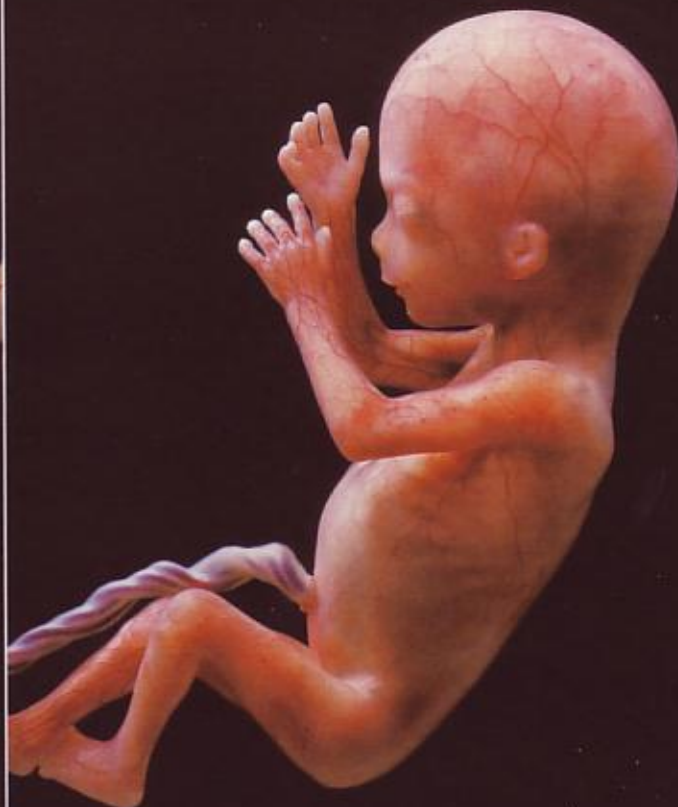
bildung der Arm- und Beinknospen in ein Vorder-, Mittel- und Rautenhirn gegliedert hat. Auch das, was eine Hand werden soll, verbreitert sich paddelförmig, und es zeichnen sich kurz darauf die Fingerstrahlen ab. Mithilfe von Ultraschall ist bereits zu erkennen, dass Rumpf und Gliedmaßen sich spontan bewegen.

Um den 40. Tag nach der Befruchtung beginnt sich der Rumpf zu strecken. Nach wie vor ist der Embryo kaum länger als ein Daumennagel. Doch die Bildung der Organe vollzieht sich jetzt immer rascher. Schon werden die Augen-Nasen-Furche und Ohrhöckerchen sichtbar. Bald danach grenzen sich Ellenbogen und Zehenstrahlen ab, Augenlider und Nasenspitze

»Lotsenmoleküle« locken die richtigen Zellen an ihren Bestimmungsort – nur deshalb wachsen Hände an den Armen



70. Tag: Die Organe des Ungeborenen sind bereits weit entwickelt; das Geschlecht ist jedoch noch nicht erkennbar. In den nächsten Wochen legt der Fetus vor allem an Größe und Gewicht zu



21. Woche: Der Fetus misst rund 25 Zentimeter. Die Mutter spürt dessen Bewegungen. Überleben könnte ein Frühgeborenes erst sechs Wochen später. Dann sind die wichtigsten Organe genügend ausgereift

werden deutlich und sogar die Brustwarzen.

In dieser Phase reagiert der Embryo auf äußere Einflüsse besonders empfindlich – wie sich etwa vor gut 40 Jahren erwies, als in Deutschland vermutlich 4000 bis 5000 Kinder mit Fehlbildungen an den Gliedmaßen zur Welt kamen. Ursache war die Einnahme des Schlafmittels Contergan: Desse Wirkstoff Thalidomid blockiert exakt jene Mechanismen, die zwischen der vierten und sechsten Schwangerschaftswoche die Entwicklung von Armen und Beinen steuern.

In der siebten und achten Woche nach der Befruchtung startet der Embryo gewissermaßen seinen Endspurt. Fast alle Organe sind schon angelegt. Magen, Leber, Niere, Blase, Lunge und Darm, selbst die Zunge und die Speicheldrüsen sind um den 50. Tag herum ansatzweise zu erkennen.

Im Inneren des 16 bis 22 Millimeter langen Körpers bilden sich jetzt Strukturen, die ihm als Gerüst für künftige Bewegungen dienen: die Wirbelsäule, die Rippen, die Knochen in Armen und Beinen und die Schädelbasis. Dieses frühe Skelett besteht noch aus weichem Knorpelmateriale. Erst später werden sich darin Knochenzellen ansiedeln und den Knorpel allmählich in Knochen verwandeln.

Am Ende der achten Woche beginnt das zweite große Kapitel der Menschwerdung. Das erste beschrieb die Geschichte des Embryos, des „Keimlings“. Jetzt beginnt die Geschichte des **Fetus**, des „Nachkommen“ – der zunächst einmal wachsen muss. Bis zur 20. Schwangerschaftswoche wird aus dem Winzling nun ein bis zu 24 Zentimeter langer

Mensch. Im fünften Monat nimmt die Mutter erstmals dessen Bewegungen wahr. Arme und Beine sind komplett entwickelt, doch ist der Kopf im Vergleich zum Rumpf noch viel zu groß.

Sechseinhalb Monate nach der Befruchtung sind die Organe, vor allem Gehirn, Herz und Lunge, schon so weit ausgereift, dass das Kind, käme es jetzt zur Welt, mit massiver medizinischer Hilfe lebensfähig wäre. In den letzten drei Monaten im Mutterleib reift das Kind heran und gewinnt alle vier Wochen durchschnittlich etwa 700 Gramm Gewicht. Allerdings wächst mit jeder weiteren Woche auch ein Problem: Der Schädel des Kindes darf nicht zu groß werden für den Geburtskanal.

Etwa in der 40. Schwangerschaftswoche sorgt – so lassen jedenfalls die Ergebnisse von Experimenten an Mäusen ver-

muten – der Fetus selbst für Wehen: Seine Lunge bildet ein Protein, das ins Fruchtwasser gelangt, sich schließlich an der Gebärmutterwand anlagert und eine Art Entzündungsreaktion auslöst. Das hat zur Folge, dass sich das Bindegewebe im Gebärmutterhals lockert und die Muskulatur der Gebärmutter in kräftigen Schüben zusammenzieht. Diese Kontraktionen helfen der Mutter, das Kind durch den Geburtskanal zu pressen.

So kompliziert die Entwicklung eines Menschen aus einer einzigen Zelle auch ist – das Verfahren hat sich offenbar bewährt: Rund 15 000-mal in jeder Stunde, 250-mal in jeder Minute kommt heutzutage ein neuer Mensch zur Welt. □

Cornelia Stolze, 38, arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Berlin. Wissenschaftliche Beratung: Prof. Dr. Monika Hassel, Universität Marburg.

Es war rätselhaft, wie etwa Augenfarben, Körpergröße oder Locken sich vererben – bis Forscher die Erbsubstanz DNS entdeckten. Sie fanden heraus, wie Gene von den Eltern an die Kinder weitergegeben werden, entschlüsselten den genetischen Code und konnten erklären, wie die Erbmoleküle die Biochemie des Körpers steuern

DAS ALPHABET DES LEBENS

Ein Gen ist das Rezept für ein bestimmtes Eiweiß

wie es funktioniert: Wie überträgt sich die Erbinformation der Gene auf die Nachkommen? Was geschieht da mit der DNS? Wie speichern die Gene überhaupt Informationen? Wie etwa unterscheidet ein Gen zwischen der Information Gelb und Grün?

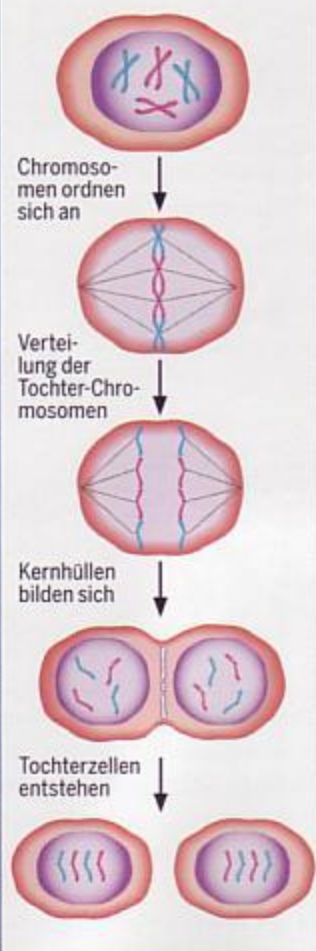
Erst 1953 brachten der amerikanische Biochemiker James D. Watson und der britische Physiker Francis Crick Licht ins Dunkel. Nach ihrem Modell sieht das DNS-Molekül aus wie eine schraubenförmige Strickleiter: eine so genannte Doppelhelix. Die Holme der Leiter bestehen aus Phosphatmolekülen und dem Zucker Desoxyribose. Die Sprossen sind dagegen aus je zwei Molekülen gebildet – und zwar aus jeweils zwei der Basen Adenin (A), Cytosin (C), Thymin (T) und Guanin (G). Dabei ist A stets mit T kombiniert und C mit G.

Das Modell von Watson und Crick ist deshalb so eindrucksvoll, weil die Struktur der Doppelhelix auf Anhieb nahe legte, wie sich das DNS-Molekül kopiert: Der Doppelstrang braucht sich nur wie ein Reißverschluss zu öffnen. In der Zelle sind dafür spezielle **Enzyme** (Eiweiße) zuständig, die den komplizierten biochemischen Vorgang steuern.

Einige von ihnen lösen die Bindungen zwischen den Basenpaaren und trennen die beiden Stränge der Strickleiter. Dann holen andere Enzyme neue Leiter-Bruchstücke herbei – sie bestehen aus je einer Base, drei Phosphaten sowie einem Zucker. Alle liegen in der Zelle bereit und ergänzen die fehlenden Teile. Weil jeweils nur A und T sowie G und C zusammenpassen, ergänzen die Enzyme das fehlende Teil

Millionen neuer

Zellen bilden sich in jeder Sekunde im menschlichen Körper – durch Teilung aus bereits vorhandenen. Bevor jeweils exakte Kopien entstehen, verdoppelt eine Zelle in ihrem Kern die Erbsubstanz. Anschließend ordnen sich deren Träger, die X-förmigen und nun mit der verdoppelten DNS ausgestatteten Chromosomen, in der Mitte der Zelle an. Die Hülle des Zellkerns löst sich auf, und es formiert sich ein „Spindelapparat“, der alle linken und alle rechten Chromosom-„Doppel“ jeweils in eine Hälfte der Zelle zieht. Zwei neue Kernhüllen bilden sich, und durch Einschnürung der Zellmembran entstehen zwei Tochterzellen.



und bilden einen neuen, komplementären DNS-Strang.

Eine solche DNS-Verdoppelung ist die Voraussetzung für jede Zellteilung. Nur so können die neuen Tochterzellen mit dem gesamten Genom der Mutterzelle ausgestattet werden. Wenn zum Beispiel aus einer befruchteten Eizelle ein Embryo heranwächst (siehe Seite 22), findet dieser Vorgang Abermilliarden Mal statt. Aber auch im Erwachsenenalter bildet unser Körper ständig neue Zellen: Unsere Haut etwa erneuert sich durch Zellteilung – ein Vorgang, von dem wir gewöhnlich erst nach einem Sonnenbrand Notiz nehmen.

Mitunter verläuft die Verdoppelung von DNS-Molekülen fehlerhaft, oder es werden bei der Bildung von Ei- und Samenzellen Chromosomen verändert oder falsch verteilt. Dann hat man es mit einer **Mutation** zu tun – einer meistens nachteiligen, in einigen Fällen jedoch vorteilhaften Änderung des Bauplans.

Nach und nach entschlüsseln Forscher auch, wie das DNS-Molekül Informationen speichert: mit der Reihenfolge seiner Basen. Wie die Buchstaben in Codewörtern beschreiben diese Basen, welche Eiweiße (Proteine) ein Organismus herzustellen hat.

Die Eiweiße sind die wichtigsten Bestandteile des Körpers. Manche bauen als so genannte Strukturproteine einen großen Teil der Zellsubstanz auf, andere steuern als Enzyme, als Biokatalysatoren, fast alle

chemischen Vorgänge in den Zellen. So entscheiden sie, ob aufgenommene Fettmoleküle zu Teilen der Zellmembran werden, sie spalten Zuckermoleküle zur Energiegewinnung oder synthetisieren in der Iris mancher Menschen den Farbstoff Melanin, dessen Menge die Augenfarbe bestimmt.

Jedes Eiweiß besteht aus durchschnittlich 100 bis 500

Aminosäuren, von denen es insgesamt 21 verschiedene gibt. Für die Bildung einer Nervenzelle etwa werden andere Eiweiße benötigt als für eine Muskelzelle. Der in der DNS gespeicherte Code legt die Reihenfolge der Aminosäuren eines Eiweißes fest – und damit auch dessen Identität.

Das geschieht folgendermaßen: Drei Basen eines Gens kodieren eine bestimmte Aminosäure. Taucht im Gen die Buchstabenfolge CAA auf, dann heißt das für das **Ribosom**, die molekulare Fabrik der Zelle, in der die Eiweiße gebaut werden (siehe Kasten rechts): „Als Nächstes nimmst du die Aminosäure Glutamin.“

So reiht sich, den Codebuchstaben des Gens folgend, Aminosäure an Aminosäure, bis das betreffende Eiweiß fertig ist. (In Wirklichkeit ist der gesamte Vorgang sehr kompliziert. So wird zunächst eine Abschrift der Information auf der DNS im Kern hergestellt und ins Zytoplasma zu den Ribosomen transportiert; zudem wirken Helfermoleküle mit.)

Ein bestimmtes Gen enthält also ein Rezept, nach dem in



Chemische Bindungskräfte in der DNS bewirken, dass sich die beiden Stränge des Moleküls zu einer Doppelhelix verdrillen

Text: Bas Kast
Illustration: Richard Morris

Auch heute noch geraten Genetiker ins Grübeln, wenn sie die Frage beantworten sollen, was Gene bewirken. Dabei hatte alles so einfach angefangen, und zwar 1856, in einem Kloster im mährischen Brunn.

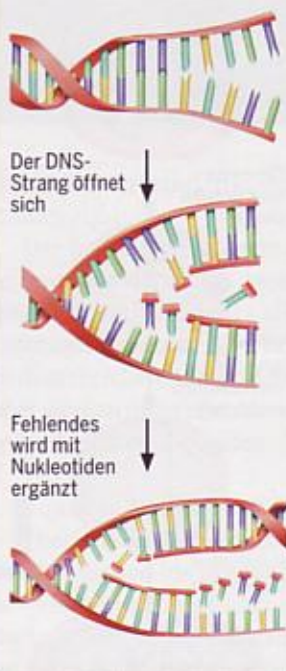
Damals begann ein Augustinermönch namens Gregor Mendel ein Experiment mit Erbsensamen. Drei Jahre lang säte er im Garten des Klosters Erbsen aus, die entweder glatt und gelb oder runzlig und grün waren. Als sie im dritten Jahr wiederum blühten, kreuzte Mendel die beiden Sorten und sah sich die Nachkommen an.

Verblüfft stellte der Mönch fest, dass deren Samen alle gleich aussahen: glatt und gelb. Nun zog Mendel aus ihnen Pflanzen auf und kreuzte sie wiederum miteinander. Das Erntergebnis überraschte ihn noch mehr: Manche Erbsen zeigten ganz neue Kombinationen von Eigenschaften, einige sahen nunmehr glatt und grün aus, andere gelb und runzlig.

Damit war Mendel auf ein entscheidendes Phänomen gestoßen: Eine Erbsenpflanze musste über Strukturen verfügen, die dem Samen sein Aussehen verleihen und bei der Weitergabe an die Nachkommen unabhängig kombiniert werden. Nur, wo im Organismus befinden sich diese Erbanlagen? Wie sehen sie aus? Wie viele gibt es? Und wie entfalten sie ihre Wirkung?

Das alles haben Forscher erst im Laufe des 20. Jahrhunderts herausgefunden. Heute weiß man, dass die Träger der Erbinformation sich nicht nur in Erbsenpflanzen befinden, sondern in jedem lebenden Geschöpf: vom Kaktus bis zur

Verdoppeln muss sich die Erbsubstanz vor einer Zellteilung, damit jede der beiden Tochterzellen das vollständige Erbmaterial erhält. Dazu spaltet sich zunächst das strickleiterähnliche DNS-Molekül in der Mitte der „Sprossen“ auf. Die beiden halben „Leitern“ werden zu zwei ganzen komplettiert, indem Eiweißmoleküle so genannte „Nukleotide“ herantransportieren und mit diesen DNS-Bausteinen die fehlenden Leiterteile ergänzen. Und weil – wie schon in der ursprünglichen Leiter – stets nur je zwei Nukleotid-Varianten zusammenpassen (hier Blau mit Gelb und Grün mit Violett), gleichen die ergänzten DNS-Molekülstränge exakt den alten. Entstanden ist so eine perfekte Erbgutkopie.



Giraffe, von der Maus bis hin zum Menschen. Und seit der dänische Botaniker Wilhelm Johannsen sie 1909 erstmals so bezeichnet hat, werden sie **Gene** genannt (vom griechischen Wort *genein* = zeugen, entstehen).

Wer ein Haus bauen will, braucht einen Bauplan. Wie groß soll das Haus werden, wie aussehen? Wohin kommt das Bad oder die Haustür? Etwas Ähnliches benötigt die Natur für die Konstruktion der Lebewesen. Die Gene sind es, die diesen Bauplan enthalten. Eine Giraffe etwa hat deshalb einen so langen Hals, weil ihre Giraffen-Gene es festlegen.

Die Gene befinden sich in jeder Zelle. Vor allem fasziniert, dass jede der womöglich 100 Billionen Zellen des Menschenkörpers die vollständige Erbinformation nicht nur für diese eine enthält, sondern auch für alle anderen Zellen dieses Körpers (einzige Ausnahme: rote Blutkörperchen). Man kann sich diese Erbinformation, das **Genom**, als molekularen Mikrochip vorstellen. In zahlreichen Informationseinheiten ist darauf gespeichert, wie ein Körper auszusehen hat. Und diese Informationseinheiten sind die Gene.

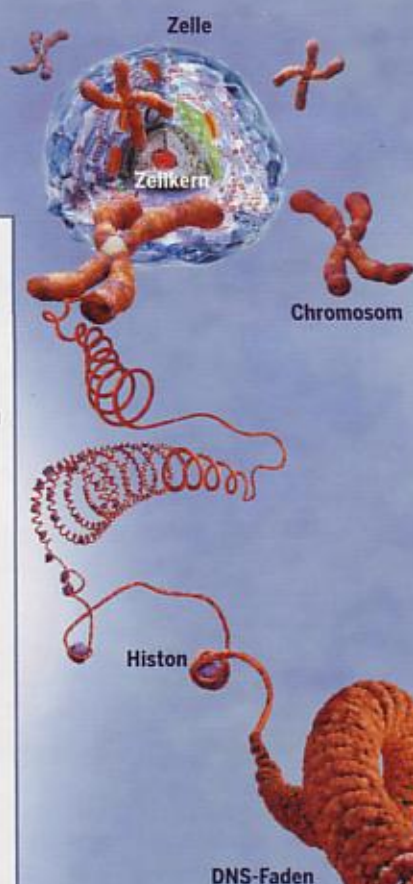
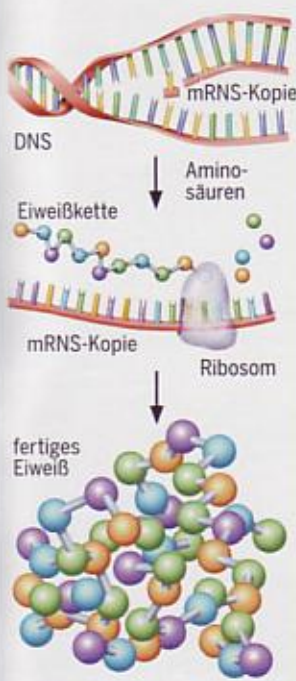
Dabei schwimmen die Gene nicht lose in der Zelle, sondern reihen sich wie Perlen einer Kette zu langen fadenförmigen Molekülen auf. Da diese mit allen Genen zusammen fast zwei Meter lang wären, sind sie in kompakten Einheiten organisiert, den **Chromosomen**. Geborgen sind sie in einem durch eine Membran abgesonderten Zellbereich, dem **Zellkern** (Nukleus). Deshalb und da die Erbsubstanz eine Säure ist, heißt sie Nukleinsäure, genauer: Desoxyribonukleinsäure (**DNS**). Gene sind Abschnitte dieser DNS.

Noch bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts war die DNS ein Mysterium. Niemand wusste, wie dieses Molekül aussieht, geschweige

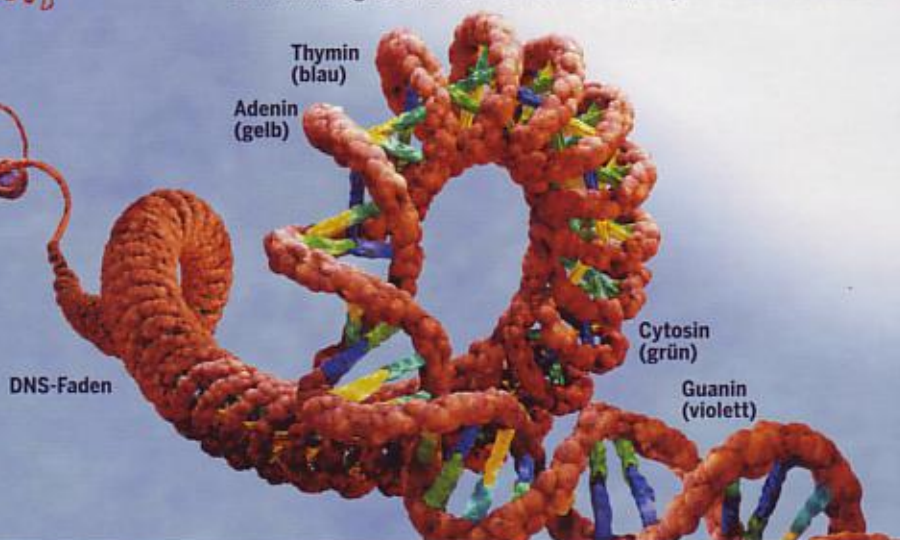
Chromosomen (von griech. *chroma* = Farbe und *soma* = Körper) nannten Forscher gegen Ende des 19. Jahrhunderts Strukturen in einem Zellkern, weil diese sich mit bestimmten Chemikalien anfärben ließen. Heute weiß man, dass sich die Erbsubstanz (DNS) – zusammen mit Eiweißmolekülen – vor einer Zellteilung zu derartigen »Kernfäden« formiert (links eine aktuelle Darstellung), und zwar bei Menschen normalerweise zu 46 Chromosomen (wovon zwei das jeweilige Geschlecht bestimmen). Diese »Portionierung« der Erbsubstanz erleichtert deren exakte Verteilung, die bei jeder Zellteilung notwendig ist. Ohne diese kompakte Verpackung lägen die DNS-Moleküle, die aneinander gereiht zwei Meter lang wären, wirr im winzigen Zellkern.

Die Erbsubstanz im

Zellkern regelt den Bau aller Zellen im Organismus sowie dessen gesamten Stoffwechsel, indem sie gezielt diejenigen Eiweiße herstellen lässt, die als Zellbaustoff dienen oder biochemische Steuerungsfunktionen übernehmen. Für die Produktion eines bestimmten Eiweißmoleküls öffnet sich jeweils ein ganz bestimmtes Stück DNS – ein Gen – und genau dort entsteht eine „Abschrift“ der Erbinformation in Form eines mRNS-Moleküls (Boten-Ribonukleinsäure). Die mRNS gelangt dann zu den Ribosomen, den Eiweiß-Fabriken im Zellinneren, und lässt dort das erforderliche Eiweißmolekül in der vom Gen bestimmten Reihenfolge aus in der Zelle vorhandenen Aminosäuren zusammenbauen.



Nur zeitweilig formieren sich die fadenförmigen, etwa zwei Meter langen, aber nur zwei Millionstelmillimeter dünnen DNS-Moleküle im Zellkern zu Chromosomen – etwa zu Beginn einer Zellteilung. Dann schlingt sich der DNS-Faden um bestimmte Eiweißmoleküle (so genannte Histone), und diese Struktur windet sich ihrerseits spiralförmig. Windungen und Schleifen sind offenbar Formprinzipien des Erbgutes. Auch die DNS-Moleküle selbst kommen nur in Form eines strickleiterförmigen Doppelstrangs vor, einer so genannten Doppelhelix. Diese enthält schier endlose und für jedes Individuum spezifische Reihenfolgen „genetischer Buchstaben“: rund sechs Milliarden in einer jeden Zelle. Etwa 1000 solcher Buchstaben – der **Nukleinsäurebasen** Adenin, Cytosin, Thymin und Guanin – entsprechen einem Gen, dem DNS-Abschnitt, der das Rezept für die Herstellung eines bestimmten Eiweißmoleküls enthält. Gene machen nur rund 1,5 Prozent der DNS eines Menschen aus. Trotzdem zählt der große Rest zum Genom – zum „Bauplan“ für ein Individuum.



der Eiweißfabrik der Zelle ein bestimmtes Eiweiß hergestellt wird. Die Gene entscheiden daher, welche Eiweiße produziert werden – und damit darüber, wie wir aussehen. Von ihnen hängt ab, wie lang unser Hals wird, welche Farbe die Augen, welche Struktur die Haare oder die Fingernägel haben.

Darüber hinaus aber – denn nichts in unserem Körper ist unkompliziert – gibt es auch Gene, die sich mit ihren Eiweißen nur indirekt am Körperaufbau beteiligen: indem sie nämlich andere Gene an- und abschalten. Die wiederum sorgen dafür, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Zelle bestimmte Eiweiße in bestimmten Mengen produziert werden. Ist beispielsweise der Zuckerspiegel hoch, braucht

die Zelle Enzyme, die den Zucker abbauen.

Das heißt: Jede Körperzelle besitzt zwar einen biologischen Mikrochip, der alle Informationen für den Körperbau speichert. Je nach Zelle aber werden unterschiedliche Informationen abgerufen.

Jüngsten Analysen zufolge besitzt der Mensch lediglich 20 000 bis 25 000 Gene – viel weniger, als früher gedacht. Die Ackerschmalwand bringt es auf immerhin 27 000 Gene. Mit anderen Worten: Der Mensch hat weniger Gene als ein Unkraut.

Die Komplexität eines Organismus ist also nicht proportional zur Zahl seiner Gene. Als Erklärung haben Molekularbiologen herausge-

funden, dass aus einem Gen mehrere Eiweiße entstehen können. Damit nicht genug: Offenbar kann dasselbe Eiweiß unterschiedliche Aufgaben erfüllen, oder mehrere Eiweiße können bei der Ausbildung eines körperlichen Merkmals gemeinsam agieren.

Zwar haben Wissenschaftler sich inzwischen auf eine Mindestdefinition geeinigt: Ein Gen ist ein Segment der DNS, das den Bauplan für ein bestimmtes Protein oder für eine der **Nukleinsäuren** enthält (aus denen großenteils auch die Eiweißfabriken der Zelle aufgebaut sind). Doch was ein Gen letztlich im Körper auslöst, stellt die Forscher oft immer noch vor Rätsel. □

Bas Kast, 32, ist Wissenschaftsredakteur beim Berliner „Tagesspiegel“.

Die Zelle

Wie aus diversen Lego-Bausteinen ein Haus oder ein Auto zu basteln ist, so baut auch das Lebewesen Mensch sich aus Grundbausteinen auf: aus Billionen von Zellen. Jede besitzt die gleichen, bis zu 25 000 Gene. Doch indem der Körper einzelne davon an- oder abschaltet, bringt er mehr als 200 Zellvarianten hervor – etwa jene, die Nerven oder Muskeln, Haut oder Knochen bilden. Gleiche Zellen fügen sich zu Geweben, Gewebe zu Organen. Das alles gelingt nur durch subtile biochemische Abstimmung – die nutzlos gewordene Zellen sogar sich selbst zerstören lässt

Des Lebens kleinste Einheit

Eine Zelle – hier eine Computergrafik – ist ein weitgehend selbstständig funktionierender Mikrokosmos. Nach außen abgegrenzt ist sie durch eine Zellmembran [1] aus Fett- und Eiweißmolekülen, die gezielt Substanzen ins Zellinnere schleust – vor allem Sauerstoff, Brennstoffe und Baustoffe – und Zellprodukte hinauslässt. Im Inneren der Zelle sind winzige spezielle Gebilde für diverse biochemische Aufgaben zuständig (siehe Seite 38). Gesteuert werden diese »Organellen« vom Zellkern [2] aus, in dem sich der weit überwiegende Teil der Erbsubstanz befindet (siehe Seite 28)

1

2

Ein Hexenkessel voll Biochemie

Im Innenraum einer Zelle, dem Zytoplasma, laufen Abertausende biochemischer Reaktionen ab. So erzeugen zum Beispiel die Mitochondrien [1] chemische Energie (ATP), indem sie Abbauprodukte von Zuckern, Fetten oder Eiweißen mit Sauerstoff »verbrennen«. Nach Anweisungen aus dem Zellkern [2] bauen spezielle Proteinfabriken – die Ribosomen [3] – unterschiedlichste Eiweißmoleküle zusammen, die zum Teil Zellsubstanz aufbauen, zum Teil biochemische Reaktionen steuern. Membransysteme wie das Endoplasmatische Retikulum [4] und der Golgi-Apparat modifizieren und transportieren Moleküle durch die Zelle. Die Lysosomen [5] enthalten Stoffe, die Zellreste abbauen, und die Filamente [6] – lange, fadenförmige Eiweiße – fungieren als Gerüst der Zelle.

6

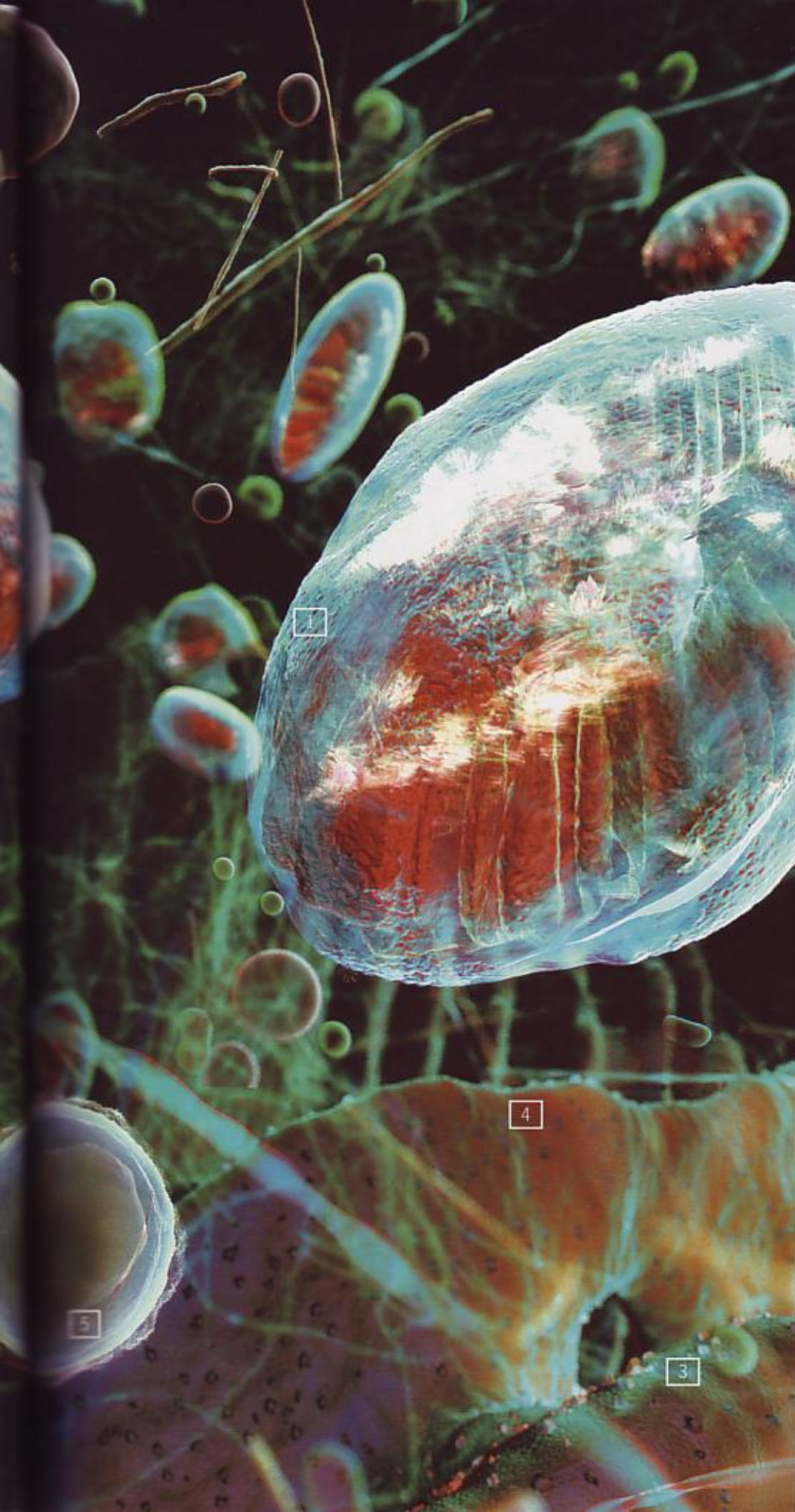
2

Eines Abends im Oktober 1838 sitzen Theodor Schwann, Assistent am Berliner Anatomischen Museum, und der Naturwissenschaftler Matthias Jakob Schleiden zusammen beim Essen. Schleiden schildert dem Kollegen seine jüngste Theorie: Eine Pflanze bestehe aus einem Aggregat einzelner in sich geschlossener Gebilde, aus „Zellen“; und sie vermehre ihre Masse, indem sich an die vorhandenen immer neue Zellen anlegten.

Nach Schleidens Beschreibung sehen diese Pflanzenzellen anscheinend genauso aus wie jenes tierische Nervengewebe, das Schwann in jenen Tagen gerade unter dem Mikroskop beobachtet hat. Sofort nach Tisch eilen die beiden Forscher in Schwanns Labor, die Vermutung bestätigt sich und wird zum Ausgangspunkt einer „Zelltheorie des Lebens“.

Bereits knapp 200 Jahre zuvor, 1665, waren dem Engländer Robert Hooke in einem Stück Kork unter dem Mikroskop kleine wabenförmige Kämmerchen aufgefallen. Er nannte sie „cellulae“ – erkannte allerdings nicht deren Bedeutung. Und ungefähr zur gleichen Zeit hatte der Londoner Arzt William Harvey, der Entdecker des Blutkreislaufs (siehe Seite 74), ebenfalls einen Beitrag zur Enträtselung des Lebens geleistet, indem er formulierte: „Omnia ex ovo“ – „Alles stammt aus dem Ei.“ Der Berliner Mediziner Rudolf Virchow präziserte 1855 schließlich die Vorstellung von der Kontinuität des Lebens mit dem Satz: „Omnis cellula e cellula“ – „Jede Zelle entsteht aus einer Zelle.“

Der Stand des Wissens war damals bereits: Der menschliche Organismus beginnt als einzelne befruchtete Eizelle und wächst zu einer riesigen Ansammlung höchst unterschiedlicher Zellen heran – Schätzungen zufolge



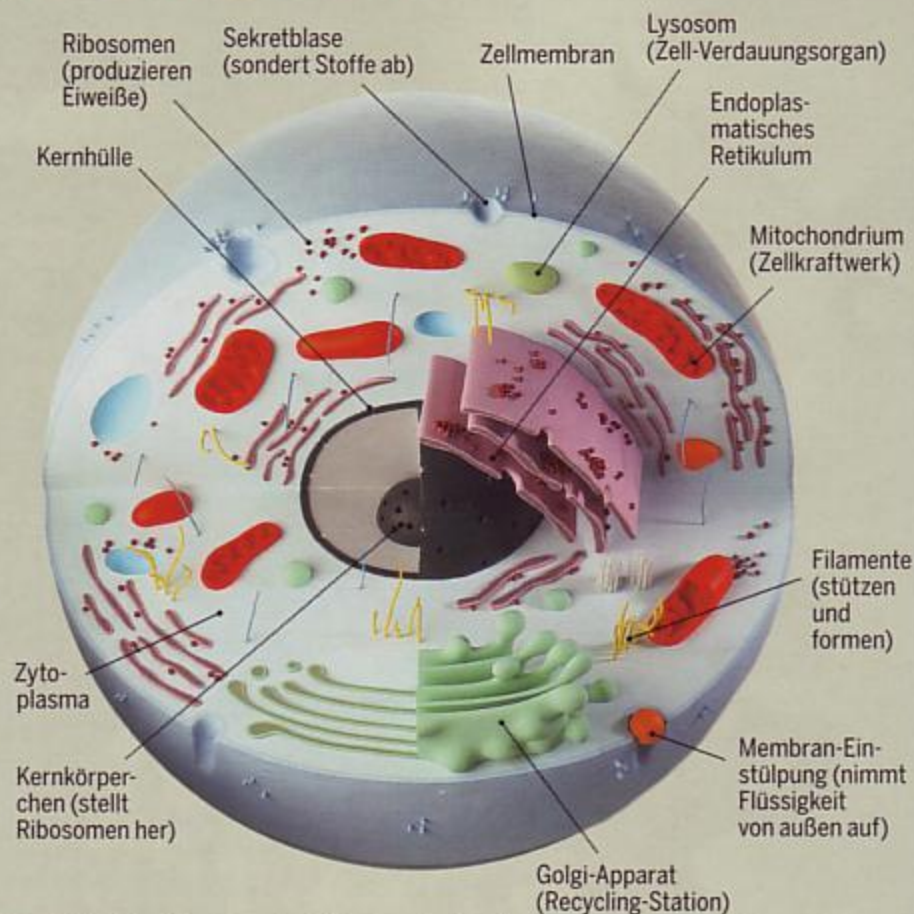
Eine Minifabrik, die alles kann

Vom Grundaufbau her sind alle rund 200 Zellvarianten im menschlichen Körper gleich. Und jede – ob sie in Leber, Haut oder Hirn vorkommt – ähnelt einer Fabrik mit extremer „Fertigungstiefe“. Denn außer der Aufnahme von Rohstoffen aus dem Blutkreislauf über die Zellmembran – etwa Zucker, Sauerstoff und manche **Aminosäuren** – stellt sie alles für ihre Produktionsziele, ihren Betrieb, ihre Renovierung und sogar ihren Neubau Notwendige selbst her. Ihre dazu nötigen Werkzeuge sind die **Organellen**; das sind Miniatur-Organen, die im Kleinen Ähnliches leisten wie Gehirn, Leber, Magen oder Niere im Großen.

Die Steuerzentrale dieses Unternehmens ist der **Zellkern**. Er nimmt etwa ein Zehntel des sonst vom **Zytoplasma** – den übrigen Organellen und einer wässrigen Grundsubstanz – ausgefüllten Zellvolumens ein und enthält eine gigantische Bibliothek: die bis zu zwei Meter lange Kette aus Desoxyribonukleinsäure (DNS), auf welcher der allergrößte Teil der Erbinformationen gespeichert ist (siehe Seite 28). Unter anderem auch die Baupläne für Abertausende unterschiedlicher **Proteine** – Eiweiße, die nicht nur der hauptsächlichliche Baustoff einer jeglichen Zelle sind, sondern ihr auch als Werkzeug dienen, indem sie als **Enzyme** unter anderem deren Stoffwechsel regulieren.

Für die Herstellung eines bestimmten Proteinmoleküls wird von dessen Bauplan zunächst eine Abschrift angefertigt, die so genannte **mRNA**. Sie gelangt durch Poren in der Kernhülle zu den im Zytoplasma angesiedelten **Ribosomen**, den Proteinwerkstätten, und veranlasst diese, das betreffende Proteinmolekül Schritt für Schritt aus entweder aufgenommenen oder von der Zelle selbst produzierten Aminosäuren zu fertigen.

Die Energie für diesen wie auch für alle anderen Prozesse in der Zelle liefern die **Mitochondrien**. Das sind Zellorganellen mit eigener Erbsubstanz, die Abbau-Produkte von Zucker, Fetten und Proteinen mithilfe von Sauerstoff „verbrennen“ und



Eine Zelle ist voll gepfropft mit biochemischer Hochtechnologie. Damit kann sie aus wenigen Rohstoffen alles herstellen, was sie zu ihrer Existenz benötigt

dabei **ATP** erzeugen, den universellen Kraftstoff der Zellen.

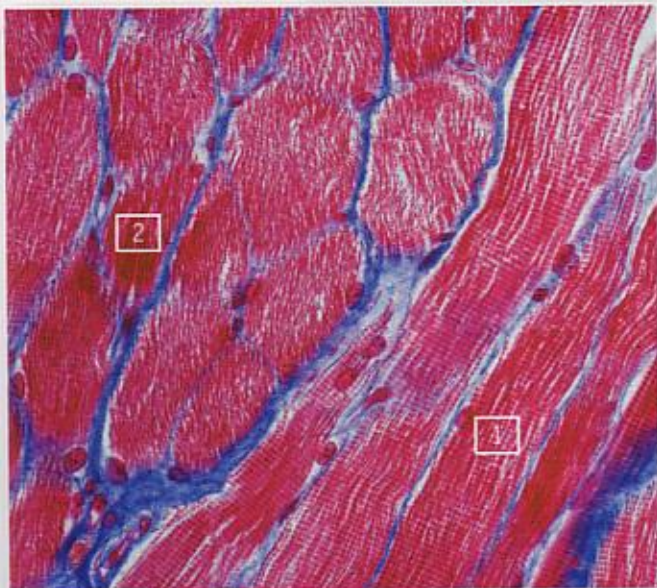
Das fertige Proteinmolekül wird nun aus den Ribosomen entweder in das Zytoplasma oder in das **Endoplasmatische Retikulum** (ER) entlassen. Dieses Membransystem, ein Labyrinth aus Kanälen und Zisternen, durchzieht einen Großteil der Zelle und ist die Produktionsstätte für Makromoleküle.

Hier werden aus den von den Ribosomen gelieferten Proteinmolekülen komplexe Proteine gefertigt, Kohlenhydrate umgebaut, manche **Hormone** hergestellt (siehe Seite 118) sowie **Lipide** (Fette und fettähnliche Substanzen) synthetisiert, aus denen sich alle Membranen der Zelle, auch deren Hülle, zusammensetzen. Außerdem baut das ER von außen aufgenommene Zellgifte wie Alkohol oder Koffein in unschädliche Bestandteile um.

Alle Moleküle, die das Endoplasmatische Retikulum erzeugt hat und die für die Organellen, aber auch für andere Zellen irgendwo im Körper bestimmt sind, verpackt es in Transportbläschen, die sich dann wie Seifenblasen von ihm abschnüren und zum **Golgi-Apparat** bewegen. In dieser Umschlag- und Recyclingstation der Zelle werden die Zellprodukte sortiert und adressiert, sodann erneut in Transportvehikel verpackt und gelangen so zu ihrem Ziel.

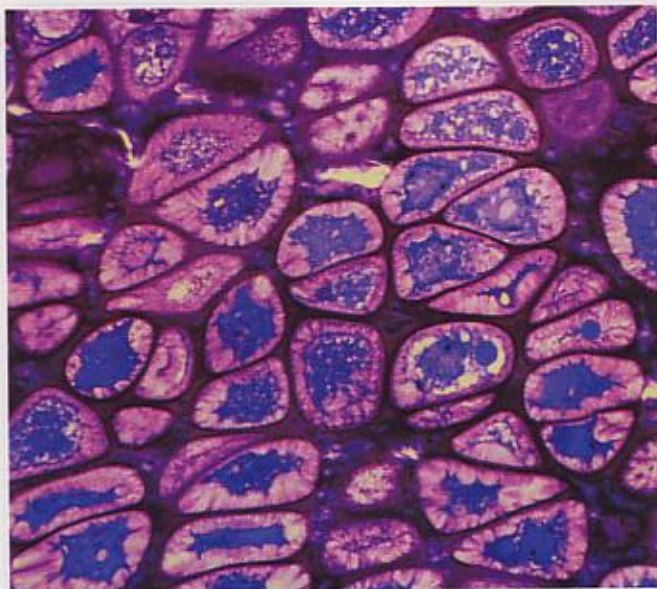
Alles, was die Zelle nicht für ihre Aufgaben braucht – etwa beschädigte Organellen –, wird von den **Lysosomen** verdaut. Diese Membranbläschen, gleichzeitig Magen und Darm der Zelle, lösen den Abfall durch „Verdauungssäfte“ auf, recyceln ihn und machen so vermeintlichen Unrat wieder für den Zellstoffwechsel verfügbar.

Kirsten Milhahn



Muskelzellen

Quergestreiftes Muskelgewebe besteht aus Bündeln von Muskelfasern (im Bild teils längs [1], teils quer [2] angeschnitten). Sie enthalten zahlreiche Myofibrillen, die sich zusammenziehen können (siehe Seite 52)



Knorpelzellen

Binde- und Stützgewebe geben als Knorpel und Knochen Halt, verbinden Gewebe oder betten Organe ein (blau = Knorpelzellen, violett = Matrix: Material, das die Zellen um sich herum abgesondert haben)

bis zu 100 Billionen und – wie wir heute wissen – in mehr als 200 Varianten.

Diese Differenzierung hat allerdings ihren Preis: Abgesehen von Ei- und Samenzellen – die dank ihrer Fähigkeit, einen Embryo zu bilden, quasi ewig leben –, müssen alle Zellen, aus denen der Körper sich aufbaut und die dessen Funktionen ermöglichen, früher oder später sterben (siehe GEO kompakt Nr. 1, Seite 130).

Rund 50 Millionen Körperzellen gehen Sekunde für Sekunde zugrunde, aber ebenso viele entstehen auch durch Teilung vorhandener Zellen – in Gewicht bemessen, bis zu 200 Gramm pro Tag.

Manche Zellen ereilt das Ende schnell: So existieren die in der Schleimhaut des Dünndarms etwa nur drei bis fünf Tage, die in der Haut im Schnitt 19 Tage, die in der Leber rund sieben Monate. Manche weiße Blutkörperchen überdauern hingegen mehrere Jahre, Knochenzellen sogar 25 bis 30

Jahre. Nervenzellen begleiten uns sogar das ganze Leben.

Die massereichsten Zellen sind die Eizellen mit 100 bis 120 Mikrometer (Millionstel-meter), die kleinsten die Spermien mit drei bis fünf Mikrometer Durchmesser. Und die Fortsätze mancher Nervenzellen werden mehr als einen Meter lang.

Auch die Vielfalt an Formen und Funktionen ist enorm: So sind Nervenzellen für ihre spezielle Aufgabe, die Informationsübertragung, mit Membranen ausgestattet, die Erregungen elektrisch leiten (siehe Seite 98). Muskelzellen dagegen enthalten Strukturen, die sich teleskopartig ineinander schieben (siehe Seite 52).

Knochenzellen scheiden um sich herum eine spezielle Molekülschicht ab, in die sie Mineralien und Eiweißfasern einlagern, um dem Knochen Festigkeit zu verleihen. In Le-

berzellen finden sich spezielle Proteine, die zum Beispiel Schadstoffe inaktivieren. Rote Blutkörperchen besitzen keinen Zellkern, sind dafür voll gestopft mit dem Sauerstoff transportierenden Molekül Hämoglobin (siehe Seite 70).

Jede der mehr als 200 Zellarten des Menschen unterscheidet sich in vielen Einzelheiten – ihren Strukturen oder biochemischen Funktionen – von den anderen, und nur so können sie gemeinsam einen komplexen Körper formen.

Dabei besitzen die Zellen mit wenigen Ausnahmen exakt das gleiche Erbgut. Dass sie sich trotzdem so vielfältig ausbilden, liegt an einer komplizierten Regulation. Sie bewirkt, dass in den einen Zellen andere Gene (siehe Seite 28) an- und abgeschaltet werden als in anderen – und damit die Ausstattung der Zellen mit Proteinen (Eiweißen) variiert.

Schon in der Eizelle sind Signalstoffe, so genannte **Transkriptionsfaktoren**, ungleich verteilt, die festlegen, wo im späteren Organismus „oben“ und „unten“, wo „vorn“ und „hinten“ werden soll (siehe Seite 22). Diese Stoffe aktivieren Kaskaden von weiteren Genen, die im Verlauf immer neuer Zellteilungen unterschiedliche Eiweiße produzieren. Ergebnis sind Zellen mit speziellen Funktionen oder von spezieller Gestalt, aus denen sich Organe formen.

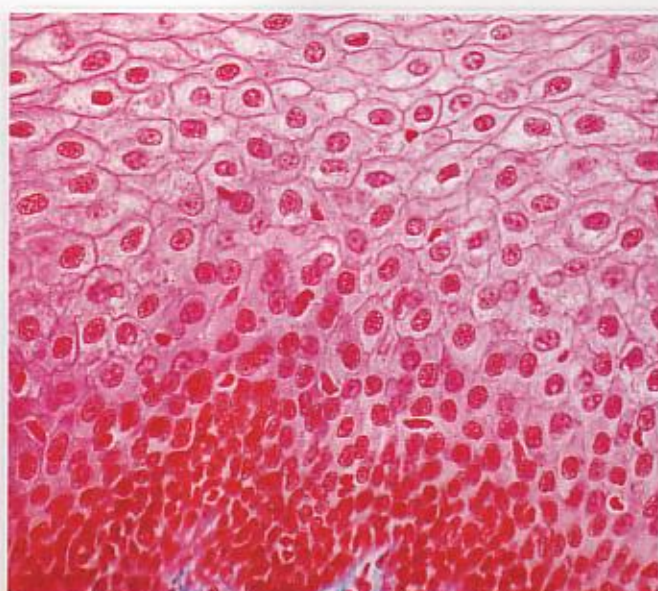
Dabei schließen sich Zellen gleicher Funktion und Bauart zunächst zu **Geweben** zusammen. Gewissermaßen deren Rahmen bildet die extrazelluläre Matrix, ein komplexes Netz von Zellprodukten wie Proteinen oder Zuckern, die über die Zellmembranen nach außen abgegeben werden und sich zwischen den Zellen anlagern. Viele Kontaktstellen verknüpfen – beispielsweise über spezielle **Adhäsionsmoleküle** – die Zellen untereinander und auch die Zellen mit der Matrix. Dieses enge

Nur dank der großen Zellenvielfalt ist ein komplexer Körper möglich



Nervenzellen

Nervenfasern – hier ein einzelnes »Neuron« – sorgen für elektrische Kommunikation im Körper. Informationen empfangen und senden sie über die Zellfortsätze, die Dendriten und Axone (siehe Seite 98)



Epithelzellen

Epithelgewebe, wie diese Zellen einer Lippe, bedeckt außen den Körper oder kleidet innere Hohlräume aus. Es kann weich sein wie die Mundschleimhaut oder hart wie ein Fingernagel (siehe Seite 124)

Netz sorgt für Festigkeit oder Elastizität eines Gewebeverbundes und schafft vielfach auch erst die Voraussetzungen dafür, dass Zellen überhaupt miteinander kommunizieren können.

Es gibt vier Grundtypen von Geweben mit Zellen ähnlicher Funktion:

- Epithelgewebe, das die Oberfläche des Körpers oder die von Organen bedeckt, innere Hohlräume auskleidet und dabei Schutz- und Stoffwechselfunktionen übernimmt;
- Binde- und Stützgewebe, aus denen sich die Struktur des Körpers aufbaut (zum Beispiel Sehnen, Knochen oder Knorpel), das aber auch Vorräte speichert (Fettgewebe);
- Muskelgewebe, das für Bewegungen zuständig ist;
- Nervengewebe, das Informationen weiterleitet und verarbeitet.

Mehrere solcher Gewebe bilden ein **Organ**. So besteht das Herz aus einer mächtigen Schicht Muskelgewebe, die innen mit Epithel- und mit einer Lage aus lockerem Bindege-

webe ausgekleidet ist. Außen wird es von zwei Häuten ebenfalls aus Epithelgewebe, dem Herzbeutel, umschlossen.

Auch während die Organe in Funktion sind, teilen sich viele Zellen unablässig, während andere absterben: Zellen der Haut- oder Darmoberfläche zum Beispiel werden ständig abgestoßen und erneuert, Immunzellen „opfern sich“ bei der Bekämpfung von Krankheitserregern (siehe Seite 132), alternde, beschädigte oder nicht mehr benötigte Zellen werden abgebaut.

Eine zentrale Rolle spielt dabei der zelluläre „Selbstmord“, die **Apoptose**. Auf bestimmte äußere oder innere molekulare Signale hin – etwa dass eine Zelle ihr genetisch vorgesehenes Alter erreicht hat – läuft ein Programm ab, das abbauende Enzyme in der

Zelle aktiviert, welche die Zelle binnen Stunden schrumpfen und zerfallen lassen.

Ein Organismus ist so lange gesund und funktionsfähig, wie die Zahl der sterbenden, wie die Zahl der entstehenden Zellen etwa entspricht. Ein Ungleichgewicht kann zu Erkrankungen wie Krebs führen.

Auch wenn das „Selbstmordprogramm“ einzelne nicht mehr funktionstüchtige Zellen eliminiert, um so Platz zu schaffen für neue, kann der Körper nicht verhindern, dass seine Zellen, auch die regelmäßig erneuerten, im Lauf des Lebens insgesamt altern.

Manche Forscher vermuten, dass so genannte **freie Radikale** dabei eine Schlüsselrolle spielen. Diese aggressiven chemischen Substanzen entstehen vor al-

lem, wenn die Zelle Nährstoffe in chemische Energie umwandelt – und schädigen unter anderem die Erbsubstanz. Die Folge: Eiweiße werden nicht mehr in der erforderlichen Menge oder Beschaffenheit hergestellt, die Zellen erfüllen ihre Funktion nicht mehr optimal, das biochemische Gleichgewicht ist verschoben. Damit wird auch die Leistungsfähigkeit von Geweben und Organen beeinträchtigt – und irgendwann stirbt der Mensch an Herz-Kreislauf-Ver-sagen, Schlaganfall, anderen Organschwächen oder Krebs.

Immerhin: Zumindest im Labor lässt sich die Lebenszeit von Versuchstieren durch eine kalorienarme Ernährung, die weniger freie Radikale ins Spiel bringt, deutlich verlängern. Theoretisch ließe sich daraus schließen, dass ein Mensch, bei entsprechender Lebensweise, mindestens 120 Jahre alt werden kann. □

**Der Körper wächst und gedeiht,
weil ein »Selbstmordprogramm« die
Zellen sterben lässt**

Wissenschaftliche Beratung:
Dr. Kirsten Lauber,
Medizinische Klinik der Eberhard-
Karls-Universität Tübingen.



Die Stütze des Systems

Labil und doch statisch raffiniert ausgewogen, verleiht das Skelett dem Organismus des Menschen Halt. Dynamisch passt sich die Konstruktion aus Knochen, Bändern und Gelenken wechselnden Belastungen an. Und nur mit ihr gelang der Evolutionssprung zum aufrechten Gang

Text: Henning Engeln



Aufrecht in der Welt. Lange Beine, ausladendes Becken und eine mit Knorpel (rot) gepufferte Wirbelsäule – notwendige Voraussetzungen für ein Leben als Zweibeiner

Im September 2004 veröffentlichte ein französisch-amerikanisches Forscherteam eine Arbeit, in der ein ungewöhnliches Objekt abgebildet war: der obere Teil eines Oberschenkelknochens, der etwa so groß war wie der eines Schimpansen. Allerdings war das Individuum, dem dieser Oberschenkelknochen einst gehört hatte, kein Affe mit vierfüßiger Fortbewegung, sondern es lief aufrecht auf zwei Beinen. Und es lebte bereits vor sechs Millionen Jahren.

Bekannt geworden waren jene in Kenia ausgegrabenen

Fossilien unter dem Namen „Millennium Man“. Die Vermutung, das Wesen habe sich zweibeinig bewegt, konnte jetzt durch die Computertomographie bestätigt werden.

Immer deutlicher wird, dass der aufrechte Gang der erste und entscheidende Schritt war, mit dem die Menschenaffen aus der Reihe ihrer äffischen Vorfahren getrennt sind. Zwar streiten die Forscher sich noch immer darüber, in welcher Umwelt die neue Fortbewegungsweise entstanden ist (am Rande dichter Wälder?), wie genau (durch aufrechtes Laufen von einer Baumgruppe

zur nächsten?) und weshalb (weil sich dann Dinge besser mit den Händen transportieren ließen?).

In jedem Fall aber muss sie einen deutlichen Vorteil geboten haben. Denn die zur Aufrichtung des Skeletts erforderlichen Konstruktionsänderungen waren nur durch die Inkaufnahme mancher Nachteile zu haben. Einen gravierenden Wandel machte insbesondere das Becken durch. Gegenüber dem eines Affen ist es deutlich verkürzt: Der Abstand zwischen der Gelenkpfanne, in welcher der Oberschenkelknochen sitzt, und dem Kreuzbein – dem unteren Teil der Wirbelsäule – ist geschrumpft.

Die Folge ist eine Verengung des Geburtskanals, die bei den ersten aufrecht gehenden Affenmenschen mit ihren kleinen Gehirnen in kleinen Schädeln kein Problem war. Für die heutigen Babys mit

vorn gebogen und bildet eine schalenförmige Struktur. Sowohl innen als auch außen setzen an der Darmbeinschaukel mächtige Muskeln an, die zum Oberschenkelknochen verlaufen, ihn stabilisieren und für dessen Bewegung notwendig sind.

Immens ausgeprägt müssen jene Muskeln am Darmbein auch deshalb sein, weil enorme Kräfte auf das Hüftgelenk wirken. Denn während sich das Körpergewicht bei einem Vierfüßer relativ gleichmäßig verteilt und bei dessen Gang zumeist mindestens zwei Beine gleichzeitig den Körper stützen, lastet beim Gang eines Menschen dessen volles Körpergewicht abwechselnd auf nur einem Bein.

Überdies müssen, weil das Becken im Einbeinstand abzukippen droht, die Muskeln zwischen Hüfte und Standbein einen kräftigen Zug ausüben. Insgesamt drückt deshalb auf

Der aufrechte Gang brachte für den Menschen manchen Nachteil

ihren vergleichsweise riesigen Köpfen – und für deren Mütter – ist die Geburt jedoch ein extrem strapaziöser, nicht selten gefährlicher Kraftakt, bei dem der Schädel arg verformt werden muss, um überhaupt durch die enge Öffnung zu gelangen.

Auch die Form des Darmbeins – jenes ausladenden Teils des Beckens, dessen Rand sich gut an der Hüfte erfüllen lässt – ist eine Folge der Fortbewegung auf zwei Beinen. Es ist beim Menschen nach

das Hüftgelenk bei jedem Schritt eine Last, die rund dem Dreifachen des Körpergewichtes entspricht, und macht es anfällig für Verschleiß.

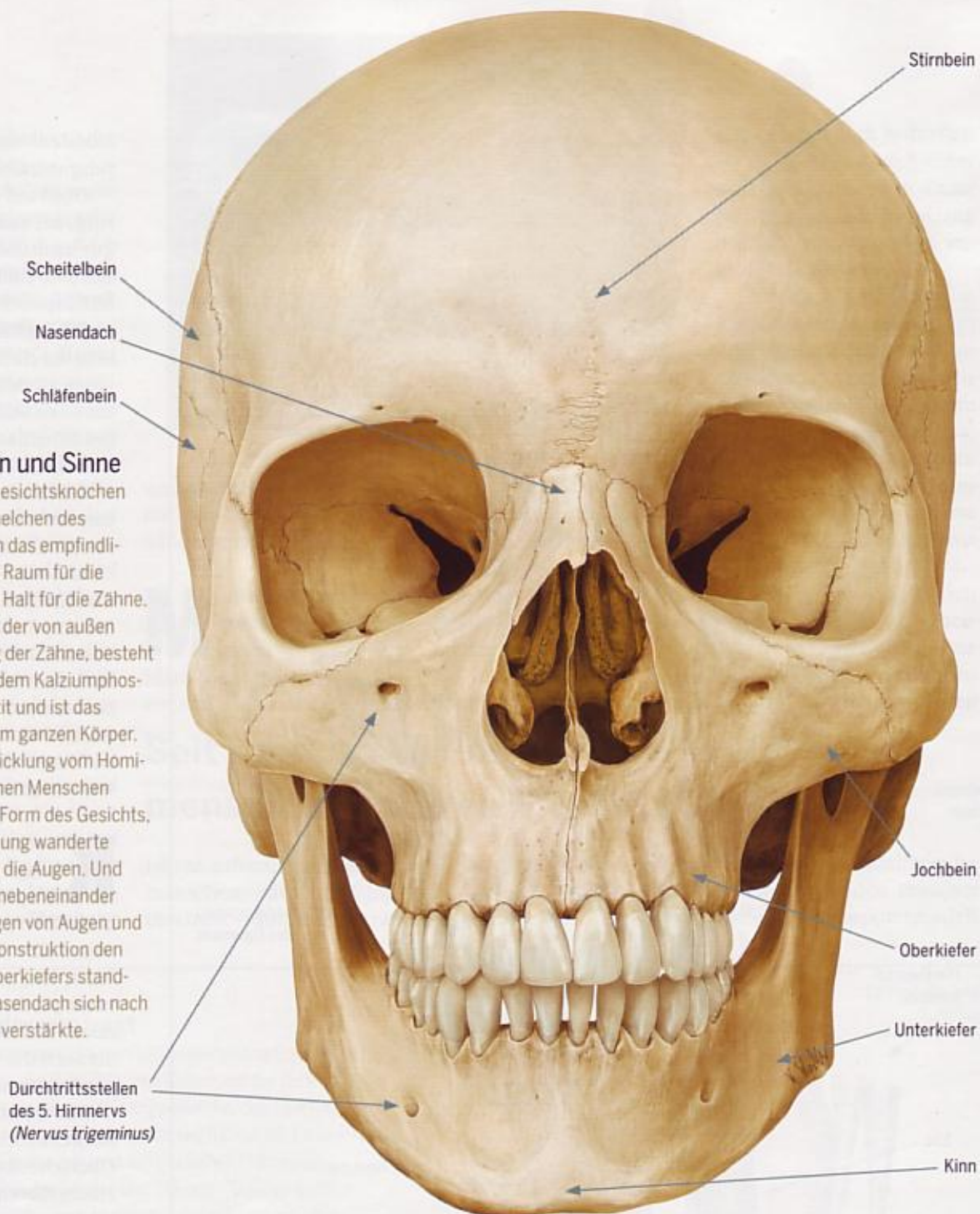
Die Beine mussten sich ebenfalls dem aufrechten Gang anpassen. Die Oberschenkel verlaufen nunmehr vom breiten Becken aus in schrägem Winkel zu den eng nebeneinander liegenden Knien. Von dort führen die Unterschenkel senkrecht zu den Füßen, die sich beim



Fortschritte. Menschenaffen – links das Skelett eines Gorillas – haben ein schmales langes Becken, kurze O-förmige Beine und lange Arme, sodass der Schwerpunkt ihres Körpers bei aufrechter Haltung weit vorn liegt. Beim Menschen dagegen bilden Schädel, S-förmige Wirbelsäule, das kurze, breite Becken und die direkt darunter angeordneten Y-förmigen Beine eine senkrechte Achse, die das Körpergewicht wie eine Säule stützt und kraftsparend auf die Füße überträgt.

Kapsel für Hirn und Sinne

Die 8 Gehirn-, 15 Gesichtsknochen und 6 Gehörknöchelchen des Schädels schützen das empfindliche Gehirn, bieten Raum für die Sinnesorgane und Halt für die Zähne. Der Zahnschmelz, der von außen sichtbare Überzug der Zähne, besteht überwiegend aus dem Kalziumphosphat Hydroxylapatit und ist das härteste Material im ganzen Körper. Im Laufe der Entwicklung vom Hominiden zum modernen Menschen verkürzte sich die Form des Gesichts, und die Nasenöffnung wanderte hoch bis zwischen die Augen. Und trotz der nun drei nebeneinander liegenden Öffnungen von Augen und Nase konnte die Konstruktion den Kaukräften des Oberkiefers standhalten, weil das Nasendach sich nach vorn bewegte und verstärkte.

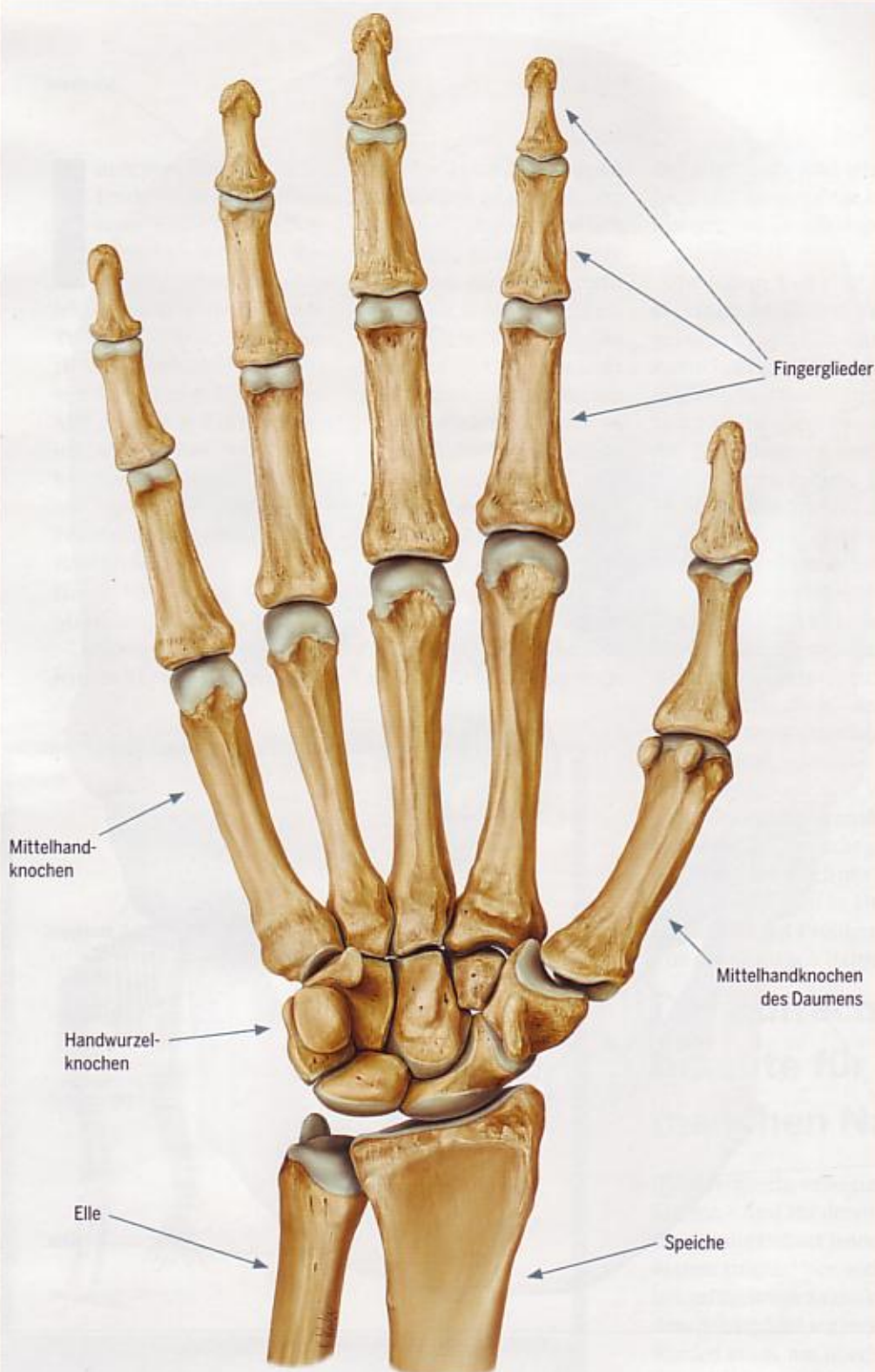


Stehen somit genau unter dem Schwerpunkt des Körpers befinden und ihn wie Säulen stützen. Typisch für den Menschen ist deshalb, dass seine Beine, von vorn gesehen, ein Y bilden, während Schimpansen ausgeprägte O-Beine haben.

Auch hat der Menschenfuß kürzere Zehen als der eines Schimpansen – und er kann auch den großen Zeh nicht abspreizen. Zudem ist das Fußgewölbe, das Menschen vermutlich dazu dient, den Fuß beim Gehen abzufedern, bei Affen viel flacher.

Anders als die äffische krümmt sich die menschliche Wirbelsäule charakteristisch in Form eines doppelten S. Offenbar ist das Folge der mechanischen Beanspruchung des Körpers durch die aufrechte Körperhaltung und nicht durch **Erbfaktoren** bedingt,

also evolutionär entwickelt. Denn das Doppel-S fehlt sowohl bei Babys, die noch nicht laufen, als auch bei Behinderten, die nie haben gehen können. Umgekehrt krümmt sich im Lendenbereich auch die Wirbelsäule von Affen, denen Schausteller in Japan eine



Das Werkzeug der Werkzeugmacher

Mit der Hand begann der Mensch, dank der Steuerung durch ein immer höher entwickeltes Gehirn, Werkzeuge herzustellen, seine Umwelt zu gestalten, und hob sich dadurch von den Tieren ab. Er kann den Daumen abspitzen und mit den Fingern zum so genannten „Präzisionsgriff“ schließen. Die Muskeln, die mithilfe von Sehnen die Finger bewegen, liegen überwiegend im Unterarm, denn eine mit Muskeln bepäckte Hand wäre unförmig und kaum als filigranes Werkzeug zu gebrauchen. Auch die Handgelenke sind dank dieser Konstruktion schlank und beweglich.

stundenlange aufrechte Haltung antrainiert haben.

Oben auf der Wirbelsäule ruht, bei aufrechter Haltung gut ausbalanciert, der Kopf. Deshalb findet sich das Hinterhauptloch – also die Stelle, an der das Rückenmark in den Schädel eintritt – beim Menschen ziemlich mittig darunter. Beim Schimpansen hingegen öffnet das Hinterhauptloch sich schräg nach hinten.

Die einzelnen Teile des menschlichen Schädels gehören zu den so genannten flachen oder platten Knochen und umschließen schützend das empfindliche Gehirn. Neben diesen besteht das Skelett aus langen Knochen (Arm, Bein), aus kurzen (Handwurzel), aus unregelmäßigen (Wirbel) sowie aus lufthaltigen (Oberkiefer) – insgesamt rund 200.

Knochen stützen allerdings nicht nur den Körper, sie dienen ihm auch als wichtige Speicher für Minerale wie Kalzium und Phosphat, und das **Knochenmark** produziert Zellen, aus denen sich sowohl die roten als auch die weißen Blutkörperchen entwickeln.

Ein typischer Lang- oder Röhrenknochen, etwa der des Oberschenkels, besteht aus einem röhrenförmigen Schaft und zwei verdickten Enden, alles umhüllt von einer Knochenhaut. Doch obwohl diese Enden sehr massiv wirken, sind die Knochen Leichtgewichtskonstruktionen. Ihre Struktur erinnert an die eines Schwamms: Sie setzt sich aus vielen winzigen Balken zusammen, die so ausgerichtet sind, dass sie Zug- und Druckkräfte optimal weiterleiten

und der Konstruktion große Stabilität verleihen.

Zusammengehalten, stabilisiert und bewegt werden die einzelnen Knochen durch Gelenke, Bänder, Muskeln, und Sehnen. Das größte **Gelenk** ist das Kniegelenk – ein so genanntes „echtes“. Damit die aufeinander treffenden, frei beweglichen Knochenenden gut gleiten, sind sie mit glattem **Knorpel** bedeckt. Demgegenüber sind „unechte“ Gelenke wie die zwischen den Wirbelkörpern durch Gewebe miteinander verbunden und lassen sich nur eingeschränkt bewegen.

Den Spalt zwischen den Knochen im Gelenk füllt die Synovialflüssigkeit, eine Schmiersubstanz, die sich unablässig erneuert. Sie enthält Nährstoffe für den Knorpel sowie Fresszellen, die eingedrungene Bakterien und den ständig anfallenden Knochenabrieb beseitigen. Umgeben ist alles von einer **Membran**

und einer Gelenkkapsel aus faserigem Gewebe, das kräftige Bänder verstärken.

Mit Kniegelenken, die bereits ähnlich gebaut waren wie die des Menschen heute, stapften vor mehr als vier Millionen

nen Afrikas. Doch ihr Gehirn war kaum größer als das eines Schimpansen. Erst vor 2,5 Millionen Jahren nahmen die Größe des Gehirns und das Schädelvolumen stärker zu.

Diese größere Hirnkapazität befähigte die Urmenschen,

viel änderte, doch bedurften sie zu diesem Zweck einer subtileren Steuerung dieser Gliedmaßen. Und das gelang mithilfe des nunmehr vergrößerten Gehirns.

Die Folge: Anders als das Körperskelett, das bereits vor 1,5 Millionen Jahren weitgehend dem des heutigen Menschen entsprach und unsere in den Weiten der Savanne nach Aas suchenden Vorfahren zu ausdauernden Marathonläufern machte, veränderte sich der menschliche Kopf anatomisch noch erheblich.

Nach Auffassung Ulrich Witzels und Holger Preuschofts von der Ruhr-Universität Bochum haben vor allem funktionelle Änderungen den



Schädelkunde. Ein kräftigeres Gebiss, mächtige Überaugenwülste – und ein kleineres Gehirn unterscheiden den Schimpansen (links) vom Menschen.

Seit rund 1,5 Millionen Jahren hat sich am menschlichen Skelett nicht viel geändert

Jahren aufrecht gehende Vorfahren – die Australopithecinen – durch die Savan-

Steinwerkzeuge herzustellen. Dazu gebrauchten sie die Hände, was zwar an diesen nicht

Wandel der Schädelform bewirkt. Die beiden Forscher haben ein Computermodell

Ein Gewölbe, das uns trägt

Beim Gehen rollt der menschliche Fuß, beginnend mit der Ferse, über die Außenseite der Fußsohle, den Ballen und die Zehen ab. Typisch für ihn ist sein Quer- und Längsgewölbe, das beim nur selten aufrecht gehenden Schimpansen viel flacher ist: Es federt vermutlich den Gang ab und wirkt auf unebenen Flächen als Stoßdämpfer. Zahlreiche Bänder und Sehnen – die hier sichtbar führen zu den Fußbeuger-Muskeln – stützen und erhalten die Wölbungen. Sind Muskeln und Sehnen geschwächt, können sie jedoch einsinken, was zum Platt-, Senk- oder Spreizfuß führt.





Leichtbaukonstruktion

Ein Oberschenkelknochen („Röhrenknochen“) bietet größte Stabilität bei geringstem Materialaufwand. Der

Schaft besteht aus einer Röhre mit massiver Wand und einem Hohlraum, der gelbes, fettreiches Knochenmark enthält.

Das massiv wirkende Kopfende des Knochens ist innen aus einer schwammartigen Substanz aufgebaut. Balkenähnliche Strukturen darin (kleines, per Rasterelektronenmikroskop aufgenommenes Bild) fangen die Kräfte auf, sodass der Knochen trotz seiner geringen Masse extrem stabil ist. In Hohlräumen zwischen den Balkchen liegt das rote Knochenmark, in dem sich die Zellen des Blut- und Immunsystems bilden.

entwickelt, das alle Kräfte und Belastungen mathematisch erfasst und berücksichtigt, die durch Kaumuskeln und Zähne auf den Schädelknochen ausgeübt werden.

Wo immer ein Knochen belastet wird, baut er zusätzliche Substanz auf; wo keine Kräfte wirken, bildet er sich dagegen zurück. Das gilt auch für den Schädel und ist zunächst eine rein physiologische Anpassung des Knochens an die mindere Beanspruchung. Doch im

Verlauf von Jahrtausenden dürften auch genetische Veränderungen erfolgt sein. Da der Mensch mit der Zeit mehr und mehr Werkzeuge nutzte und seine Nahrung briet oder kochte, brauchte er zu deren Zerkleinerung immer weniger Kraft im Gebiss.

In einem Wechselspiel zwischen veränderter Umwelt und genetischer Anlage schrumpften die Kaumuskeln und benötigten keine Verankerung mehr in den stark aus-

gebildeten Überaugenwülsten wie früher. Für die Statik reichte jetzt die steilere Stellung des Stirnbeins infolge des enormen Hirnwachstums.

Kiefer und Gesicht wurden kürzer, die knöcherne Nasenöffnung rutschte zwischen die Augen, sodass sich dort eine Verstärkung der Knochensubstanz ausbildete: das vorspringende Nasendach des Men-

Die Tendenz, dass Menschen immer größer werden, ist seit einigen Jahrhunderten zu beobachten. Als Gründe vermuten manche Forscher die immer besser gewordene Ernährung sowie ein komplexes Zusammenspiel von Faktoren der modernen Lebensumstände.

Leichter zu prognostizieren ist Witzel zufolge die Entwick-

Durch das Hand-Werk ist der Mensch allmählich menschlicher geworden

schens. Damit andererseits die Kaubelastung des geschrumpften Unterkieferknochens ertragen werden konnte, entwickelte sich außerdem als Verstärkung ein vorspringendes Kinn.

All diese typisch menschlichen Charakteristika des Schädels können Witzel und Preuschoft mit ihrem Computermodell erklären – und darüber hinaus auch vorsichtig in die Zukunft blicken. Witzel: „Der zukünftige Mensch wird groß und das ganze Skelett zierlich sein.“

lung des Schädels. Weil seine physische Belastung immer weiter abnehme, werde der *Homo sapiens* in einigen hunderttausend Jahren womöglich einen fast kugelförmigen Schädel und ein flaches Gesicht mit kurzen Kiefern ohne Weisheitszähne ausbilden.

Denn diese Menschen hätten einen Überlebensvorteil, weil sie weniger Knochensubstanz aufbauen müssten und also weniger Nahrung brauchten. Die verkürzten Knochen von Gesicht und Kiefer würden durch ein noch weiter verstärktes Nasendach und ein prominenteres Kinn gestützt.

Voraussetzung wäre aber: Die gegenwärtige Neigung der Menschen zu kaumuskelschonendem Fast Food müsste auch in Zukunft anhalten. □



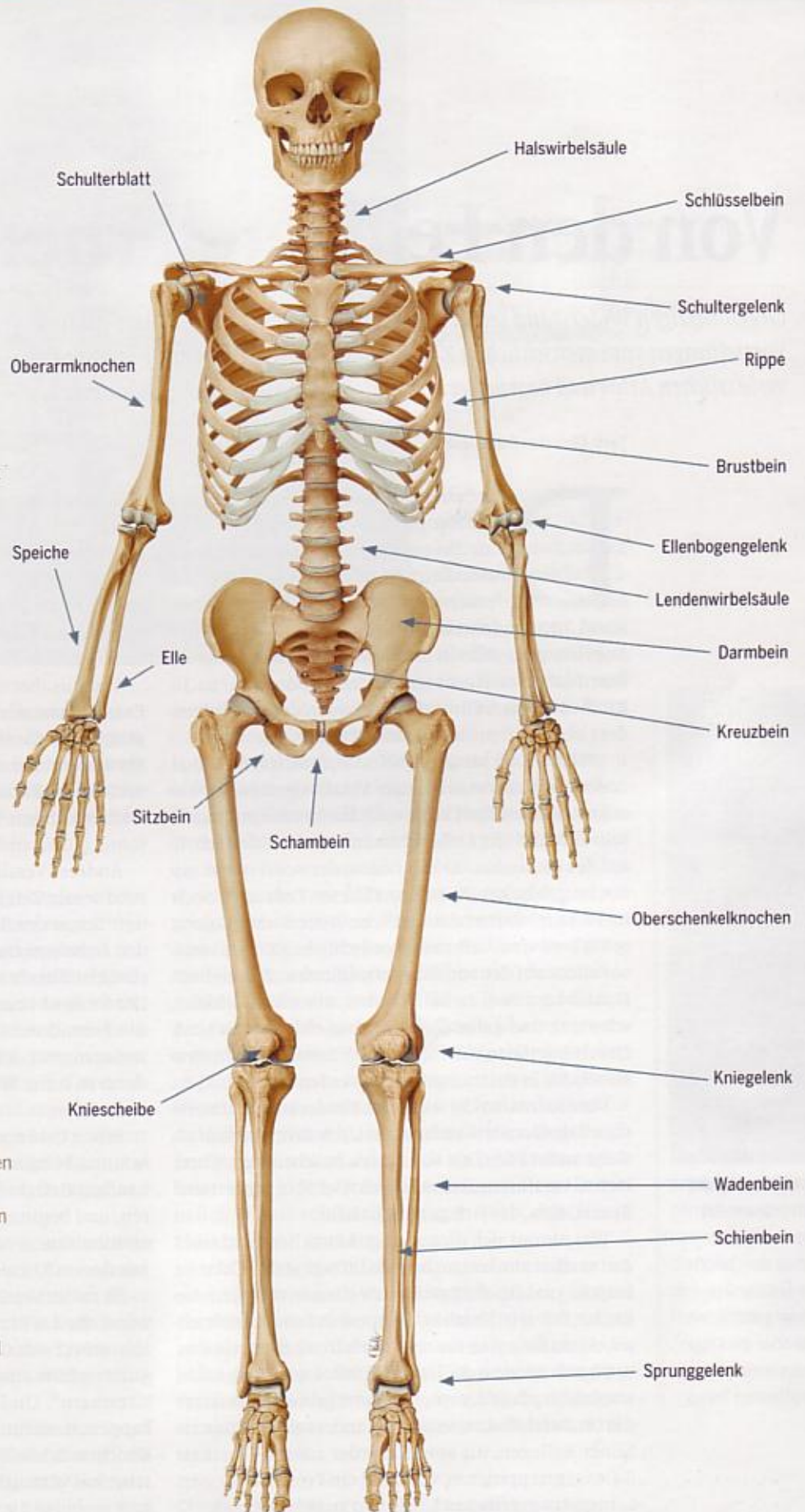
Uralte Zeugnisse. Rund sechs Millionen Jahre alt sind diese in Kenia entdeckten Bruchstücke von Gebeinen eines Vormenschen. Die Form des Oberschenkelknochens (unten) lässt auf einen aufrechten Gang schließen.

Beratung: Prof. Dr. Holger Preuschoft, Institut für Anatomie, Dr. Ulrich Witzel, Forschungsgruppe Biomechanik, beide Ruhr-Universität Bochum.

Die Anatomie-Zeichnungen von Markus Voll und Karl Wesker sind dem LernAtlas Prometheus, Thieme Verlag, entnommen. Weitere Motive: www.geokompakt.de/anatomie

Knochen-Puzzle

Das menschliche Skelett baut sich auf aus rund 200 einzelnen Knochen, die durch Knorpel, Bänder, Sehnen und Muskeln zusammengehalten werden. Sie werden unterschieden in flache Knochen (so die des Schädels, der Rippen, des Brustbeins oder das Schulterblatt), Röhrenknochen (so die an Armen und Beinen), kurze Knochen wie die Handwurzel und unregelmäßige Knochen wie die Wirbel. Der aus Schlüsselbein und Schulterblatt bestehende Schultergürtel ist vor allem über Muskeln und Bänder mit dem Rumpfskelett verankert und daher sehr flexibel. Mit ihm über ein Kugelgelenk – das Schultergelenk – verbunden ist der Oberarmknochen. Diese Konstruktion verleiht dem Arm großen Bewegungsspielraum, ist allerdings anfällig für Verletzungen wie Verrenkungen oder Bänderrisse. Das Bauprinzip des Brustkorbs aus normalerweise zwölf Rippenpaaren erlaubt es dem Körper, über ein Anheben der Rippen mithilfe der Zwischenrippenmuskeln sowie der Zwerchfell-Muskulatur das umschlossene Volumen zu verändern, sodass Luft in die Lunge hineinströmt oder ausgeatmet wird. Wirbelsäule, Hüft- und Kniegelenke sind kräftig ausgebildet, um den Belastungen durch die aufrechte Körperhaltung standhalten zu können. Sie unterliegen allerdings starkem Verschleiß und verursachen im Alter häufig Beschwerden – insbesondere an der Hüfte. Vor dem Kniegelenk, dem größten im Körper, sitzt die Kniescheibe. Sie überträgt beim Strecken des Beines die Muskelkraft über starke Sehnen und Bänder vom Oberschenkel auf den Unterschenkel und hilft Menschen so beim Laufen.



Von den Leichen lernen

Gegen heftigen Widerstand seiner Zeitgenossen bestreitet der Flame Andreas Vesalius antike Vorstellungen vom menschlichen Körper. 1543 veröffentlicht er über dessen Struktur den ersten verlässlichen Atlas und begründet damit die wissenschaftliche Anatomie

Text: Christina Schneider

Die Franziskuskirche in Bologna ist voller Neugieriger. Vor dem Altar wird an diesem Tag, dem 15. Januar 1540, eine Leiche geöffnet – zwei Medizinprofessoren nehmen eine Sektion vor. Rund 200 Studenten, ältere Universitätsmitglieder, Angehörige des Klerus und interessierte Bürger sehen ihnen dabei von eigens errichteten Tribünen aus zu. In Kirchen ist Platz für viele Zuschauer, deshalb finden dort häufig öffentliche Sektionen statt.

Während der jüngere Professor, Andries van Wesel – oder Andreas Vesalius, kurz Vesal, wie er in der wissenschaftlichen Welt heißt –, die Leiche zerlegt, doziert sein ehrwürdiger Kollege Matteo Corti aus den Schriften des römischen Arztes Galen, der von 129 bis 199 n. Chr. gelebt hat. Auf dessen Thesen fußt auch noch im 16. Jahrhundert das ärztliche Wissen – auf Galens 15 Büchern vom Aufbau des menschlichen Körpers und vor allem auf der von ihm propagierten „Säftelehre“. Danach kommt es zu Krankheiten, wenn Blut, Schleim, schwarze und gelbe Galle im Ungleichgewicht sind. Durch Aderlässe, Schröpfen oder Erbrechen können sie wieder in Balance gebracht werden.

Vesalius macht Corti auf eine Entdeckung aufmerksam: Der Gerade Bauchmuskel, der *Rectus abdominis*, sieht anders aus, als von Galen beschrieben. Corti meint, Vesalius müsse sich irren. Der aber protestiert: Es sei Galen, der sich getäuscht habe.

Was nimmt sich dieser junge Mann heraus, dass er den großen antiken Anatomen infrage stellt? Corti ist empört, und etliche Zuschauer verlassen verärgert die Kirche. Dabei ist Vesalius, der sonst in Padua unterrichtet, eigens wegen seiner revolutionären Lehrmethoden von den Studenten der Universität Bologna eingeladen worden. So pflegt der 1514 in Brüssel geborene Professor die Leichen selbst zu sezieren – anders als die meisten seiner Kollegen, die vom Katheder aus die Schriften Galens interpretieren, während ein Prosektor dessen Lehren am geöffneten Leichnam zu belegen sucht.

Um Erkenntnisgewinn durch eigene Beobachtungen geht es dabei nicht, sondern um die Reproduktion überlieferter Lehrmeinungen. Schließlich beantwortet Galens Säftelehre nach Ansicht der Mediziner des 16. Jahrhunderts ja auch die meisten Fragen über den menschlichen Körper. Warum also nach Neuem forschen?

Vesalius aber will selbst sehen, was Galen beschreibt. Er ist so fasziniert vom Aufbau des menschlichen Körpers, dass er das Sezieren nicht anderen überlassen mag. Als Student hat er daheim an der Universität Löwen und an der Pariser Sorbonne nur wenige Sektionen erleben können. Sie sind nicht verboten, aber die Anatomie gilt als nicht sehr angesehene Disziplin.

Andreas Vesalius hat sich zu helfen gewusst. Während seiner Zeit in Löwen trifft er beispielsweise vor den Toren der Stadt auf einen Scheiterhaufen mit den Gebeinen eines Hingerichteten. Vögel haben das restliche Fleisch von den Knochen und Sehnen genagt. Der Student beschließt, sich das Skelett anzueignen. Ein Freund steht Wache, während Vesalius es auseinander nimmt. Stück für Stück trägt er die Knochen dann in seine Wohnung und setzt sie dort wieder zusammen.

Schon bald nach Abschluss seines Studiums erhält Andreas Vesalius in Padua eine Professur. Dort hat er häufiger Gelegenheit, menschliche Körper zu inspizieren, und beginnt, den Schriften Galens immer mehr zu misstrauen – denn was er sieht, stimmt oft nicht mit dessen Thesen überein.

So findet Vesalius keine Poren in der Herzscheidewand, die das Blut hindurchlassen könnten – darauf aber stützt sich Galens Erklärung des Blutkreislaufs. Auch enthält eine Gebärmutter keineswegs „sieben Kammern“. Und weder besteht die Leber aus fünf Lappen, noch findet sich im Inneren des Herzens ein Knochen. Schließlich begreift Vesalius: Der antike Forscher hat vermutlich nur Tiere seziiert und von deren Anatomie auf die des Menschen geschlossen.



Kunstvoll und exakt
zugleich präsentiert Vesalius in seinem Werk etwa das Gefäßsystem des Gehirns unter dem geöffneten Schädel oder die Lage der Innereien in einem geöffneten Torso



Andreas Vesalius oder kurz Vesal alias Andries van Wesel (1514–1564), wie er sich in seinem Werk »Über den Aufbau des menschlichen Körpers« seinen Lesern vorstellt (Holzschnitt des Jan Stephan von Calcar)

Für konservative Gelehrte klingen diese Feststellungen geradezu ketzerisch. Doch der junge Mann bekommt auch Zuspruch und erhält in Padua sogar eine Gehaltserhöhung.

1539 veröffentlicht Vesalius seine „Tabulae anatomicae“. Sie enthalten detaillierte anatomische Zeichnungen entsprechend den bei seinen Sektionen gewonnenen Erkenntnissen und sind ausdrücklich für Medizinstudenten bestimmt – die ersten Lehrtafeln der Anatomie überhaupt.

Offiziell dürfen nur hingerichtete, von der Kirche aus der Gemeinschaft der Gläubigen ausgeschlossene Verbrecher seziiert werden. Dem ehrgeizigen Forscher Vesalius reicht das nicht. In Padua bemüht er sich denn auch um ein gutes Verhältnis zum Strafrichter: Der stellt ihm die Körper Hingerichteter zur Verfügung und macht das Datum einer Exekution mitunter von den Bedürfnissen des Anatomen abhängig. Dennoch verfügt Vesalius über so wenig „Anschauungsmaterial“, dass seine Studenten für ihn Leichname aus Gräbern oder Friedhofskapellen stehlen und er selbst einmal eine Leiche wochenlang in seinem Schlafzimmer aufbewahrt.

1543 veröffentlicht Vesalius seine gesamten neuen Erkenntnisse in seinem Hauptwerk „De humani corporis fabrica libri septem“ („Sieben Bücher über den Aufbau des menschlichen Körpers“). Kunstvolle Holzschnitte, die Knochen, Muskeln, das System der Adern und die Lage der Organe zeigen, sind von ausführlichen Erklärungen begleitet.

Zwei revolutionäre Thesen vertritt Vesalius in seiner „Fabrica“: zum einen, dass Galen nicht mit allem Recht hat. Zum anderen, dass Analogieschlüsse vom Tier auf den Menschen nicht in jedem Fall hinreichen.

der Leber aus im Körper verteilt und dass das Herz ein Anhängsel der Leber sei.

Das erste anatomische Werk, das auf Beobachtungen fußt, wird ein großer Erfolg und in mehrere Sprachen übersetzt. Schon bald kursieren Plagiate in ganz Europa. Für mehr als ein Jahrhundert gibt die „Fabrica“ die Norm für anatomische Abbildungen vor. Bis ins 18. Jahrhundert wird sie wieder und wieder neu aufgelegt. Weitere Pioniere der Anatomie bringen die Forschung voran – so der Engländer William Harvey, der 1628 als Erster den Blutkreislauf korrekt beschreibt.

Vesalius, der die „Fabrica“ Kaiser Karl V. gewidmet hat, bemüht sich gleich nach ihrem Erscheinen um eine Audienz beim Herrscher. Und der bestimmt den 28-Jährigen zum Leibarzt des kaiserlichen Haushalts. Dieses Amt ist unkündbar und bedeutet das Aus für den Forscher Vesalius, der nun im Gefolge Karls durch Europa reisen muss. Aber auch nach Abdankung des Kaisers 1556 bleibt der Arzt dessen Familie treu: Er tritt in den Dienst von Karls einzigem Sohn, dem König Philipp II. von Spanien.

Acht Jahre später macht Andreas Vesalius sich auf zu einer Pilgerreise nach Jerusalem. 1564 geht er während der Rückfahrt auf der griechischen Insel Zakynthos an Land und stirbt dort an einer plötzlichen Krankheit – fern von jeder Universität, welcher der erste verlässliche Kartograph des menschlichen Körpers seinen Leichnam zu Studienzwecken hätte anvertrauen können. □

Christina Schneider, 29, ist freie Journalistin in Hamburg.

Alles kann freilich auch Vesalius nicht erklären. So beschreibt er die Bauchspeicheldrüse als eine Art Polster für den Magen. Auch glaubt er wie Galen, das Blut werde von



Die Muskelstruktur eines Manneskörpers – gemäß Vesals präzisen anatomischen Studien. Als Anregung für den Holzschnitt nutzte der Illustrator eine Zeichnung Tizians

Die Mobil- macher

Ohne sie kämen wir nicht vom Fleck. Ohne sie blieben die Augen zu. Ohne sie kriegten wir keinen Bissen runter. Ohne sie stünde das Herz still. Hunderte von Muskeln treiben uns an: mal als zarter Faserstrang, mal als kompaktes Bündel – und immer raffiniert motorisiert

Text: Claus-Peter Sesin

Selbstversuch im Hamburger Stadtpark. Ich bürste den Staub mehrerer Jahre von meinen Jogging-Schuhen und trabe los. 6,3 Kilometer, Puls 170: Ich kann die Beine kaum mehr heben, mein Gewicht wirkt wie verdoppelt. Nach 7,6 Kilometern bleibt die Luft weg. Ansonsten scheint mein Körper intakt zu sein – bis auf ein leichtes Zittern außen an den Oberschenkeln.

Das böse Erwachen folgt am nächsten Morgen: ein diffuser Druck in den Hüftgelenken, ein peiniges Ziehen in den steifen, geschwollenen Oberschenkelmuskeln. Ich humpele in die Küche, hole mir einen Kaffee und rufe Professor Klaus-Michael Braumann vom Institut für Sport- und Bewegungsmedizin der Universität Hamburg an.

„Mikro-Läsionen“, bringt der Sportmediziner den Muskelkater auf den Fachbegriff: „In Ihren Muskelfasern sind durch die Überlastung winzige Verletzungen entstan-

den. Sie werden in ein paar Tagen völlig verheilt sein.“ Dieser schmerzvolle Prozess baue **Muskeln** sogar auf: Deren Fasern würden dadurch dicker und stärker.

Im Fitness-Studio, erfahre ich, lässt solch „kreative Zerstörung“ den Bizeps systematisch wachsen. Aber auch wenig trainierte Menschen sind wahre Muskelpakete: Bei Männern machen die ungefähr 640 Muskeln rund 40 Prozent der Körpermasse aus, bei manchen Bodybuildern sogar mehr als 50 Prozent. Der Bedarf ist auch immens: Jede Bewegung des Körpers – jede innerliche und jede äußerliche – wird durch Muskelarbeit ausgelöst.

Mediziner unterscheiden zwei große Gruppen von Muskeln: die glatte und die quergestreifte Muskulatur – so genannt, weil sie unter dem Mikroskop ein gleichmäßiges Muster aus hellen und dunklen Streifen aufweist.

Glatte Muskulatur findet sich etwa im Magen-Darm-



Die Körpermasse

des Mannes besteht zu rund 40 Prozent aus Muskeln, während der Muskelanteil bei Frauen bei etwa 30 Prozent liegt. Ungefähr 400 der insgesamt 640 Muskeln zählen zur quergestreiften Muskulatur (die nur unter dem Mikroskop als solche erkennbar wird). Dazu gehören zum Beispiel die Skelettmuskeln: Das sind alle, die – wie der Brustmuskel mit dem Brustbein (hier gelblich) – mit Knochen verbunden sind. Die glatte Muskulatur kleidet dagegen Hohlorgane aus, so Blutgefäße, Gallenblase oder Gebärmutter.

Kopfdreher

Halswirbelsäule

Trapezmuskel

Schlüsselbein

dreieckiger Schultermuskel

großer Brustmuskel

Brustbein

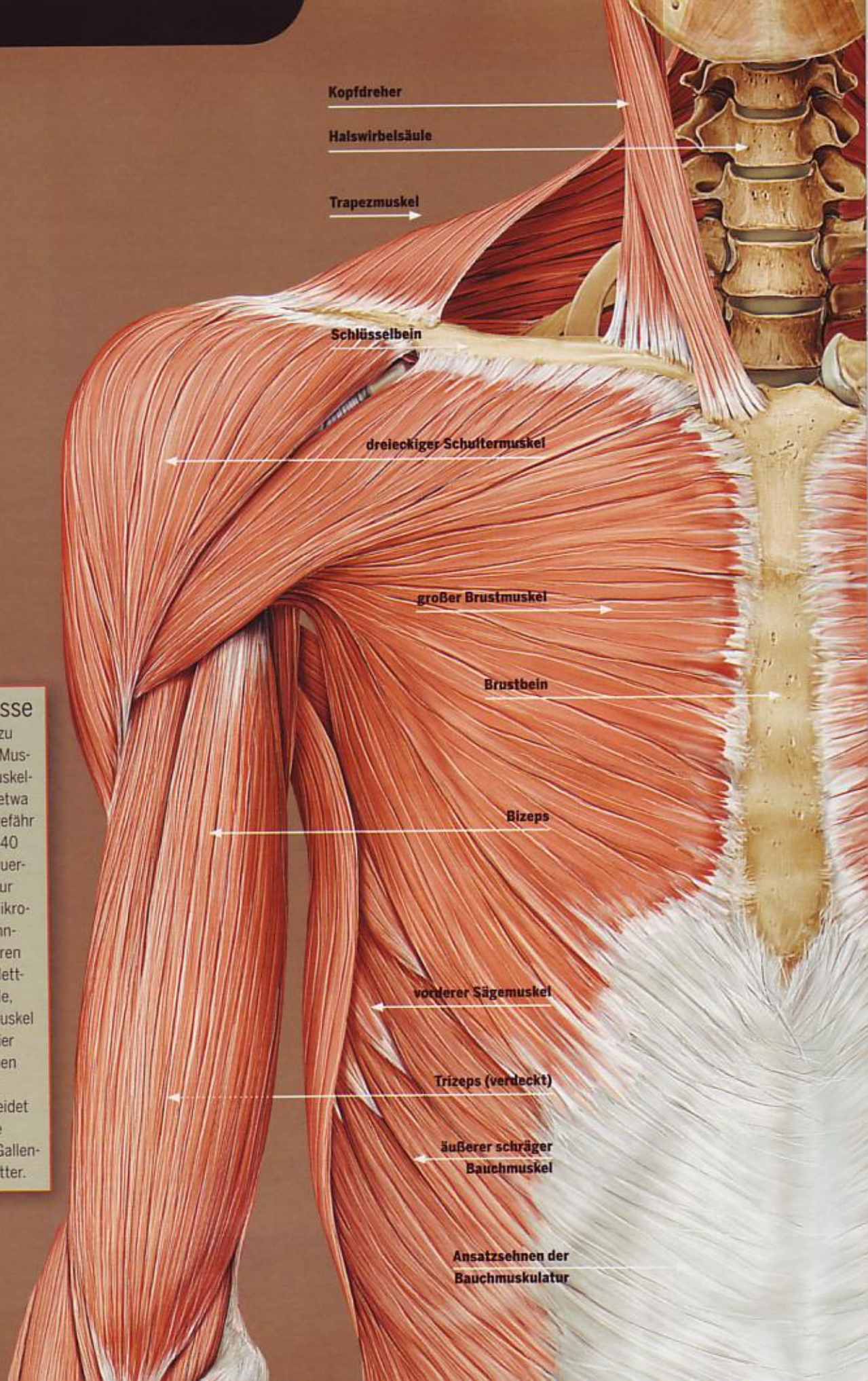
Bizeps

vorderer Sägemuskel

Trizeps (verdeckt)

äußerer schräger
Bauchmuskel

Ansatzsehnen der
Bauchmuskulatur



Muskelfasern zählen zu den größten Zellen des Körpers – im Bizeps etwa erreichen sie eine Länge von über zehn Zentimetern

Trakt und in anderen Hohlorganen wie Gallenblase, Harnblase und Gebärmutter. Sie geht meist sehr langsam zu Werke (so bei der Peristaltik, dem Transport des Darminhalts, siehe Seite 60), kann sehr lange angespannt bleiben, ohne zu ermüden (wie der Schließmuskel am Rektum) – und arbeitet, ohnedass wir darüber nachdenken.

Zur **quergestreiften Muskulatur** zählen die Skelettmuskeln, diejenigen, die über Sehnen mit den Knochen verbunden sind. Quergestreift ist auch die Herzmuskulatur. Doch während das Herz ebenfalls gleichsam „automatisch“ unser Blut pumpt, werden die Skelettmuskeln, mit denen wir Arme, Beine und Finger, aber auch Gesichts- (Mimik) und Kehlkopfmuskeln (Sprechen) bewegen, durch unseren Willen gesteuert.

Soll sich der Unterarm beugen, spannen wir den berühmten Bizeps im Oberarm an. Er ist über Sehnen an den Knochen in Unterarm und Schulter befestigt, und durch das Anspannen verkürzt sich der Bizeps, was den Unterarm nach oben zieht. Zum Strecken des Unterarms müssen wir jedoch einen anderen Muskel an der Rückseite des Oberarms – den Trizeps – anspannen.

Denn Muskeln entfalten ihre Kraft ausschließlich durch Verkürzung – nicht etwa dadurch, dass sie sich entspannen. Daher wird der Trizeps benötigt, damit der Unterarm wieder gestreckt wird. Der Muskel, der jeweils eine Bewegung auslöst, gilt als Spieler (Agonist), der an-

dere – dann inaktive – als Gegenspieler (Antagonist).

Wie andere Skelettmuskeln besteht der Bizeps aus einer Muskel-Faszie genannten Außenhaut aus derbem Bindegewebe, welches die Muskelfaserbündel umschließt. Die Muskelfasern, oder quergestreifte Muskelzellen, zählen mit bis zu 15 Zentimeter Länge zu den größten Zellen im menschlichen Körper. (Die dickste glatte Muskelzelle – in der Gebärmutter am Ende der Schwangerschaft – ist etwa einen halben Millimeter stark, die dünnsten sind um rund ein Fünfzigstel feiner.)

Jede Skelettmuskelfaser enthält Hunderte von **Myofibrillen**. Diese nur rund ein Tausendstelmillimeter dünnen Fäden sind die eigentlichen Motoren der Muskelkontraktion: Sie bestehen aus einer Kette kontraktile Elemente – den **Sarkomeren**. Diese länglichen Strukturen können sich auf ähnliche Weise verkürzen wie eine zusammenschiebbare Teleskop-Antenne (siehe Grafik).

Um Arbeit zu verrichten, benötigen die Muskeln Energie. Ihr Kraftstoff ist das **ATP** (Adenosintriphosphat), das von den **Mitochon-**



Muskeln arbeiten, indem sie sich zusammenziehen. Für die Bewegungen sind daher stets ein »Spieler« und ein »Gegenspieler« nötig: So beugt der Bizeps [1] den Unterarm, und der Trizeps [2] streckt ihn

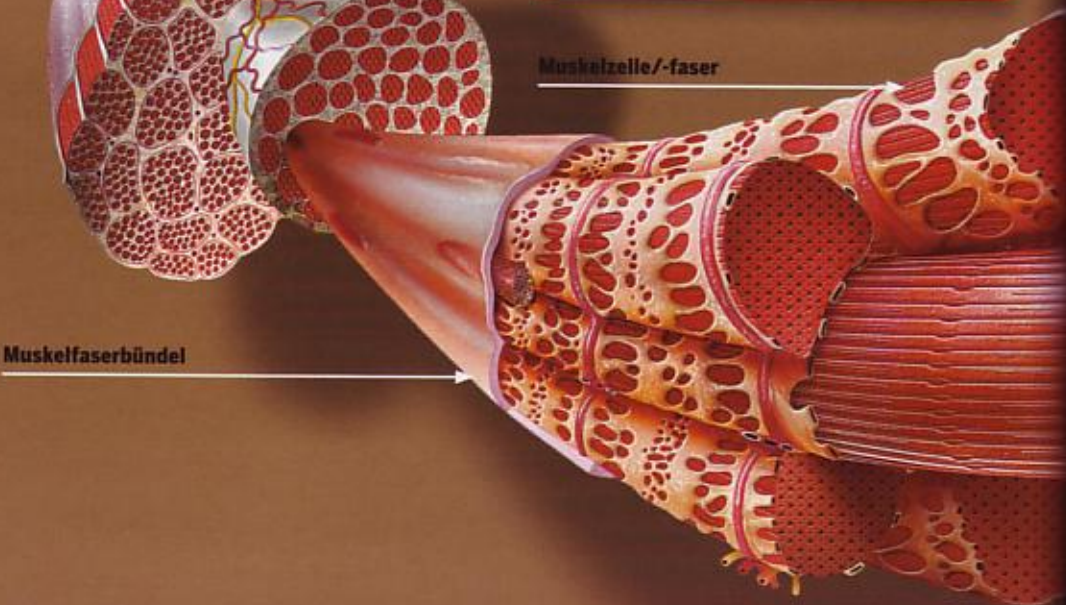
Muskel mit Faszie (Muskelbinde)



Die Faszie, die derbe Muskelbinde, umschließt jeden Skelettmuskel, der unterteilt ist in Bündel aus Muskelfasern. Das sind bis zu 15 Zentimeter lange Zellen, die Hunderte von Myofibrillen enthalten, die eigentlichen „Muskelmotoren“. Die wiederum bestehen jeweils aus einer Kette von kontraktile Sarkomeren (siehe Kasten rechts).

Muskelfaser/-faser

Muskelfaserbündel



drien – den „Kraftwerken“ der Zellen – aus den Abbauprodukten von Kohlenhydraten, Fettsäuren und anderen Substanzen erzeugt wird. ATP ist stets in den Muskelzellen vorhanden und wird dann benötigt, wenn die Nerven das Signal zur Muskelkontraktion geben.

Für die ATP-Herstellung brauchen die Mitochondrien Sauerstoff. Der wird vom Blut angeliefert, das durch die zahlreichen Äder-

chen in den Bindegewebs-hüllen der Muskelfasern fließt. Bei schwerer körperlicher Arbeit benötigen Muskeln aber bis zu 500-mal mehr Sauerstoff als im Ruhezustand; dabei erhöht sich die Durchblutung auf das 20fache.

Reicht bei kurzfristiger extremer Belastung der Sauerstoff dennoch nicht aus, können Muskeln auf sauerstofffreien (anaeroben) Stoffwechsel umschalten. Dabei

wird in den Zellen vorhandener Traubenzucker über mehrere Zwischenstufen abgebaut und mithilfe der dabei freigesetzten Energie ATP aufgebaut. Als Abbauprodukt entsteht **Milchsäure** (Laktat), die den Muskel buchstäblich versauern und schnell ermüden lässt.

Das war der Moment, als mir plötzlich im Stadtpark nach einem kurzen Zwischensprint die Beine schwer wurden.

Bis Ende der 1970er Jahre hielten Forscher solche Laktat-Übersäuerung für die Ursache des Muskelkaters – eine These, die, so der Sportmediziner Braumann, „auch heute noch durch manche Fachbücher geistert.“ Dabei hat der dänische Sportphysiologe Erling Asmussen bereits 1956 den Gegenbeweis geliefert.

Er ließ Probanden bis zur Erschöpfung auf einen Hocker steigen – jeweils mit ei-

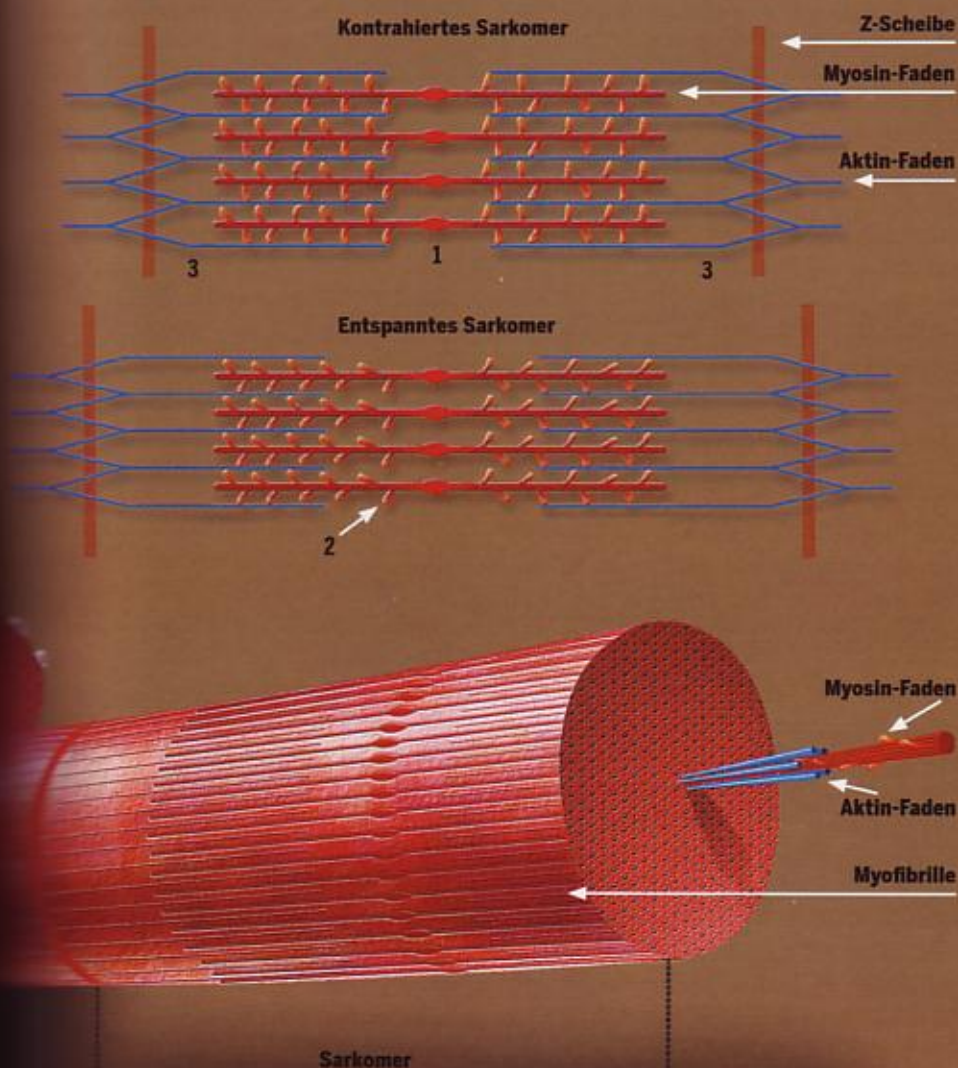
Das Geheimnis der Bewegung

Wie das Muskelspiel entsteht

Die beiden Enden eines Sarkomers werden von so genannten Z-Scheiben gebildet, von denen Aktin-Fäden wie längliche Finger ins Innere des Sarkomers ragen. Sie sind aber zu kurz, um sich in der Mitte zu berühren (siehe Grafik).

Nun bauen Fädchen aus dem Eiweiß Myosin, die auf beiden Seiten in die „Aktin-Finger“ reichen, eine Art Brücke [1]. Aus den Myosin-Fäden ragen seitlich so genannte Köpfchen [2] heraus, die sich bei Muskelspannung – ausgelöst durch biochemische Signale – fest an das Aktin binden. Danach knicken die Köpfchen sofort ab – mit der Folge, dass sie den „Schwanz“ des Myosin-Fadens auf beiden Seiten ein Stück weiter in die Aktin-Finger hineinziehen. Dadurch verkürzt sich das Sarkomer [3]. Die Kraft dafür liefert der Zellbrennstoff ATP, der sich in diesem Prozess „verbraucht“, sich also wieder in seine Bestandteile auflöst. Er klappt nun wieder die Bindung des Myosins an das Aktin, und das Myosin-Köpfchen wird wie eine Feder gespannt. Dabei springt es etwas seitwärts und bindet sich dort erneut an das Aktin. Damit sich die Muskelfaser kontinuierlich bewegt, arbeiten die vielen Myosin-Köpfchen nicht synchron, sondern zeitlich gegeneinander versetzt.

Rund 50 solcher schnellen „Kipp- und Ruderbewegungen“ sind nötig, bis sich das Sarkomer maximal zusammengezogen hat.



Ohne eine starke Muskulatur würden sich vor allem Kraftsportler immer wieder die Knochen brechen



Am Unterarm, wie auch überall sonst im Körper, beziehen die Muskeln ihre Energie aus den Nährstoffen, die das Blut über die Arterien (hier rot) und die Venen (blau) herantransportiert. Daneben sind die Nervenbahnen (gelb) eingebettet, die Steuerbefehle an die Skelettmuskeln übermitteln.

nem Bein zuerst – und dann anschließend mit dem anderen Bein herabsteigen. Beim Absteigen war das auf dem Hocker verbliebene Bein jeweils lediglich mit der „Haltespannung“ belastet. Dennoch klagten die Testpersonen am nächsten Tag vor allem über Muskelkater im passiv belasteten Bein.

Heute wissen Sportmediziner, dass besonders Bremsbewegungen – etwa beim Bergabsteigen – Muskelkater verursachen. Denn bei solcher „negativer Muskelarbeit“ werden die Kräfte auf weniger Muskelfasern verteilt als bei aktiver Muskelarbeit, beim Bergaufsteigen etwa. Das belastet und strapaziert die einzelne Faser stärker. Als Folge der Überlastung reißen an einigen Stellen die Aktin-Fäden von den Z-Scheiben der Sarkomere ab (siehe Grafik auf Seite 55), und in den Muskeln entstehen jene Mikro-Läsionen. Bei der Regeneration vergrößern sich die Z-Scheiben und bilden vermehrt neue Aktin-Fäden. Dadurch werden die Muskelfasern dicker und kräftiger – und in der Summe auch der ganze Muskel.

Wenn wir beim Bergsteigen und anderen körperlichen Strapazen ins Schwitzen geraten, heizt uns ebenfalls ATP ein. Denn die während der Muskelbewegung aus dem ATP gewonnene Energie wird nur zu einem kleinen Teil in mechanische Arbeit umgewandelt. So wie ein Automotor weitaus mehr Abwärme als Bewegungsenergie erzeugt, erhitzt die nicht durch Bewegung verbrauchte ATP-Energie unse-

ren Körper – und uns bricht dann der Schweiß aus.

Doch wie wird das alles ausgelöst und gesteuert? Zur Aktivierung der Skelettmuskeln kommen die Befehle dazu als elektrische Signale aus Gehirn und Rückenmark (siehe Seite 98). Von dort gelangen sie über Nervenleitungen zu den motorischen Endplatten der Muskeln, den „Eingangspforten“ für diese Signale.

Sobald der Befehlsimpuls die Muskelfaser erreicht, werden in ihr Kalzium-Ionen freigesetzt. Diese sorgen nun dafür, dass der Prozess beginnt, durch den sich das Sarkomer verkürzt. Durch Kontraktion Tausender „Fasermotoren“ zieht sich schließlich der gesamte Muskel zusammen.

In den Muskeln finden sich zwei Typen von Muskelfasern, die unterschiedlich schnell „zucken“. Die Verteilung der beiden Fasertypen in den Muskeln hängt von deren typischer Aufgabe ab und ist, da genetisch bedingt, von Mensch zu Mensch unterschiedlich. So findet sich etwa in den Beinen guter Sprinter ein deutlich höherer Anteil an schnellen Fasern. Muskeln mit hohem Anteil daran werden auch „weiße Muskeln“ genannt, weil sie weniger von dem rot färbenden Stoff Myoglobin enthalten als die langsameren „roten Muskeln“.

Menschliche Muskeln können enorme Kräfte entfalten. Der iranische Gewichtheber Hossein Rezazadeh etwa, Sieger bei den Olympischen Spielen von Sydney im Jahre 2000, stemmte 472,5 Kilogramm – ein heute noch

gültiger Weltrekord. „Wie viel Kraft die einzelnen Muskeln dabei aufbringen, ist nicht einfach zu beziffern“, sagt Professor Braumann. Möglich sind solche Kraftakte durch ein kompliziertes Zusammenspiel von Muskulatur und Skelettsystem.

Muskeln und Skelett (siehe Seite 42) stützen sich dabei gegenseitig: Die Belastungen, die dann auf den Wirbelkörpern im Rücken lasten, sind bis zu zehnmal höher als das, was die Knochen allein tragen könnten. Ohne ihre starke Muskulatur würden diesen Kraftsportlern daher die Knochen brechen. Stützend wirkt vor allem die derbe, feste Muskel-Faszie, die sich beim Anspannen der Muskeln stark verhärtet.

Allein die Vorstellung von brechenden Wirbelknochen lässt die Schmerzen in meinen Oberschenkeln erneut aufflammen. Trotzdem laufe ich weiter im Park – und bekomme nach ein paar Tagen kaum noch Muskelkater. Überhaupt scheinen mir meine Beine bereits sichtlich gekräftigt zu sein.

Doch bei unserem nächsten Gespräch hängt Braumann meinen Stolz ein bisschen tiefer: „Das ist sicher Einbildung – ganz so schnell wachsen Muskeln denn doch nicht. Sonst brauchten sich Bodybuilder ja nicht jahrelang in Fitness-Studios abzustampeln.“ □

Claus-Peter Sesin, 52, ist seit vielen Jahren GEO-Autor.

Wissenschaftliche Beratung: Prof. Dr. Klaus-Michael Braumann, Institut für Sport- und Bewegungsmedizin der Universität Hamburg.



Die „Buddenbrooks“ und der Geburtskanal

An alles hat die Natur bei der Entstehung des Menschen gedacht – nur nicht an unseren großen Kopf

Wenn man sich die Bilder vom Urmenschen sorgfältig anschaut, taucht bei einem Heutigen, bei mir zumindest, irgendwann die Frage auf, ob man sich für ein Wesen dieser Art in erotischer Hinsicht begeistern könnte. Der Urmensch ist ja, wie der Name schon sagt, durchaus ein Mensch gewesen. Es wäre trotzdem schwierig. Ich persönlich empfinde vor allem die starke Körperbehaarung der Urmenschenfrau als störend. Die Zähne waren ungepflegt, da darf man sich nichts vormachen. Auch die Augenbrauen wären gewöhnungsbedürftig in ihrer kolossalen, alles überschattenden Wulstigkeit.

Nun aber passierte in der Urmenschenzeit etwas Wunderbares: Der Mensch wurde schöner – durchs Kochen! Jawohl, die Kochkunst hat uns verschönert.

Das kam so: Zunächst aßen die Ur- oder Vormenschen alles roh, ähnlich wie es heute noch die Japaner mit ihren Fischen tun. Die Urmenschen rissen das Fleisch mit ihren stets ungepflegten Zähnen von den Knochen runter. Plötzlich, warum auch immer, fing der Urmensch an, sich kulinarisch Mühe zu geben: Er kochte. Das Essen wurde beim Kochen weich. Nun schnitten sie in ihren Höhlen das Essen auch mit ihren neu erfundenen Steinwerkzeugen klein, da war es zum Cognacschwenker und zur Stoffserviette schon nicht mehr sehr weit.

Die Folge: Das Gebiss musste nicht mehr so stark und wuchtig sein. Die Wülste über den Augenbrauen aber hatten den Sinn, dass dort die gewaltigen Kaumuskeln unserer Vorfahren verankert waren. Seit die nun kochen konnten und das Gebiss schrumpfte, schrumpften auch die Augenwülste. Erotisch beeindruckende Ge-

sichtsarchitekturen wie die von Catherine Zeta-Jones oder die von George Clooney wurden durch die Erfindung des Kochens überhaupt erst möglich.

Was, außer der Kochkunst, macht den Menschen zum Menschen? Wenn ich die Texte richtig verstanden habe, kommt es vor allem auf drei Dinge an – das besonders große Gehirn, den aufrechten Gang und die Hand, unser effektives Präzisionswerkzeug.

Es gibt allerdings jemanden, der die Zeche dafür zahlt, dass wir Menschen so intelligent sind. Es gibt tatsächlich

Weil der Kopf des *Homo sapiens* so ungewöhnlich groß ist, tut das Gebären so weh. Weil wir Menschen, verglichen mit anderen Lebewesen, dieses riesige Gehirn haben. Kopf und Geburtskanal passen in ihren Dimensionen einfach nicht zusammen, da hat die Evolution ein kleines Nachholproblem. Wahrscheinlich sind wir Menschen von allen Lebewesen der Erde deshalb diejenigen, die sich bei der Geburt ihres Nachwuchses am meisten quälen. Löwen, Delfine, Hamster, sogar Giraffen mit den langen Beinen – alle haben sie es leichter.

In jedem Moment, in dem irgendwo auf der Welt sich eine Frau mit einem Baby quält, das nicht herauskommen will, zahlt sie mit ihren Schmerzen stellvertretend den Preis für die Erfindung des Aspirins und des Telefons, für den Computer und



© Disney

Wesen, für die es tendenziell besser wäre, wenn alle Menschen ein bisschen dümmer wären. Und zwar die Frauen – genauer: alle Frauen, die ein Kind kriegen.

das Fernsehen, für die „Buddenbrooks“ von Thomas Mann, das $E = mc^2$ von Albert Einstein und den DB 4 GT, Bj. 64, von Aston Martin – kurz: für all dieses Zeug, das intelligenzmäßig nur aus einem so dicken Schädel wie dem unseren herauskommen konnte.

Was das Gebären betrifft und den Preis, den die Frau als solche für den intellektuellen Fortschritt unserer Gattung bezahlt – es ist alles noch viel schlimmer. Wenn man in diesem Heft weiterliest, er-

fährt man, warum. Die zweite wichtige Menscheneigenschaft, der aufrechte Gang, hat nämlich zur Folge, dass unser Körper bedeutend fester und stabiler gebaut sein muss als der eines Molches etwa oder einer Ziege. Wie eine Säule ungefähr. Dadurch wird das Becken etwas kürzer, aus Gründen der Statik, könnte man sagen.

Wegen des kürzeren Beckens aber verengt sich bei den Frauen der Geburtskanal; dies wiederum hat zur Folge, dass die Geburt noch schwieriger wird. Ich musste es zweimal lesen. Einerseits der dicke Kopf. Andererseits das kürzere Becken. Beides sind Grundvoraussetzungen für die Erfolgskonstruktion Mensch. Und beide Male müssen die Frauen es mit einer doppelten Portion Extrawehe ausbaden.

Dafür werden sie mit einer längeren Lebenserwartung entschädigt. Jetzt kommt einem das als Mann von der Natur nicht mehr ganz so ungerecht vor.

Die Natur, was ist das überhaupt? Wieso ist die Natur so intelligent, eine Intelligenz ohne Zentrale? Die Hand zum Beispiel soll viel Kraft haben, aber nicht zu viele Muskeln, sonst wird sie zu dick und kriegt aus lauter Wurstförmigkeit die Feinmotorik nicht hin, kein Fadeneinfädeln, kein CD-Reinschieben. Die Hand verlagert deswegen ihre Muskelpakete prompt in die Unterarmregion, wo sie nicht stören.

Es wirkt alles so geplant, so ingenieurmäßig. Und in jeder Zelle sitzt, wie in einem Computer, das gleiche unveränderliche Programm. Eine Art Chip, das Genom – in jeder einzelnen von Billionen Zellen.

Oder der Laktatwert. Ein Muskel muss bei Bedarf bis an seine Grenzen gehen können, aber nicht darüber hinaus, sonst geht er kaputt. Also verbraucht der Muskel bei starker Belastung besonders viel Sauerstoff. Wenn der Sauerstoff nicht mehr reicht, wenn also die Belastung länger andauert, stellt sich der Muskel seinen Treibstoff kurzfristig selbst her – aus Zucker, der in den Zellen lagert. Bei dem chemischen Prozess dieser ATP-Beschaffung entsteht nebenbei Laktat, Milchsäu-

re. Und genau diese Milchsäure macht den Muskel müde. Anstrengung produziert also Müdigkeit. Und Müdigkeit verhindert Zerstörung durch Überanstrengung. Es funktioniert wie ein Überlaufventil. Ich nenne das schlau.

»Der Mensch der Zukunft wird aussehen wie ein Neuguinea-Schrumpfkopf mit der Nase von Mike Krüger«

Vor allem produziert das Leben automatisch den Tod. Auch da greift ein Rädchen auf elegante, aber leider mortale Weise ins andere. Es hängt mit den „freien Radikalen“ zusammen.

Diese Chemikalien treiben das Altern voran. Sie entstehen, wenn Zellen Nahrung in Energie umwandeln, sozusagen beim Verdauen. Theoretisch könnte die Zelle damit aufhören, Energie herzustellen, dann blieben wir vielleicht ewig jung. Aber ohne Energie stirbt der Organismus, leider. Wir müssen essen und dabei grau, senil und schrumpelig werden. Unsere Zellen müssen Nahrung in Energie umwandeln und pausenlos ihr eigenes Grab schaufeln, weil dabei freie Radikale entstehen. Mit jedem einzelnen Bissen nehmen wir also auf geradezu unheimliche Weise gleichzeitig das Leben und den Tod in uns auf.

Etwas unheimlich auch ist die Tatsache, dass praktisch schon im Moment der Befruchtung ziemlich viel von unserer Persönlichkeit und unserem Aussehen feststeht. Der Embryo nistet sich in der Gebärmutter ein, nach 22 oder 23 Tagen schlägt der Vorläufer des Herzens, nach 60 Tagen ist im Prinzip alles angelegt, sogar die Brustwarze. Danach wächst der Embryo nur noch.

Alles Körperliche ist in einem einzigen Augenblick bestimmt und nach 60 Tagen fast vollständig angelegt. Und wir leben dann – toi, toi, toi – 90 Jahre mit diesem Ergebnis einer einzigen zufälligen Zehntelsekunde beziehungsweise von nur 60 Tagen Bauzeit.

Ist das ewige Leben besser? Der Mensch der Zukunft wird in der Länge ein ganzes Stück größer sein als der heutige. Die Gesichtsknochen dagegen werden immer kleiner. Wir beißen halt immer weniger zu. Wir brauchen die Gesichtsmuskulatur hauptsächlich zum Lachen oder zum Rumlästern. Der Zukunftsmensch hat folglich ein flaches Gesicht und einen relativ kleinen Kopf. Jetzt mal extrem gesprochen: eine Art Pampelmuse.

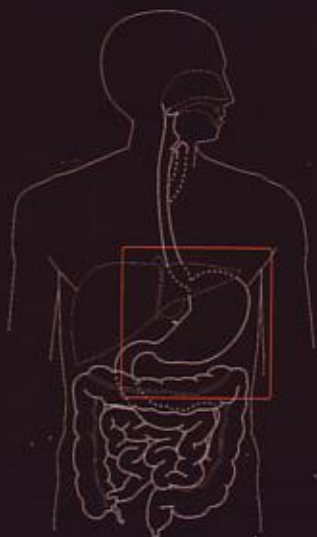
Zum Stützen und Schützen braucht der Zukunftsmensch an seiner Pampelmuse aber eine größere Nase als wir und ein größeres Kinn. Er wird in etwa aussehen wie eine Kombination aus einem Baby, einem Neuguinea-Schrumpfkopf und einem Softball, versehen mit der Nase von Mike Krüger und dem Körperbau eines Basketballspielers. Zumindest in erotischer Hinsicht sollten wir uns von der Zukunft nicht allzu viel versprechen.

Aber das Gebären wird in Zukunft leichter, von Jahrtausend zu Jahrtausend ein klein wenig. Bis am Ende das langbeinige Schrumpfkopfbaby fast von allein hinauspurzelt.

Falls es sich mit seiner Nase nicht in der Nabelschnur verheddert.

Harald Martenstein, 51, ist Kolumnist in Berlin.

Der Magen



Blutgefäße

Speiseröhre

Durch Kontraktionen ihrer Ringmuskeln befördert die Speiseröhre die zerbissene und eingespeichelte Nahrung in den Magen – und, wenn jemandem schlecht wird, auch umgekehrt hinaus

Pförtner

Ventilartiger Schließmuskel, der den Speisebrei portionsweise aus dem Magen in den Darm entlässt

Zwölffingerdarm

In diesen ersten Teil des Dünndarms – so lang, wie zwölf nebeneinander gelegte Finger breit sind (tatsächlich etwa 20 bis 30 Zentimeter) – münden die Gänge der Gallenblase, deren Säuren die Spaltung von Fetten erleichtern, sowie der Bauchspeicheldrüse, deren Enzyme Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate spalten

GEO-Grafik

Egal, ob's schmeckt oder nicht – der Körper will, dass wir essen, dass er versorgt wird mit Baustoff und Energie. Und sein Verdauungsapparat zerlegt dank eines Arsenal von mechanischen, chemischen und biochemischen Werkzeugen nahezu alles, was mundgerecht ist, in seine elementaren Bestandteile

Das Drama nach der Mahlzeit

Schleimhaut

Die aufgenommene Nahrung regt die Ausschüttung von Hormonen an, die ihrerseits Schleimhautzellen stimulieren, Magensaft abzusondern. Vor dessen Aggressivität schützt den Magen selbst eine dicke Schleimschicht

Magensaft

Der stark saure Magensaft aus Salzsäure, Enzymen, Schleim und Wasser zerkleinert die zerkaute Nahrung in ein bis fünf Stunden chemisch zu Speisebrei

Magenwand

Drei Schichten Muskulatur bilden die äußere Magenwand. Ist der Magen gefüllt, kontrahieren sie etwa alle drei Minuten und mischen den Speisebrei durch

Text: Alexandra Rigos
Illustrationen: Reinhard Schulz-Schaeffer

Im Mund zerkleinern die Zähne Speisen zu Bröckchen; Speichel macht diese schlüpfrig und beginnt mit dem Umbau von Stärke zu Zucker. Die rund 25 bis 30 Zentimeter lange Speiseröhre befördert alles in den Magen.

Im Magen tötet die aggressive Magensäure den größten Teil der Keime ab und bricht viele chemische Bindungen der Nahrungsbestandteile auf. Enzyme beginnen, Fette und Eiweiße zu spalten.

Im Zwölffingerdarm, wohin Kontraktionen der Magenwand den Speisebrei durch den „Pfortner“ des Magens befördern, werden Gallensäuren und Enzyme für die weitere Verdauung zugesetzt.

Ein Hamburger besteht aus einem flachen Sesambrötchen, einer platt gedrückten Frikadelle, einem Salatblatt, Tomatenscheiben und Ketchup. Oder aber, aus der Sicht eines Ernährungsexperten, aus durchschnittlich 15 Gramm Eiweiß (**Protein**), 27 Gramm **Kohlenhydraten** und 12 Gramm **Fett**, außerdem aus **Vitaminen** und **Mineralstoffen** in kleinsten Mengen sowie **Ballaststoffen** und reichlich Wasser. Alles zusammen entspricht einem Nährwert von 273 Kilokalorien – genug Energie, um ungefähr eine halbe Stunde lang schnell schwimmen oder anderthalb Stunden spazieren gehen zu können.

Damit der Körper die Kraftstoffzufuhr jedoch in Aktivitäten umsetzen kann, hat er Vorarbeit zu leisten: Zunächst müssen die Hamburger-Zutaten verdaut, also in ihre molekularen Bestandteile zerlegt werden, und diese müssen ins Blut gelangen. Dieser Vorgang spielt sich im Verdauungstrakt ab, einem bei Erwachsenen gut fünf Meter langen, schlauchartigen Gebilde, das vom Mund bis zum Anus reicht.

Erst einmal bekommen die Zähne zu tun. Die Schneide-

und Eckzähne teilen einen mundgerechten Bissen ab, und die Backen- und Mahlzähne zermahlen ihn zu einem Brei, der sich dabei mit Speichel vermischt. Der rinnt aus drei Paar kleinen Drüsen am Zungengrund und sondert **Enzyme** wie etwa die Speichelamylase ab, die sogleich mit der Zersetzung der **Stärke** im Nahrungsbrei beginnt, also deren Verdauung vorbereiten hilft. Hauptsächlich aber dient die Speichelamylase der Zersetzung von Speiseresten und somit der Reinigung von Mundhöhle und Gebiss.

Ein bis zwei Liter Speichel – je nach Bedarf – produziert der Mensch täglich. Allerdings konnte die Volksweisheit, dass ihm schon beim Geruch oder Anblick einer appetitlichen Speise „das Wasser im Mund zusammenläuft“, bislang experimentell nicht bestätigt werden.

Ist der Speisebrei weich genug, schiebt die Zunge ihn wie ein automatisches Fördersystem portionsweise in Richtung Rachen – normalerweise jeweils eine Menge von fünf bis 15 Millilitern. Während der gesamten „Mundarbeit“ bewegt die Zunge, ein von Schleimhaut überzogener

Der Dünndarm

Darmwand

Zwei Muskelschichten sorgen für die Darmkontraktionen; ein Geflecht aus Nervenzellen steuert die Darmaktivität; in Lymphgefäßen wachen Abwehrzellen gegen Krankheitskeime

Gekröse

Durchgehendes Band (hier nur angedeutet), das den Dünndarm am Bauchfell befestigt. So liegt dieser mit seiner Länge von drei bis vier Metern geordnet im Bauchraum

zur Leber führendes Blutgefäß

vom Herzen kommendes Blutgefäß

Nervengeflecht

Längsmuskelschicht

Ringmuskelschicht

Lymphgefäß

Schleimhaut

Falten und Zotten sowie Ausstülpungen der Zellmembranen vergrößern die Oberfläche der Darmschleimhaut auf rund 100 Quadratmeter. Ein Netz von Blutkapillaren darin nimmt die aus dem Speisebrei gewonnenen Nährstoffe auf

GEO-Grafik

Muskel, die Nahrung hin und her, ohne dass man bewusst kaut oder schluckt.

Gleichzeitig prüft die Zunge mit ihren **Geschmacksknospen** – je nach Alter zwischen 9000 und 4000 – die Qualität der Speise: Schmeckt sie süß und ist sie demnach besonders nahrhaft? Oder ist sie bitter und könnte

somit Giftstoffe enthalten? Über die Geschmacksnerven leiten die Sinneszellen auf der Zunge die Informationen an das Gehirn, das dann etwa mit Appetit auf die Süße des Ketchup oder mit dem Kommando „Ausspucken!“ auf ein verdorbenes Salatblatt reagiert.

Hat die Zunge einen Bissen für akzeptabel befunden, befördert sie ihn in die

Speiseröhre. Dort übernimmt ein Mechanismus den Weitertransport, der typisch ist für den gesamten Verdauungstrakt: die Peristaltik. Die etwa 25 bis 30 Zentimeter lange Speiseröhre ist ebenso wie der Darm von ringförmigen und längslaufenden Muskeln umgeben und kann sich daher zusammenziehen und wieder entspannen.

Dort, wo sich ein Nahrungshäppchen befindet, dehnt sich die Speiseröhrenwand. Das löst Nervenimpulse aus, die wiederum bewirken, dass sich die Muskelringe unmittelbar oberhalb dieser Stelle zusammenziehen und „stromabwärts“ erweitern. So wird der Speisebrei in wellenartigen Bewegungen Schritt für Schritt durch den Schlauch ge-

Der Dünndarm leistet die Hauptarbeit beim Umbau der Nahrung in Lebenskraft

Der schlauchförmige Dünndarm (bei drei bis vier Meter Länge nur 2,5 Zentimeter stark) spielt die Hauptrolle beim Verdauungsprozess: In ihm wird der Speisebrei in Nährstoffmoleküle zerlegt. Unverdautes transportiert die Muskulatur mithilfe der Peristaltik in den Dickdarm.

Enzyme aus der Bauchspeicheldrüse zersetzen Eiweiße in Aminosäuren, langkettige Kohlenhydrate in Zucker, Fette in Fettsäuren und Glycerin. Die Zellen der Darmschleimhaut nehmen die Nährstoffe samt Vitaminen und Mineralen in molekularer Form auf; von dort gelangen sie ins Blut.

Das Blutgefäßsystem leitet die Nährstoffmoleküle zunächst in die Leber (siehe Kasten auf Seite 65) und verteilt sie von dort an die Zellen im gesamten Körper.

Zotten der Schleimhaut vergrößern die Aufnahmefläche des Dünndarms für Nährstoffmoleküle enorm (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme; 62fache Vergrößerung)

drückt. Wie stark diese Wellen sind, zeigt sich bei Übelkeit: Plötzlich kehrt sich die Richtung der Peristaltik um, und das Geschluckte wird wieder nach oben aus dem Verdauungstrakt hinausgedrückt.

In der Regel aber nimmt der anderthalb Liter fassende Magen die Nahrung auf und übernimmt gleich mehrere Funktionen: Er dient zum einen als Vorratsbehälter, der selbst eine üppige Mahlzeit zwischengelagert, sie – wiederum durch peristaltische Wellen – gründlich durchmischt, mechanisch zerkleinert, das Fett darin emulgiert (also in kleinere Tröpfchen zerlegt) und das Ganze schließlich, wieder portionsweise, an den Darm weitergibt.

Außerdem spielen sich im Magen bereits wichtige Schritte des chemischen Verdauungsprozesses ab. So genannte Belegzellen in der Magenwand sondern Salzsäure ab, die den größten Teil der mit der Speise eingeschleppten Keime abtötet. In diesem aggressiven Bad, gegen das der Magen selbst von einer dicken Schleimhaut geschützt ist, lösen sich auch die Nahrungspartikel auf. Dazu trägt wesentlich das Enzym Pepsin bei, das von der Magenwand gebildet wird und Eiweiße spaltet.

Der Hamburger hat sich mittlerweile ziemlich verflüssigt. Der Magen, dessen Wände bei einem nüchternen Menschen aneinander liegen, hat sich nun um einiges gedehnt. Druckempfindliche Nervenzellen in der Magenwand messen den Füllstand permanent und melden ihn dem Gehirn. Dehnt der Magen sich weiter als um etwa 20 Prozent, stellt sich Sättigungsgefühl ein.

Allerdings tragen noch andere Einflüsse zur Mengenregulierung bei. Vom ersten Bissen an schütten verschiedene Organe im Verdauungstrakt, aber auch das Gehirn, **Hormone** aus. Die Zusammensetzung dieses Cocktails ändert sich im Laufe der Verdauungsprozedur. Dutzende dieser Botenstoffe wirken wie Rädchen in einem komplizierten Gewirr von Regelkreisen, das die widerstreitenden Gefühle von Appetit und Sättigung steuert.

So beginnen die „Inselzellen“ in der Bauchspeicheldrüse beispielsweise, das Hormon Insulin freizusetzen, wenn sich der Zuckerspiegel im Blut infolge der Nahrungsaufnahme erhöht. Kommt die Speise im Darm an, läuft die Insulinproduktion schon auf Hochtouren. Dieses Hormon ebnet dem im Blut kreisenden **Zucker** den Weg in die Körperzellen, wo er als Energielieferant benötigt wird. Ein zu niedriger Blutzuckerspiegel löst Heißhunger aus. Bei Diabetikern ist dieser Mechanismus gestört, denn bei ihnen fällt die Insulinproduktion ganz oder teilweise aus (siehe Seite 118).

Am unteren Ende des Magens öffnet sich von Zeit zu Zeit der Magenpförtner – ein kräftiger Muskelring, der sich dann entspannt – und lässt etwas Brei in den Dünndarm rinnen. Und dort beginnt die eigentliche Verdauungsarbeit. Denn was Zähne, Säure, Enzyme und Magenmotorik bislang zur Zerlegung des Hamburgers geleistet haben, war nur das Vorspiel.

Der Dünndarm ist ein drei bis vier Meter langer Schlauch von gerade einmal 2,5 Zenti-



Der Dickdarm

Haustrum

Ausbuchtung des Dickdarms. Im Dickdarm – rund 1,5 Meter lang und sechs Zentimeter weit – wird der Restbrei durch Flüssigkeitsentzug verdickt. Zudem zersetzen Bakterien bislang Unverdautes und gewinnen daraus noch weitere Nährstoffe

Krummdarm

Hinterer Teil des Dünndarms und dessen Recyclingstation: Hier wird dem Restbrei der größte Teil seiner Flüssigkeit entnommen – insbesondere zuvor eingesetzte Verdauungssäfte

Dickdarmklappe

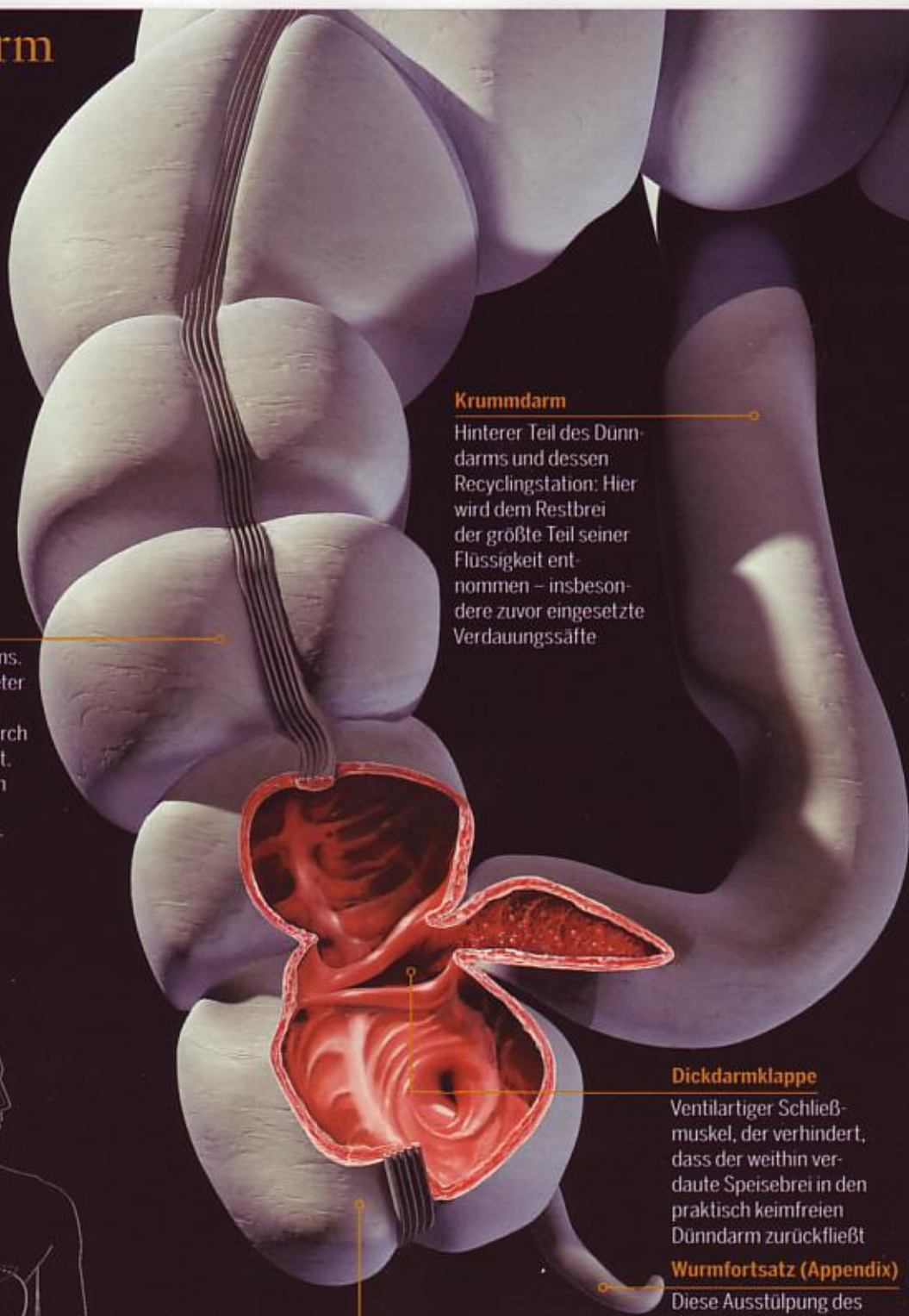
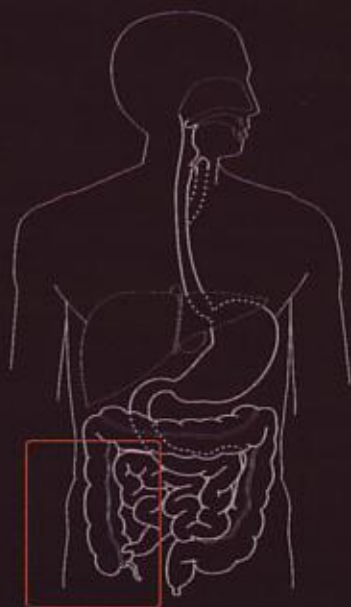
Ventilartiger Schließmuskel, der verhindert, dass der weithin verdaute Speisebrei in den praktisch keimfreien Dünndarm zurückfließt

Wurmfortsatz (Appendix)

Diese Ausstülpung des Dickdarms ist reich mit lymphatischem Gewebe versehen und für die lokale Immunabwehr im Darmbereich wichtig

Blinddarm

Den Anfang des Dickdarms bildet der Blinddarm, der sackförmig in die Bauchhöhle ragt

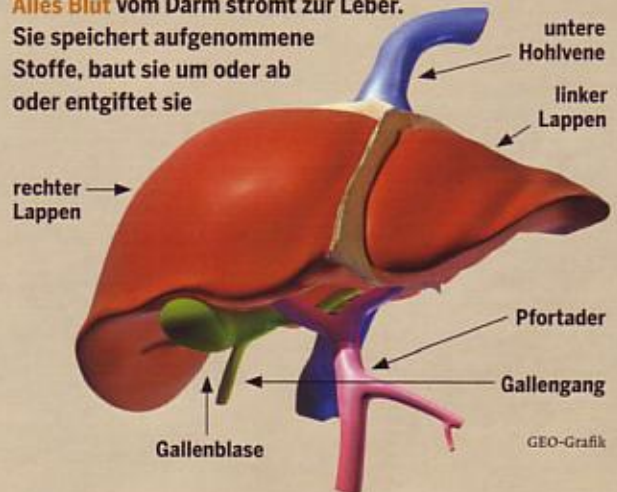


Chemiefabrik des Körpers

Die Leber wiegt bei Erwachsenen etwa 1,5 Kilogramm und besteht aus zwei Lappen, die sich wiederum aus Zehntausenden winziger Läppchen zusammensetzen. In ihnen leisten spezielle Zellen, die Hepatozyten, mehr als 500 unterschiedliche biochemische Ab-, Um- und Aufbauprozesse. Sie sind von feinen Blutgefäßen umspinnen, die alle zu behandelnden Stoffe zu den Hepatozyten bringen und umgekehrt von diesen produzierte Substanzen aufnehmen.

Alles Blut vom Darm strömt zur Leber.

Sie speichert aufgenommene Stoffe, baut sie um oder ab oder entgiftet sie



Die gesamte Struktur ist an zwei Blutkreisläufe angeschlossen: Die Pfortader transportiert unter anderem die vom Darm aufgenommenen Nährstoffe sowie Abbauprodukte aus der Milz zwecks Um- oder Abbau in die Leber. Die Leberschlagader liefert gleichzeitig sauerstoffreiches Blut an. Nachdem die Leberzellen ihre Arbeit verrichtet haben, fließt das Blut über die Lebervenen zum Herzen.

Eine Hauptaufgabe der Leber ist es, die Konzentration von Stoffen im Blut möglichst konstant zu halten (Homöostase). Dazu speichert sie Substanzen, bis diese benötigt werden. So wandeln die Leberzellen Glukose (Traubenzucker), den wichtigsten Energieträger des Körpers, in unlösliches Glykogen und speichern davon bis zu 150 Gramm. Bei Glukosemangel im Blut kehren die Zellen den Prozess um, bauen Glykogen ab und geben Zucker ins Blut. Ähnliches geschieht mit Vitaminen und Mineralen.

Außerdem setzen die Leberzellen beispielsweise aus Aminosäuren Eiweiße zusammen – darunter Blutbestandteile wie die Gerinnungsfaktoren. Und aus Fettabbauprodukten stellen sie Cholesterin her, das nicht nur für die Funktion der Nervenzellen wichtig ist, sondern auch als Rohstoff vieler Hormone sowie der Gallensäuren. Letztere entstehen ebenfalls in der Leber und werden in die Gallenblase abgegeben, die sie bei Bedarf in den Dünndarm zur Verdauung von Fetten ausschüttet.

Schließlich dient die Leber dem Körper als Entgiftungsstation: Sie baut Blutalkohol, Medikamentenreste oder andere Schadstoffe und Abfälle des Stoffwechsels ab, „zerlegt“ mithilfe spezieller Fresszellen Krankheitserreger und macht so Gifte – meistens – unschädlich.

meter Durchmesser. Und doch weist er eine Oberfläche von etwa 100 Quadratmetern auf – also reichlich Auffangfläche für die Nährstoffe aus dem Darminhalt. Die wundersame Flächenvermehrung bewirken die etwa 600 Ringfalten, die jeweils mit Tausenden von Darmzotten – etwa ein Millimeter langen fingerartigen Ausstülpungen – besetzt sind. Aus diesen wiederum stülpen sich Millionen von winzigen, gut ein Tausendstelmillimeter langen, ebenfalls fingerförmigen „Mikrovilli“, die somit den Löwenanteil der Darmfläche ausmachen.

In den ersten, nur 20 bis 30 Zentimeter langen Abschnitt des Dünndarms, den Zwölffingerdarm, sondern Gallengang und Bauchspeicheldrüse höchst wirksame Verdauungssäfte ab. Das Sekret der Bauchspeicheldrüse etwa enthält ein ganzes Gemisch von Enzymen: Trypsin und Chymotrypsin zerschneiden Eiweißstoffe, Lipasen machen sich über die

Fette her, und die Pankreas-Amylase baut die Stärke ab. Stärke besteht aus Hunderten ringförmiger Traubenzuckermoleküle, die sich zu langen, manchmal verzweigten Ketten zusammenlagern. Die Pankreas-Amylase klappt nun die Nahtstellen zwischen den Kettengliedern, sodass kürzere Abschnitte und nach einiger Zeit auch kleine, aus zwei oder drei Zuckermolekülen bestehende Stückchen entstehen.

Diese und andere bereits mit der Speise aufgenommene Zucker gleiten an die Zellen der Darmschleimhaut. Enzyme in den Zellmembranen zerlegen die Zuckertrümmer in deren Grundbausteine, im wesentlichen in Glukose (Traubenzucker), Fruktose (Fruchtzucker) und Galaktose (Bestandteil des Milchzuckers).

Die nunmehr jeweils nur noch aus einem Ring bestehenden Zuckerteilchen werden von der Zelle durch spezielle

Im Dickdarm machen sich Billionen von Bakterien über den Speisebrei her

Täglich rund ein Liter Wasser wird dem ausgelaugten Speisebrei im Dickdarm entzogen und in den Blutkreislauf eingespeist.

Billionen Bakterien mit mehr als 100 Arten bauen unverdaute Ballaststoffe ab und produzieren daraus zum Beispiel Vitamin K und kurzkettige Fettsäuren. Dabei entstehen unter anderem Faulgase wie Methan.

Der unverdauliche, durch Wasserentzug verdickte Speiserest wird samt lebenden und abgestorbenen Mikroben in den Mastdarm gedrückt und durch den Anus ausgeschieden.

Transportmoleküle aufgenommen und an das Netz feinsten Blutgefäße weitergereicht, an das jede Darmzotte angeschlossen ist. Die Transportmoleküle sind so etwas wie winzige Pforten, die jeweils nur bestimmte Substanzen passieren lassen und Glukose sowie Galaktose sogar regelrecht hindurchschubsen.

Alle Nährstoffe, die wie die Stärke chemisch aus Zuckerringen aufgebaut sind, fallen unter den Oberbegriff „Kohlenhydrate“. Die Zucker wiederum sind die wichtigsten Kraftquellen des Organismus. Mit dem Blut erreichen sie die Zellen und werden dort unter Energiegewinn zu Kohlendioxid und Wasser „verbrannt“ (siehe Seite 38). Zuckerüberschüsse kann die Leber in das Kettenmolekül Glykogen oder in Fett umwandeln und speichern.

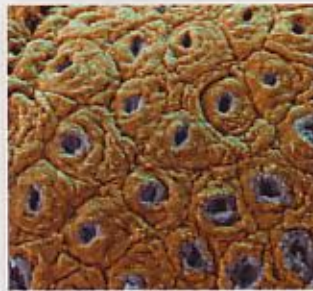
Auch die **Zellulose**, Hauptbestandteil etwa des Salatblattes und der Tomatenscheibe, ist ein Kohlenhydrat und besteht aus vielen Glukosemolekülen. Diese aber sind anders miteinander gekoppelt, sodass die Amylase diese Ketten nicht aufbrechen kann. Zellulose passiert den Dünndarm deshalb wie auch einige andere Zuckerverbindungen weitgehend unverdaut – als Ballaststoff.

Auf andere Weise widerstehen sich die Fette, die in der Frikadelle reichlich enthalten sind. Bei Fetten, auch **Lipide** genannt, handelt es sich um eine Gruppe ziem-



Die Magenschleimhaut – gesehen durch ein Endoskop während der Kontraktion des Organs

Die Magenwand schützt sich innen mit einer Schleimschicht gegen den sauren Magensaft (186fach vergrößert)



Becherzellen in den Öffnungen (blau) der Dickdarmoberfläche produzieren Schleim, der den Nahrungsbrei besser gleiten lässt (72fach vergrößert)

lich unterschiedlicher Stoffe, die schlecht oder gar nicht wasserlöslich sind. Dass sie dennoch im wässrigen Milieu des Darms löslich werden, schaffen die **Gallensäuren**.

Diese bilden zusammen mit den Fettbruchstücken winzige Bläschen, und da die Zellmembranen der Darmschleimhaut selbst fetthaltig sind, lassen sie das Fettige in den Bläschen passieren. Im Inneren der Schleimhautzellen werden die Lipidteilchen wieder zu Fetten zusammengesetzt, mit Proteinen verpackt und gelangen in dieser Form über die **Lympe** ins Blut, das sie

zu den Verbrauchern, also vor allem zur Muskulatur, oder in die Depots, also ins Fettgewebe, befördert.

Wie Kohlenhydrate dienen Fette somit als Energielieferant, sie spielen jedoch auch eine wichtige Rolle als Baustoffe etwa für Zellmembranen (siehe Seite 38).

Nicht anders als Zucker und Fette wird auch Eiweiß (Protein) im Dünndarm zerlegt: in die **Aminosäuren**. Die Eiweiße im Hackfleisch der Bulette bestehen wie sämtliche Proteine des Tierreichs aus nur 21 Aminosäuren. Doch aus diesen bilden sich – ähnlich

wie die Buchstaben eines Alphabets ganze Bibliotheken füllen – all jene Proteine, die das Leben in Gang halten.

Denn die sind nicht nur das wichtigste Baumaterial des Körpers, sie überbringen auch – etwa als Hormone – Botschaften, dienen als Antikörper der Infektionsabwehr, sitzen als Rezeptormoleküle auf Zellmembranen, zerschneiden als Enzyme chemische Verbindungen und bauen daraus wiederum andere Substanzen auf. Der Mensch verfügt über rund 50 000 Varianten von Proteinen.

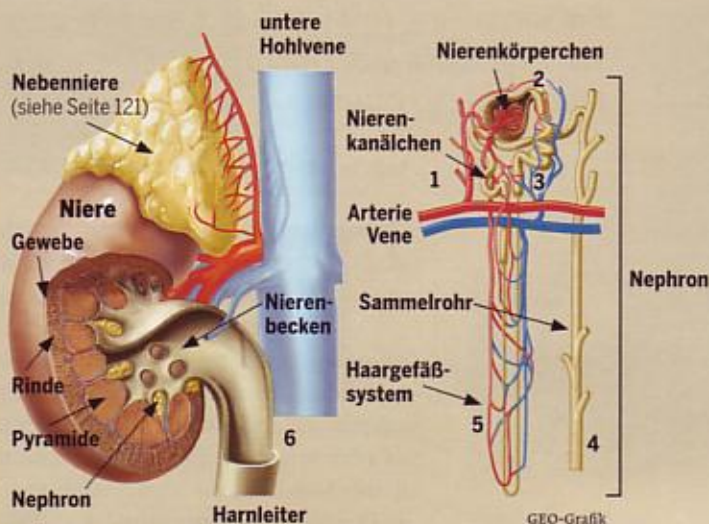
Zwar kann der Organismus in Zeiten des Mangels Aminosäuren auch zur Energiegewinnung heranziehen, doch eigentlich sind diese Stoffe für ihn zu kostbar, um sie zu verbrennen. Deshalb nutzt er die in Aminosäuren zerlegten Eiweiße aus der Nahrung vorwiegend, um eigene Proteine zu bauen.

Rund acht bis zehn Stunden, nachdem der Hamburger vertilgt worden ist, hat das Gros der zerlegten Nährstoffe – einfache Zucker, Aminosäuren, Fett-Abbauprodukte – den Blutstrom erreicht. Aber auch Mineralstoffe wie Eisen (aus dem Fleisch) oder Vitamin C (aus dem Salat) und andere Vitamine haben dann die Darmschleimhaut passiert. Solche „essenziellen Nährstoffe“ sind für diverse Stoffwechselvorgänge nötig, doch kann der menschliche Organismus sie nicht selbst herstellen.

Rund zehn Stunden nach der Mahlzeit stehen die meisten Nährstoffe dem Organismus zur Verfügung

Filter für Abfälle

Jeder gesunde Mensch besitzt zwei Nieren, die bei Erwachsenen rund zehn Zentimeter lang, fünf breit, vier dick und jeweils 120 bis 200 Gramm schwer sind. Umgeben werden sie von Gewebe. Darunter liegt die ziemlich derbe Rinde, die nach innen zwischen die „Pyramiden“ des Nierenmarks ragt. In jeder Nierenrinde befinden sich ein bis zwei Millionen Mikrofilter, die Nephron, die in die Pyramiden ragen. Deren Hauptbestandteil sind die Nierenkörperchen, Knäuel feinsten Blutgefäße, die von einer Kapsel umgeben sind.



Mithilfe winziger Nephron scheidet die Niere Harnstoff, Elektrolyte und andere Substanzen über den Urin aus

Gut 1,2 Liter Blut strömt pro Minute in die Nephron [1]. Durch Poren in den Wänden der dortigen Blutgefäße sickern – wie durch ein Sieb – alle kleineren Bestandteile des Blutes in die Kapseln der Nierenkörperchen [2]: Mineralsalze, Aminosäuren, Traubenzucker sowie Harnstoff, ein Endprodukt des Eiweißstoffwechsels. Dagegen sind Blutzellen und Eiweißmoleküle für die Poren zu groß und verbleiben in den Gefäßen.

Das Filtrat, der „Primärharn“, fließt aus der Kapsel durch ein dünnes, bis zu 3,7 Zentimeter langes Nierenkanälchen [3] in ein Sammelrohr [4], das in das Nierenbecken mündet. Während der Primärharn die Kanälchen passiert, werden ihm 99 Prozent des Wassers sowie alle vom Körper noch gewünschten Stoffe durch ein sich um die Kanälchen windendes Haargefäßsystem gezielt entzogen und ins Blut zurückgeleitet [5]. Der Rest fließt vom Nierenbecken über den Harnleiter [6] in die Harnblase ab und heißt in dieser konzentrierten Form „Urin“. So werden aus rund 180 Liter Primärharn pro Tag im Schnitt nur 1,5 Liter Urin.

Mit diesem Mechanismus „entgiftet“ die Niere nicht nur den Körper, sie reguliert auch dessen Mineralhaushalt, indem sie manche Minerale ausscheidet und andere wieder in den Blutkreislauf entlässt. Damit wird erreicht, dass sich beispielsweise Natrium- und Kaliumsalze nicht gesundheitsgefährdend anreichern und das Verhältnis von Säuren und Basen stets im Gleichgewicht bleibt.

Im letzten Abschnitt des Dünndarms hat sich der Körper auch gut 90 Prozent der Gallensäuren aus dem Restbrei zurückgeholt: Sie sind ebenfalls durch die Darmwand ins Blut gelangt, werden dann von der Leber pro Tag bis zu zehnmal recycelt und jeweils wieder der Galle zugemischt. Was jetzt noch von der Mahlzeit übrig bleibt, ist reif für die letzte Station des Verdauungssystems – den Dickdarm.

Hier wird dem ausgelaugten Brei das meiste restliche Wasser samt einigen Mineralstoffen entzogen. Vor allem aber ist diese etwa 1,5 Meter lange und sechs Zentimeter dicke Röhre ein Fermenter, in dem sich Billionen Bakterien über bislang unverdaute Nahrungsbestandteile hermachen.

Jeder Mensch beherbergt mehr als 100 Bakterienarten und bildet mit ihnen eine einzigartige Lebensgemeinschaft, die sich in ihrer jeweiligen Zusammensetzung bei keinem zweiten Individuum wiederfindet. Manche Mikroben gewinnen aus dem Abbau von Ballaststoffen Substanzen, die für den Organismus nützlich sind, etwa das für die Blutgerinnung wichtige Vitamin K oder kurzkettige Fettsäuren.

Bei solcher Resteverwertung produzieren sie aber auch Gase. Insbesondere wenn die Darmbakterien langkettige Kohlenhydrat-Verbindungen in Kohl, Zwiebeln oder Hülsenfrüchten knacken, fällt viel luftiger Abfall an: unter anderem Wasserstoff und Methan, aber auch Spuren anderer Gase wie etwa Schwefelwasserstoffverbindungen.

Ein Teil der Gase wird vom Dickdarm absorbiert, über den Blutkreislauf zur Lunge transportiert und ausge-

atmet. Nur etwa 0,5 bis 1,5 Liter Gase – je nach Nahrung – bläst der Darm in 24 Stunden über den Anus aus, meist in unauffälligen Portionen.

Die bakterielle Schlussbehandlung des Speiserestes braucht ihre Zeit. Nach der schnellen Reise durch den Dünndarm verweilen die Relikte zwischen 20 und 50 Stunden im mikroskopischen Gewimmel des Dickdarms. Wie schnell sie ausgeschieden werden, hängt nicht zuletzt davon ab, wie viel Ballaststoffe die Nahrung enthalten hat. Solche weithin unverdaulichen Substanzen quellen im Darm kräftig auf und regen dessen Aktivität an.

Nur zu einem kleinen Teil enthält der nun ausscheidungsreife Kot noch Stoffe, die mit dem Hamburger verzehrt worden sind, etwa unverdauliche Ballaststoffe. Hauptsächlich befinden sich in ihm Enzymrückstände sowie unangenehm riechende Stoffwechselprodukte, abgeschilferte Darmzellen und jede Menge lebender und abgestorbener Darmbakterien. Sie allein machen bis zu 60 Prozent der Trockenmasse aus.

Früher oder später quetschen peristaltische Wellen den Stuhl – 60 bis 80 Gramm durchschnittlich pro Tag bei gemischter Kost – ins Rektum. Wann er sich aber der Fäkalien entledigt, entscheidet der Mensch, der auf das Verdauungsgeschehen zuvor keinerlei bewussten Einfluss hatte, nun wieder selbst.

Meistens jedenfalls. □

Alexandra Rigos, 37, arbeitet als freie Journalistin in Berlin.

Wissenschaftliche Beratung: Prof. Dr. Stefan Silbernagl vom Physiologischen Institut der Universität Würzburg.

Das Fenster zum Magen

Ein Schuss – und ein Mann hat ein faustgroßes Loch im Bauch. Er stirbt nicht daran, es macht ihn berühmt. Erst recht seinen Arzt. Denn die Wunde schließt sich nicht, und so nutzt William Beaumont den Einblick in die Innereien seines Patienten ab 1825 zu einer Serie von Experimenten über die Geheimnisse der Verdauung

Text: Jens Kiefer und Tobias Schnettler

Trapper leben gefährlich. Diese Erfahrung macht auch der 28-jährige Alexis St. Martin, als er am Morgen des 6. Juni 1822 den Laden der American Fur Company auf der kleinen Insel Mackinac im Westzipfel des Huronsees betritt. Aus der ungesicherten Schrotflinte eines Kollegen löst sich ein Schuss und trifft St. Martin aus weniger als einem Meter Entfernung in den Bauch.

Der herbeigerufene Militärarzt William Beaumont stellt fest: Zwerchfell und Magen des Verletzten sind zerrissen, Rippen zerbrochen, Teile von Magen und Lunge hängen aus der handtellergroßen Wunde, und aus dem Loch im Magen rinnen die Reste von St. Martins Frühstück. Beaumont reinigt die Wunde und gibt seinem Patienten keine 36 Stunden.

Doch der zähe junge Mann überlebt den starken Blutverlust und ein zehntätiges Fieber. Das Loch in Bauch und Magen bereitet ihm allerdings große Probleme. Über Wochen wird er mit Einläufen ernährt und die Bauchöffnung mit Kompressen abgedeckt.

Nach und nach erholt sich St. Martin dennoch – die Öffnung im Bauch aber schließt sich nicht: Die Magenwände verwachsen mit der Muskulatur zwischen den Rippen, und es entsteht eine Fistel – eine Art Röhre, die aus dem Magen nach außen führt und mit Bandagen abgedeckt werden muss. Auf Dauer – denn Beaumont gelingt es nicht, die Öffnung zu schließen. Mit der Zeit aber bildet sich eine Falte der Bauchhaut heraus, die den Fistelausgang verdeckt und sich wie ein Deckel beiseite schieben lässt. Lebenslang lästig für St. Martin, für Beaumont aber ein Glücksfall.

Denn der mittellose St. Martin verbringt, für seine alte Arbeit zu geschwächt, die nächsten zwei Jahre im Hause seines Arztes. Und Beaumont erkennt die Chance, die ihm die Verletzung seines Patienten bietet: Sie öffnet ihm ein Fenster zu jenen Verdauungsvorgängen, die sich sonst im Verborgenen abspielen.

Zuvor hatten Mediziner ihr Wissen darüber meist daraus gewonnen, dass sie bestimmte Lebensmittel schlucken und auswürgen ließen. Beaumont kann jetzt weiter gehen. 1825 wird er nach Fort Niagara im US-Bundesstaat New York versetzt, nimmt St. Martin mit – und beginnt mit einer Serie von Experimenten. Der Arzt misst die Temperatur im Magen des Verletzten, bestimmt die Farbe der Magenwand und entnimmt Magensekret. Mehrmals täglich lässt er an Seidenfäden befestigte Nahrungsmittel – ein Stück Brot, etwas Kohl, einen Brocken gesalzenes Fleisch – in den Magen seines Patienten hinab und zieht sie wieder heraus, um zu sehen, was damit geschehen ist.

Schließlich kehrt Alexis St. Martin gegen den Wunsch Beaumonts in seine Heimat Kanada zurück. Dort arbeitet er trotz des Lochs im Bauch als Trapper und gründet eine Familie. Vier Jahre später gelingt es Beaumont, wieder Kontakt zu ihm aufzunehmen. Mittlerweile ist der Mann mit der Fistel sich des Marktwertes seiner kuriosen Verletzung bewusst – und lässt sich nur gegen Honorar auf weitere Experimente ein.

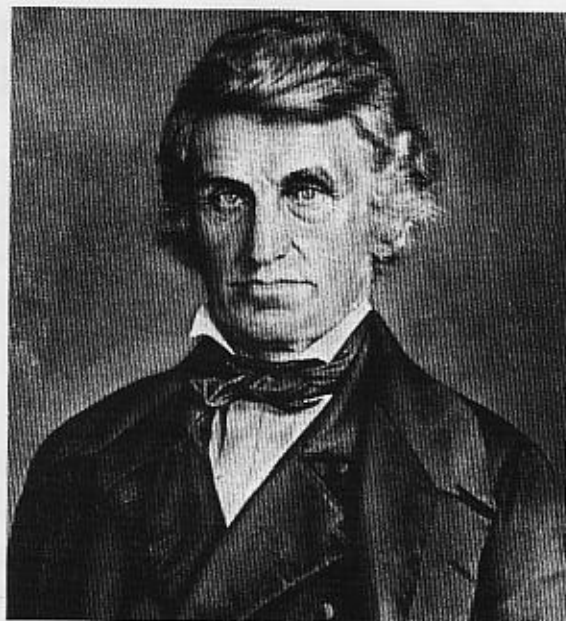
1829 beginnt Beaumont mit einer Versuchsreihe, deren Ergebnisse er 1833 veröffentlicht. Darin beschreibt er die Verdauung als einen chemischen Prozess, der auf der Wirkung von Magensaft beruht: Beobachtungen, die einen grundsätzlichen Streit entscheiden.

Denn bereits in der Antike hatten Gelehrte sich Gedanken darüber gemacht, was mit der Nahrung im Körper geschieht. Der griechisch-römische Arzt Claudius Galenus (129–199 n. Chr.) sah im Magen eine Art Kochtopf, in dem jegliche Form von Nahrung zu „Chylus“ umgewandelt werde, zu einem Brei, aus dem die Leber in einem weiteren Kochvorgang Blut herstelle.

Diese Ansicht blieb über viele Jahrhunderte unangefochten. Erst im 17. Jahrhundert entwickelten Gelehrte andere Vorstellungen von der Verdauung und



Die Schusswunde im Bauch des Trappers Alexis St. Martin heilt nur unvollständig. Es bildet sich darin eine schlauchähnliche Fistel, die seinem Arzt den direkten Zugang zum Magen ermöglicht. Durch sie kann Dr. William Beaumont Magensaft absaugen und erstmals außerhalb des Körpers testen, wie Nahrungsmittel auf diese Flüssigkeit reagieren



Dr. William Beaumont

(1785–1853) untersucht mehrere Jahre lang die Vorgänge im Magen seines Patienten. Und kann als Erster experimentell beweisen, dass es sich bei der Verdauung um einen chemischen Prozess handelt

zwar in zwei gegensätzlichen Schulen. Die einen sahen den Vorgang als rein mechanischen Zerkleinerungs- und Verflüssigungsprozess an, der mit dem Kauen beginne und durch die Magenbewegung (Peristaltik) fortgesetzt werde. Andere glaubten in Anlehnung an Galenus, im Magen werde die Nahrung durch Gärung in Speisebrei umgewandelt.

Neue Erkenntnisse veränderten im 18. Jahrhundert das Bild. Der französische Naturforscher René-Antoine Réaumur beobachtete, dass das von einem Bussard hervorgewürgte Gewölle weder Spuren von Fäulnis noch von Zerkleinerung aufwies – und doch war der Fleischanteil darin zersetzt. Der italienische Geistliche Lazzaro Spallanzani ließ 1778 Gänse an Fäden befestigte Schwämme schlucken und zog sie, nachdem sie mit Magensaft getränkt waren, aus den Vögeln heraus. In diesen Saft legte er Fleischbrocken und Getreidekörner und stellte fest, dass sie sich auflösten.

Damit war bewiesen: Der Magensaft hat an der Zersetzung der Speisen einen entscheidenden Anteil. Doch Spallanzanis These überzeugte nicht alle. Zweifler bestanden darauf, dass aus Tierexperimenten gewonnene Erkenntnisse nicht auf Menschen übertragbar seien.

Erst William Beaumont gelingt es, diese Zweifel anhand der ungewöhnlichen Verletzung von Alexis St. Martin zu beseitigen. Er entnimmt seinem Patienten Magensaft und untersucht dessen Wirkung auf Speisen – beobachtet etwa, dass sich ein Schweineknöchel innerhalb von drei Wochen in dem Saft auflöst. Und indem er die Wirkung von Magensaft und Speichel vergleicht, widerlegt Beaumont die Annahme, dass Magensaft nichts anderes sei als aus dem Rachen heruntergelaufener Speichel.

Beaumont bemerkt auch, dass Magensaft Nahrungsmittel weit schneller zersetzt als entsprechend verdünnte Säure. Er schließt daraus, dass der Magensaft außer Säure noch etwas anderes enthalten muss.

Aufgrund dieser Beobachtung macht sich der deutsche Physiologe Theodor Schwann auf die Suche und entdeckt 1836 das eiweißzersetzende Enzym Pepsin.

Doch auch Beaumont glaubt noch, dass Verdauung überwiegend im Magen stattfindet. Dass bereits der Speichel Stärke in Zucker zu spalten beginnt, entgeht ihm ebenso wie die Rolle des Darms, der den Speisebrei erst in dessen molekulare Bestandteile zerlegt und für den Körper aufnahmefähig macht (siehe Seite 60).

Immerhin sind Beaumonts akribischen Experimenten gültige Aussagen darüber zu verdanken, wie schnell der Magen unterschiedliche Lebensmittel – etwa gekochte oder rohe – zersetzt oder wie sich Genussmittel wie Tee, Kaffee und Alkohol auf das Organ auswirken. St. Martins Hang zur Trinkerei ermöglicht es dem Arzt sogar, Erkrankungen der Magenschleimhaut zu untersuchen: Durch das „Rohr“ in den Magen wird er im Wortsinn zum Augenzeugen einer akuten Gastritis.

Auch nach der Veröffentlichung seiner weltweit beachteten Forschungsergebnisse versucht Beaumont immer wieder, Alexis St. Martin zu neuen Experimenten zu bewegen. Doch dieser weigert sich strikt. Erst nach Beaumonts Tod im Jahre 1853 reist er, mittlerweile bekannt als „Mann mit dem Deckelmagen“, durch Amerika und präsentiert sein Loch im Leib vor wissenschaftlichen Gesellschaften.

Nachdem Alexis St. Martin 86-jährig gestorben ist, bestattet seine Familie ihn in einem nicht gekennzeichneten und besonders tiefen Grab – um zu verhindern, dass er auch nach seinem Tode noch von neugierigen Medizinern heimgesucht wird. William Beaumont, seinen bedeutenden Arzt, hat der Mann mit dem Loch im Magen um 27 Jahre überlebt. □

Jens Kiefer, 33, und Tobias Schnettler, 28, arbeiten als freie Autoren in Hamburg.



Beaumonts Studie

von 1833: Unter St. Martins Brust ist die Bauchhaut vernarbt – bis auf eine offene Stelle, in der »wildes Fleisch« von der Magenwand hoch gewuchert ist. Gewöhnlich deckt allerdings ein Hautlappen diese Fistel ab. Trotz seiner Behinderung wird St. Martin 86 Jahre alt – das Bild unten zeigt ihn mit 81



Das rote Meer in unseren Adern

Viele hundert Mal am Tag kreisen gut fünf Liter Blut im menschlichen Körper. Und erreichen jede seiner Aberbillionen Zellen. Ein gleichsam nach innen gewendeter Ur-Ozean: Wie der für die ersten irdischen Organismen einst die Quelle des Lebens war, so beliefert das Blut unseren Körper mit allen Ressourcen

Text: Erwin Lausch

Eine grandiose Vorstellung: In unseren Adern fließt das Relikt einer sehr fernen Vergangenheit. Das Blut, so sagen Biologen, hat sich wie auch die Körperflüssigkeiten von Tieren, etwa von Quallen und Krebsen, Haien und Fröschen, aus dem Wasser der Meere entwickelt – jenem Medium, in dem einst das Leben entstand und das über Äonen dessen alleinige Heimstätte war.

Dafür spricht nach Ansicht von Experten die chemische Zusammensetzung des **Blutplasmas**, des flüssigen Blutanteils. Es enthält die wichtigsten Mineralstoffe in einem Verhältnis zueinander, das jenem im Meerwasser nahezu gleichkommt. Und wie in den Meeren sind auch im Körper Natrium und Chlor, die zusammen normales Kochsalz bilden, am meisten von allen gelösten Substanzen enthalten.

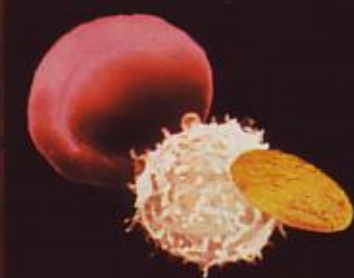
Damit aus Meerwasser Blut werden konnte, hatte die Natur freilich ein gehöriges Maß Entwicklungsarbeit zu leisten. Die rote bis blaurote Mixtur, die dabei herausgekommen ist, erfüllt im Körper aber auch vielfältige Aufgaben.

Dieses hochgezüchtete Meer in uns, bei einem erwachsenen Menschen je nach Körpergröße fünf bis sechs Liter, flutet in jeden Winkel des Organismus und verbindet die einzelnen Organe miteinander. Vom Herzen angetrieben, strömt es im Blutkreislauf (siehe Seite 74) durch weit verzweigte, immer kleinere Arterien zu den feinsten Blutgefäßen, den netzartig miteinander verbundenen Kapillaren, und kehrt durch Venen, die sich zu immer größeren Gefäßen zusammenschließen, zum Herzen zurück.

Das Blut ist im Körper das Transportmittel schlechthin. Unermüdlich bringt es Nährstoffe aus dem Darm in die Gewebe, versorgt den Organismus mit dem zur Energiegewinnung nötigen Sauerstoff aus der Lunge, es schafft Kohlendioxid aus den Geweben zurück zur Lunge sowie andere

Abbauprodukte zu den Nieren, die sie entsorgen. Hormone zum Beispiel werden von den jeweiligen Produktionszentren zu ihren Bestimmungsorten befördert.

Und damit nicht genug: Das Blut leitet überschüssige Wärme aus dem Körperinnern an die Oberfläche. Es sorgt, durch das Nervensystem und durch Hormone reguliert, für ein möglichst gleichbleibendes chemisches Milieu. Durch seine Fähigkeit zu gerinnen dichtet es Wunden ab. Und im Abwehrkampf gegen eingedrungene Krankheitserreger und Fremdstoffe spielt es eine entscheidende Rolle.



Blut ist dicker als Wasser,

weil es massenhaft drei Arten von Zellen enthält. Von links: rotes Blutkörperchen, weißes Blutkörperchen und Blutplättchen

Blut enthält neben gelösten Substanzen zahlreiche Zellen, die **Blutkörperchen**. Bei der turbulenten Bewegung in den Blutgefäßen ist alles gut durchmischt. Doch außerhalb der Gefäße, nach einer Verletzung oder einer Blutentnahme, entmischen sich die Bestandteile schon bald. Wenn das Blut gerinnt, verklumpen die Blutkörperchen zum „Blutkuchen“, aus dem sich als klare Flüssigkeit das **Blutserum** absondert.

Wird dem Blut im Reagenzglas jedoch ein Mittel zugesetzt, das die Gerinnung hemmt, sinken die Blutkörperchen lediglich zu Boden. Die darüber stehende gelbliche Flüssigkeit, das Blutplasma, unterscheidet sich vom Blutserum dadurch, dass sie Fibrinogen enthält, einen Eiweißstoff, der maßgeblich zur Blutgerinnung beiträgt.

Etwa 56 Prozent des Blutvolumens bestehen aus Plasma, 44 Prozent aus Blutkörperchen. Das Plasma enthält zu 90 Prozent Wasser, in dem neben den Mineralsalzen vor allem Eiweißstoffe, Nährstoffe für den Organismus und Abbauprodukte, Vitamine und Hormone gelöst sind. Die Eiweißstoffe (Proteine), die mit ungefähr 70 Prozent den größten Anteil an den gelösten Substanzen ausmachen, haben mannigfache Funktionen. So regulieren sie durch ihr Vermögen, Wasser zu binden, den **Wasserhaushalt** des Körpers. Sie dienen als

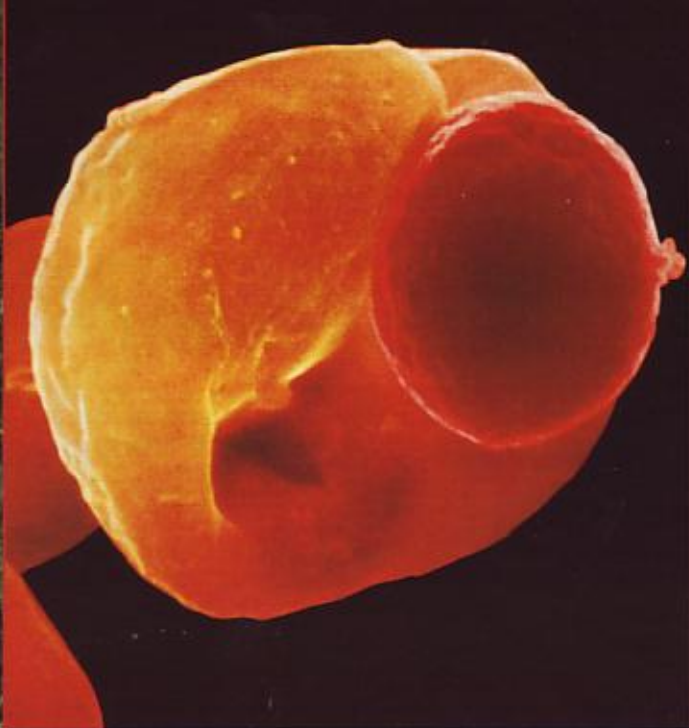
Ein Saft für alle Lebenslagen

Rund 25 Billionen scheibenförmige rote Blutkörperchen enthält das Blut eines Erwachsenen. Sie befördern Sauerstoff zu den Zellen und helfen beim Abtransport des »Abgases« Kohlendioxid (CO_2). Nicht abgebildet sind hier weiße Blutkörperchen, die milliardenfach im Immunsystem wirken, und die für die Blutgerinnung nötigen Blutplättchen. Dazu kommen rund 100 in der Blutflüssigkeit, dem Plasma, gelöste Eiweiße sowie teilweise daran gebundene Substanzen wie Zucker, Salze, Spurenelemente, Fette, Hormone, Vitamine und nicht zuletzt beim Zellstoffwechsel angefallene Abfallstoffe (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme in etwa 9500facher Vergrößerung)



Mutter aller Blutzellen

»Stammzellen« sind menschliche Zellen, die in verschiedenen Organen vorkommen und noch nicht für bestimmte Aufgaben spezialisiert sind. Zellen, aus denen schließlich rote oder weiße Blutkörperchen oder Blutplättchen entstehen, bilden sich durch Teilung von Stammzellen (hier beigefarben) im Knochenmark



Kern raus, Hämoglobin rein

Etwa sechs Tage nach seiner Bildung stößt ein rotes Blutkörperchen seinen kugeligen Zellkern aus (Foto) und kann sich somit nicht durch Teilung vermehren. Sein Zellinhalt besteht jetzt fast völlig aus dem Eiweiß Hämoglobin, mit dessen Hilfe es im Blut Sauerstoff herbei- und Kohlendioxid fortschafft

Transportvehikel für wasserunlösliche Stoffe wie Fette oder Cholesterin und sind als **Antikörper** wichtiger Bestandteil des Immunsystems, das den Organismus gegen Eindringlinge verteidigt (siehe Seite 132). Neben Fibrinogen ist das Prothrombin, ein weiteres Protein, an der Blutgerinnung beteiligt.

Die Zellen im Blut sind zu rund 95 Prozent rote Blutkörperchen (**Erythrozyten**): die Speditoren für Sauerstoff und Kohlendioxid. Den Transport besorgt das in ihnen enthaltene **Hämoglobin** – ein Protein, dem der eisenhaltige Stoff Porphyrin die rote Farbe verleiht. Hämoglobin nimmt in der Lunge Sauerstoff auf und gibt ihn aus den Kapillaren ans umgebende Gewebe ab (siehe Seite 70).

Dort helfen die roten Blutkörperchen, Kohlendioxid (CO₂), das beim Abbau der

Nährstoffe freigesetzt worden ist, in seine weit besser lösliche Form Hydrogenkarbonat umzuwandeln. Derart gelöst, transportiert das Blutplasma das Abbauprodukt in die Lunge, wo es ausgeatmet wird.

Erythrozyten haben die Form flacher Scheiben, die an der Ober- und Unterseite etwas eingedrückt sind. Das macht sie sehr flexibel. Sie können sich verbiegen, um enge Kapillaren zu passieren, und nehmen anschließend wieder die alte Form an.

Wie alle Blutkörperchen werden sie im **Knochenmark** gebildet. Sie besitzen – was ungewöhnlich ist für Körperzellen – keinen Zellkern, denn der verschwindet bald nach ihrer Entstehung, während sich die Zelle weitgehend mit Hämoglobin füllt.

Jeder Kubikmillimeter Blut enthält vier bis sechs Millionen rote Blutkörperchen, die einen Durchmesser von nur etwa 7,7

Tausendstelmillimeter haben. In fünf Liter Blut schwimmen von ihnen 25 Billionen. Sie haben eine Lebensdauer von im Schnitt 120 Tagen und werden vom Knochenmark, das in jeder Sekunde rund zweieinhalb Millionen Erythrozyten produziert, durch neue ersetzt.

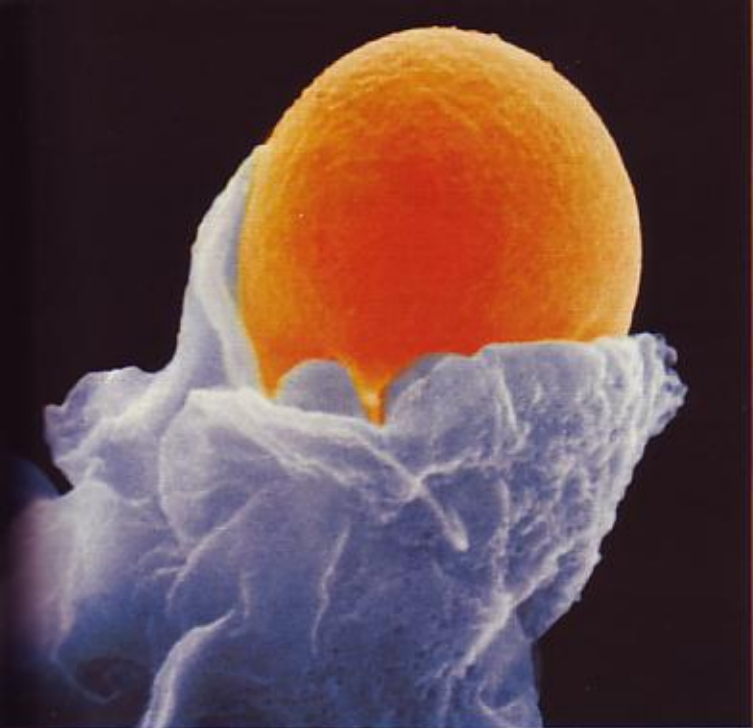
Obgleich alle roten Blutkörperchen das Gleiche leisten, weisen sie bei verschiedenen Menschen feine Differenzen auf, die zur Unterteilung in **Blutgruppen** geführt haben: Bestimmte Eiweiße und Zuckermoleküle der Zellmembran sind unterschiedlich zusammengesetzt.

Bei einer Bluttransfusion kann das fatale Folgen haben. Denn werden dabei zwei unverträgliche Bluttypen miteinander vermischt, so weisen jene Moleküle – als so genannte **Antigene** – die Zellen im jeweils anderen Blut als körperfremd aus und bewirken eine Reaktion von Antikör-

pern. Dadurch verklumpen die roten Blutkörperchen, was zum Tode führen kann.

Die zu Beginn des 20. Jahrhunderts von dem österreichischen Mediziner Karl Landsteiner entdeckten vier Blutgruppen A, B, AB und O sind inzwischen durch weitere Untersysteme ergänzt worden. Von besonderer Bedeutung ist der **Rhesusfaktor**, so benannt nach Experimenten mit Rhesusaffen. Er kommt im Blut von 85 Prozent der Mitteleuropäer vor – sie reagieren, wie man sagt, Rh-positiv.

Bei Schwangerschaften kann es zu schweren Komplikationen kommen, wenn die werdende Mutter Rh-negativ und das Kind Rh-positiv reagiert. Das erste Kind ist meist nicht betroffen, doch bei weiteren Schwangerschaften attackieren von der Mutter gebildete Antikörper den Fetus. Heute ist auch das keine Katastrophe mehr: Durch Einsatz



Ausrangiert und abgebaut

Nach etwa 120 Tagen ist ein rotes Blutkörperchen verbraucht und wird in Milz, Leber und Knochenmark abgebaut. Eine Fresszelle des Immunsystems, ein spezialisiertes weißes Blutkörperchen, verschlingt die ausrangierte Blutzelle (Foto) und verdaut sie so, dass das in ihr enthaltene Eisen wieder verwendbar wird.

spezieller Antikörper ist die Bildung jener gefährlichen Antikörper im mütterlichen Blutkreislauf zu verhindern.

Neben den roten schwimmen – in weitaus geringeren Mengen – weiße Blutkörperchen (Leukozyten) und Blutplättchen (Thrombozyten) im Blut. Ein Kubikmillimeter Blut enthält 5000 bis 10 000 Leukozyten und 200 000 bis 400 000 Thrombozyten.

Weißer Blutkörperchen kommen in mehreren Arten vor, die im Immunsystem unterschiedliche Funktionen ausüben. Im Knochenmark gebildet, „lernt“ ein Teil von ihnen in den Lymphknoten und im **Thymus** Krankheitserreger zu erkennen (siehe Seite 132).

Anders als Erythrozyten besitzen Leukozyten Zellkerne, können sich aktiv bewegen und sich durch die Blutgefäßwände in das umliegende Gewebe zwängen. Tatsächlich

befinden sie sich größtenteils außerhalb der Gefäße. Ihre Lebensdauer reicht – je nach Art – von wenigen Stunden bis zu Jahren.

Die Blutplättchen schließlich treiben farblos und kleiner als Erythrozyten im Blut. Sie schnüren sich von bestimmten Riesenzellen ab und sind von Anfang an ohne Zellkern. Blutplättchen sind neben Plasma-Eiweißstoffen wie Fibrinogen oder Prothrombin die

Hauptakteure im Prozess der Blutgerinnung, durch den bei einer Verletzung ein Leck im Körper abgedichtet und die Wundheilung eingeleitet wird (siehe Seite 141). Außerdem unterstützen sie den Organismus bei der Immunabwehr. Etwa fünf bis elf Tage nach ihrer Produktion werden sie in Le-

ber, Lunge und Milz bereits wieder abgebaut.

Manche Zeichnungen vom Blutkreislauf in Lexika und Lehrbüchern suggerieren ein System, in dem dasselbe Blut unermüdlich kreist. In Wirklichkeit findet ein steter Wechsel und Wandel statt – wie sollte die Versorgung des Körpers auch sonst funktionieren? In fein austarierter Balance verlassen unablässig Bestandteile des Blutes den Kreislauf und werden durch frische ersetzt. Die roten Blutkörperchen bleiben, wie auch die Blutplättchen, normalerweise in den Kapillaren, aber Blutplasma sickert durch deren Wände.

Solch ausgetretenes Plasma, die **Lymph**e, dringt als klare gelbliche Flüssigkeit in die Zellzwischenräume. Neben ihren Aufgaben in der Gefahrenabwehr versorgt sie die Zellen mit Nährstoffen und nimmt dafür die Abbauprodukte auf – bis auf das Kohlendioxid, das aus den Zellen direkt in die Blutgefäßkapillaren übergeht und dann zur Lunge gebracht wird.

Schließlich sammelt die Lymphe sich in den Kapillaren des **Lymphsystems**, strömt durch immer größere Lymph-

eliminiert. Sobald sie, altersschwach geworden, ihre Funktionen nicht mehr hinreichend erfüllen, werden sie in Milz, Leber und Knochenmark von Fresszellen – einem Räumpersonal weißer Blutkörperchen – verschlungen und in ihre Bestandteile zerlegt. Proteine werden in Aminosäuren aufgespalten, im Blutplasma gelöst und zu neuen Synthesen verwendet. Das Eisen aus dem Hämoglobin findet im Knochenmark bei der Produktion neuer Erythrozyten Verwendung.

Nur das Porphyrin, das zusammen mit dem Eisen das rote Hämoglobin bildet, ist nicht mehr wiederzuverwerten. Die Fresszellen verwandeln es in Bilirubin, eine gelbliche bis orangefarbene Substanz, die im Strom des Blutplasmas in die Leber transportiert wird. Daraus entstehen – nach weiteren Umwandlungen – Gallenfarbstoffe, die mit der **Gallenflüssigkeit** in den Zwölffingerdarm gelangen und größtenteils mit dem Stuhl ausgeschieden werden.

Wie lernte man einst in der Lateinstunde? *Sic transit gloria mundi* – so vergeht die Herrlichkeit der Welt. Das so viel und so gern bedeutungs-

Unablässig verlassen Bestandteile des Blutes den Kreislauf und werden durch frische ersetzt

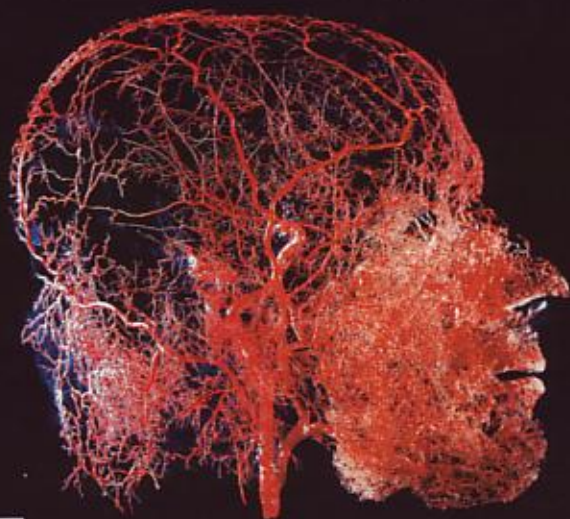
gefäße und in der Nähe des Herzens zurück in die Blutbahn. Das Lymphsystem transportiert auch frisch gewonnene Fettsäuren aus dem Darm zur weiteren Verteilung ins Blut (siehe Seite 60).

Die relativ beständigen roten Blutkörperchen werden schließlich ebenfalls

schwer besungene Rot des Lebensaftes endet also, nun ja, im letzten Dreck. □

Dr. Erwin Lausch, 75, in der ersten GEO kompakt-Ausgabe mit der Anatomie der Erde befasst, hat sich nun in Strukturen des Menschenkörpers vertieft.

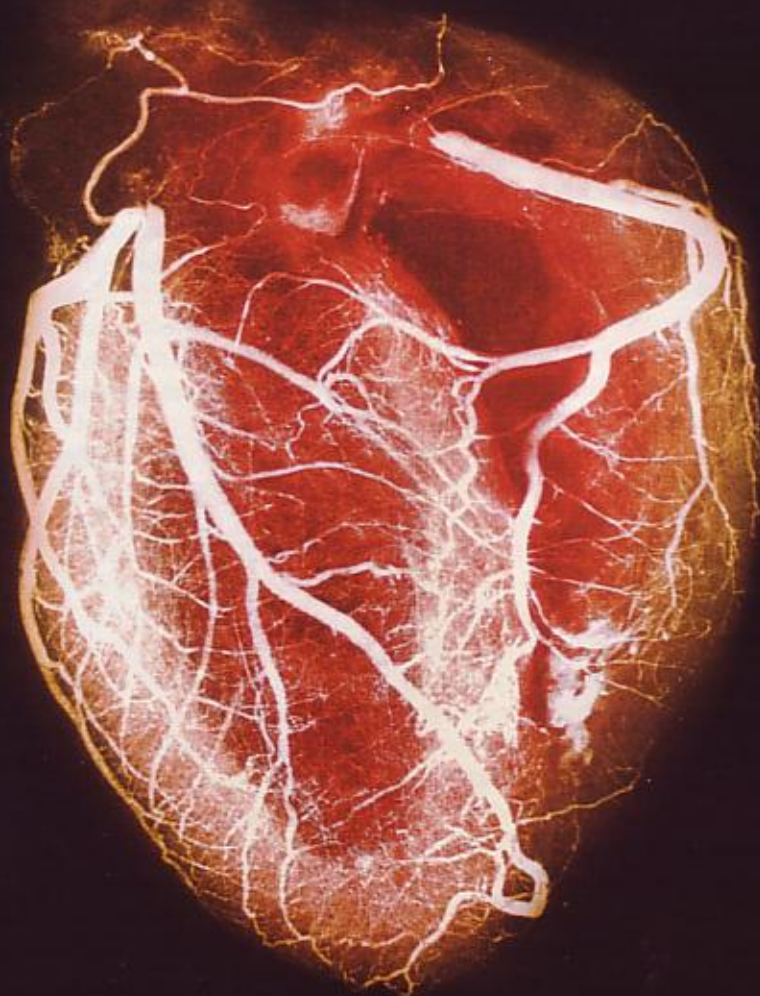
Wissenschaftliche Beratung: **Dr. Peter Schlenke**, Institut für Immunologie und Transfusionen, Universität Lübeck.



2



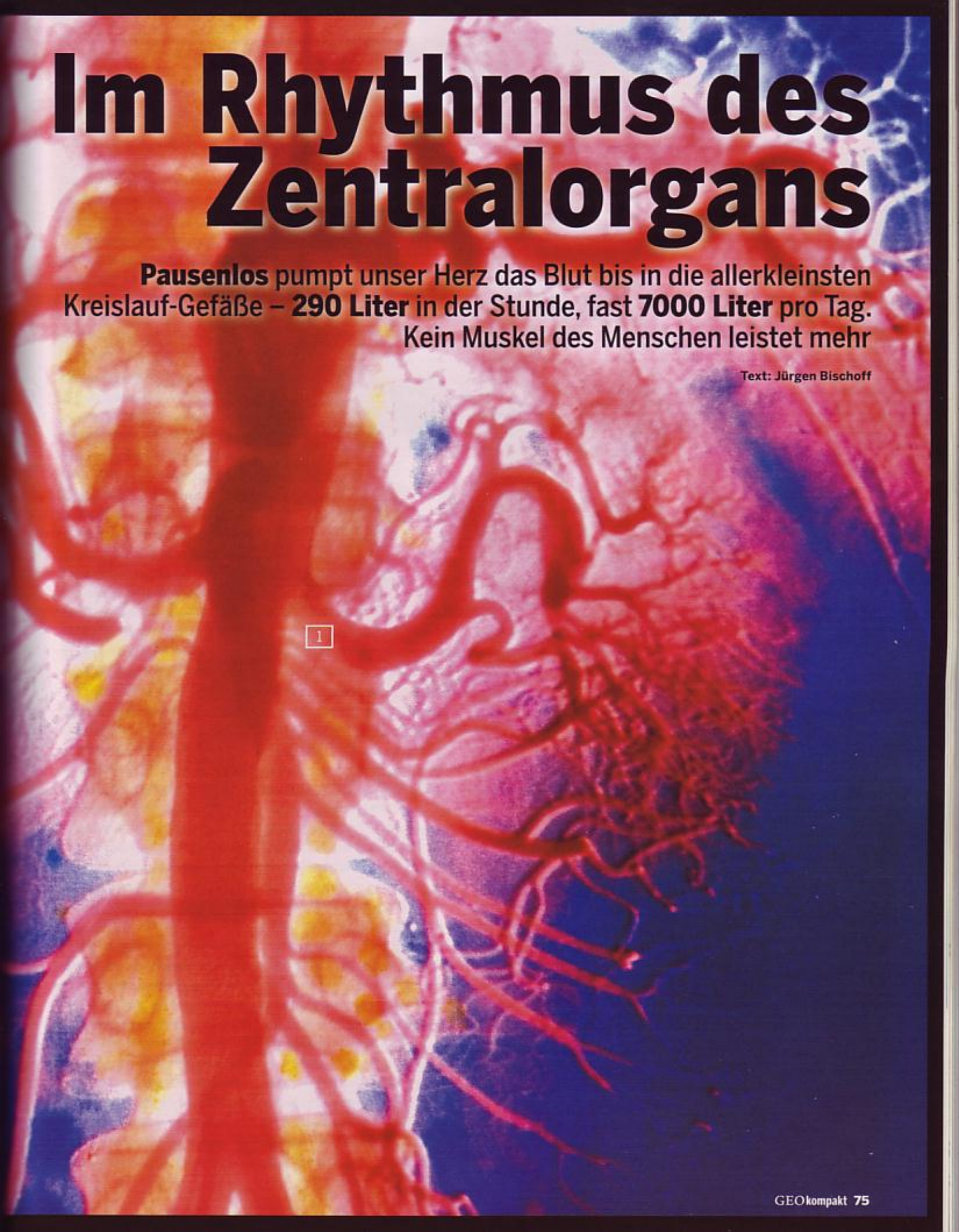
3



4

Die Bauchschlagader **[1]** ist die Hauptversorgungsleitung für die inneren Organe. Rechts oben zweigt die Milzarterie ab, darunter sind die Gefäße der linken, links die der rechten Niere zu erkennen. Im Gehirn **[2]**, das nur rund zwei Prozent des Körpergewichts ausmacht, zirkulieren etwa 20 Prozent des gesamten Blutes bis in Millionen feinste Kapillaren. Das Röntgenbild der Hand **[3]** zeigt oben die Ellen-, darunter die Speichenschlagader, an der zumeist der Puls gemessen wird. Den Herzmuskel **[4]** versorgen die Herzkranzarterien (auf dem Röntgenbild weiß); sind sie verengt, droht ein Herzinfarkt

Im Rhythmus des Zentralorgans



Pausenlos pumpt unser Herz das Blut bis in die allerkleinsten Kreislauf-Gefäße – **290 Liter** in der Stunde, fast **7000 Liter** pro Tag. Kein Muskel des Menschen leistet mehr

Text: Jürgen Bischoff

1



Blick vom Grunde der rechten Herzkammer gegen die rechte Vorkammer: ganz oben – im diffusen Licht – die geöffnete Segelklappe, die sich bei Herzkontraktion schließt, damit das in die Kammer eingeströmte Blut nicht in den Vorhof zurückfließt. Die Sehnenfäden in der Mitte sorgen dafür, dass die Klappe dabei dem Kammerdruck standhält

Harvey veröffentlichte nach einer Reihe von Experimenten in jenem Jahr 1628 einen Text, der ihn in den Olymp der Wissenschaften befördern sollte: „De Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus“ – „Über die Bewegung des Herzens und des Blutes in den Tieren“. Des- sen wichtigste Aussage: Das Blut wird im Körper nicht verbraucht, sondern fließt, angetrieben vom Herzen, im Kreislauf der Gefäße vom Herzen weg und wieder zu ihm zurück (siehe Seite 80).

Von den feinen **Kapillaren**, in denen das Blut in der Lunge mit Sauerstoff angereichert wird, konnte William Harvey zwar noch nichts wissen – er hatte noch kein Mikroskop, mit dem er sie hätte sehen können. Dennoch schuf der Engländer die Basis der modernen Physiologie, indem er als Erster das Geschehen in Herz und Blutgefäßen auf die fassbare Ebene der Mechanik verlagerte. Harvey errechnete sogar die Pumpleistung des Herzens annähernd korrekt: Er kam auf 4,2 Liter pro Minute – tatsächlich sind es bei einem 70 Kilo schweren Menschen in körperlicher Ruhe etwa fünf Liter (bei Belastung können es sogar 15 Liter sein).

Freilich: William Harvey war nicht der Erste, der versucht hatte, dem Zusammenspiel von Herz und Kreislauf streng wissenschaftlich auf die Spur zu kommen. Mehr als ein Jahrhundert zuvor hatte das Universalgenie Leonardo da Vinci bereits ein Glasmodell des Herzens konstruiert, um den Blutstrom studieren zu können – nur

Es ist nur ein Muskel. Faustgroß, im Leerzustand kaum mehr als 300 Gramm schwer, mit einer Leistungsfähigkeit von 0,0015 PS. Und doch: Wofür haben die Menschen ihn im Laufe der Zeiten nicht alles in Anspruch genommen! Für Leben und Liebe, Geburt und Gotteserkenntnis. Für fast alles, was den Menschen ein Rätsel war, sollte dieser Muskelklumpen zuständig sein: das Herz.

Die alten Ägypter, deren Priester und Ärzte bei der aufwendigen Einbalsamierung verstorbener Würdenträger unvermeidlich zu anatomischen Einsichten kamen, hielten das Herz für den Sitz der Persönlichkeit. Ein Papyrus aus dem 16. vorchristlichen Jahrhundert beschreibt es außerdem als eine Art Allzweckpumpe, die nicht nur das Blut,

sondern auch Luft, Wasser, Samen, Tränen, Schleim, Harn und Kot durch den Körper treibt: „Wenn nun irgendein Arzt, irgendein Priester seine Finger legt auf den Kopf, auf die Stelle des Herzens, auf die Arme und die Beine, so wird er fühlen das Herz, das spricht in den Gefäßen aller Körperglieder.“

Um 330 v. Chr. behauptete der griechische Philosoph Aristoteles, im Herzen entstehe das Blut. Später hieß es, das Blut werde in der Leber gebildet, dann aber vom Herzen mit Lebenskraft (*pneuma*) angereichert und im Körper verbraucht.

Im Mittelalter glaubte man, das Herzblut eines Ungeborenen mache den, der es trinke, unverwund- und unsichtbar. Und der Dichter Dante Alighieri (1265–1321) gab Herz und Blut in seiner „Göttlichen

Komödie“ sogar Hauptrollen beim Zeugungsakt: „Das reinste Blut ... Empfängt im Herzen wunderbarerweise die Bildungskraft für menschliche Gestalt ... Geronnen erst, erzeugt es junges Leben.“ Den Theologen und Philosophen späterer Jahrhunderte wiederum galt das Herz vor allem als Sitz der Seele, als Organ religiöser Urteilskraft, als Ort der Empfindungen und Gefühle.

So fabulierte und philosophierte die gelehrte Welt viele Jahrhunderte um das menschliche Zentralorgan herum – bis im Jahre 1628 ein englischer Arzt es aus dem Reich der Spekulationen und mystischen Verklärungen auf die Erde holte: William Harvey (1578–1657), der bei dem berühmten Anatomen Fabricius in Padua studiert hatte und später Hofmedikus des englischen Königs Charles I. wurde.

William Harvey hob im 17. Jahrhundert das Herz aus der Sphäre des Mythischen auf **die Ebene der Mechanik**: Er beschrieb als Erster den Blutkreislauf und was darin geschieht

wusste niemand davon. So blieb es dem englischen Hofmedikus vorbehalten, Biologen und Medizinern den Weg zu weisen, auf dem sie immer tiefer in das Gefüge des menschlichen Herz-Kreislauf-Systems eindringen konnten.

Denn das Herz ist nicht einfach nur eine Pumpe. Genau betrachtet, besteht es aus zwei synchron arbeitenden Pumpen, die zeitgleich zwei unterschiedlich große Kreisläufe bedienen: Die eine treibt sauerstoffarmes, also verbrauchtes Blut in den kleinen, den **Lungenkreislauf**, wo es wieder mit Sauerstoff angereichert wird. Dann fließt es als „frisches“ Blut in die zweite Pumpenkammer, wird von dieser in den großen **Körperkreislauf** gedrückt und strömt, wenn es „verbraucht“ ist, wieder zur ersten Pumpe zurück. Mithin entspricht der **Blutkreislauf** im menschlichen Körper eher einer Acht als einem Kreis (siehe Seite 78).

Es ist die Herzscheidewand, die aus dem rhythmisch kontrahierenden Hohlmuskel eine echte Zwei-Wege-Pumpe macht: Sie trennt das Herz in eine linke und eine rechte Hälfte, die untereinander keine direkte Verbindung haben. Jede dieser Herzhälften ist wiederum in zwei Kammern geteilt, den Vorhof und die eigentliche Herzkammer.

Vorhöfe und Kammern sind durch segelförmige Klappen getrennt, die dafür sorgen, dass das Blut, das sich in den Vorhöfen gesammelt hat, von dort nur in die Kammern fließen kann, aber nicht wieder zurück. Unabhängig davon, ob es sich um sauerstoffreiches

oder um sauerstoffarmes Blut handelt, heißen all jene Gefäße, die das Blut vom Herzen weg transportieren, **Arterien**. **Venen** sind jene Blutgefäße, durch die es zurückfließt.

Zieht sich die Herzmuskulatur zusammen, werden beim Menschen im Normalfall etwa 70 Milliliter Blut in den Herzkammern gegen die „Taschenklappen“ vor den Arterien gepresst, die sich daraufhin öffnen. Aus der rechten Herzkammer kann nun sauerstoffarmes Blut in die Lungenarterien fließen, die es zur Sauerstoffaufnahme in die Lungen weiterleiten.

Gleichzeitig wird aus der linken Herzkammer sauerstoffreiches Blut durch die Aorta in den großen Körperkreislauf gepumpt. Von der Aorta gehen auch die beiden Herzkranzgefäße ab, die mit feinsten Verästelungen wie ein Netz den Hohlmuskel umschließen, um auch ihm den für seine Arbeit nötigen Sauerstoff zuzuführen.

Das Zusammenziehen des Herzens, die **Systole**, ist als Pulsschlag fühlbar und dauert 0,27 Sekunden. Auf die Systole folgt für einen Zeitraum von 0,56 Sekunden die Erschlaffung und anschließende Ausdehnung des Herzmuskels, die **Diastole**. Die Abfolge von Systole und Diastole nennt man den Herzzyklus.

Durch die Kontraktion der Herzkammern entsteht ein Unterdruck in den Vorhöfen, der das Blut aus den Venen in die Vorhöfe saugt. Dann, beim Abschlaffen des Muskels, öffnen sich die Segelklappen und lassen das in den Vorhöfen ge-



Rund 100 000 Kilometer ist das Gefäßsystem eines Erwachsenen lang. Den geringsten Durchmesser haben die Lungenkapillaren mit 0,007, den größten hat die Aorta mit 20 Millimetern. Über das feine Gefäßgeflecht wird jede einzelne Körperzelle versorgt und umgekehrt von Abfallprodukten befreit. Transportmittel ist das Blut, welches die Arterien vom Herzen fort- und die Venen ihm wieder zuführen

sammelte Blut in die Kammern strömen: in die linke das mit Sauerstoff angereicherte Blut aus der Lunge, in die rechte das verbrauchte Blut aus dem Körperkreislauf. Unterstützt wird dieser Vorgang durch eine Kontraktion der Vorhöfe, Sekundenbruchteile bevor die nächste Systole beginnt.

Bei einem gesunden Erwachsenen schlägt das Herz in Ruhe rund 70-mal pro Minute – was bei normaler Belastung ausreicht, um den Körper über das Blut mit Sauerstoff und mit Nährstoffen zu versorgen. Ausgelöst werden die Herzschläge durch einen natürlichen Herzschrittmacher, den Sinusknoten in der Wand des rechten Vorhofs.

Genau genommen, handelt es sich dabei nicht um einen fühlbaren Knoten, sondern um eine Gruppe von Herzmuskelzellen, die aber alle eine besondere Eigenschaft haben: Gesteuert von **Hormonen** (siehe Seite 118), erzeugen sie selbstständig regelmäßige elektrische Impulse. Diese regen zuerst die beiden Vorhöfe zur Kontraktion an, werden dann über ein spezielles Reizleitungssystem den Herzkammern übermittelt und veranlassen diese, sich zusammenzuziehen.

Bei der Abbremsung oder Beschleunigung der vom Sinusknoten ausgehenden Entladungsfrequenz spielt auch das **vegetative Nervensystem** mit (siehe Seite 98). Dieses erhöht zum Beispiel bei starker körperlicher Beanspruchung die Herzfrequenz auf bis zu 180 Schläge in der Minute.

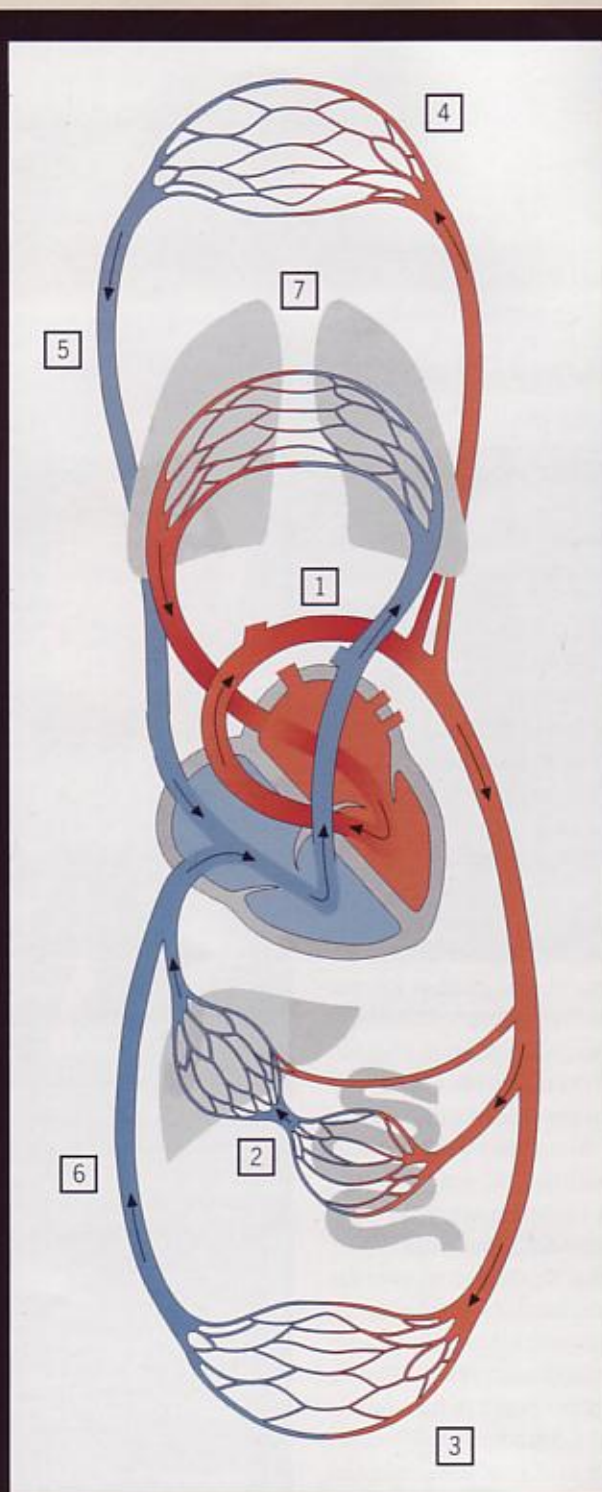
Alle 60 Sekunden wird fast die gesamte Blutmenge

im menschlichen Organismus einmal umgewälzt. Fünf bis sechs Liter strömen in mehr oder minder heftigen Stößen durch ein weit verzweigtes Gefäßsystem. Es fließt in der 40 Zentimeter langen und zwei Zentimeter dicken Aorta wie in den rund 30 Milliarden Kapillaren, die im Durchschnitt gerade einmal einen Millimeter lang und 0,008 Millimeter stark sind. Insgesamt sind die Gefäße im menschlichen Blutkreislauf rund 100 000 Kilometer lang.

Auch über die Aufgaben des Blutkreislaufs, dieses verästelten Transportsystems, hatten Mediziner und Philosophen in den Jahrhunderten vor William Harveys Entdeckung durchaus absonderliche Theorien aufgestellt. Am hartnäckigsten hielt sich die Lehre von den vier Körpersäften, die auf einen Schüler des griechischen Arztes Hippokrates (460–370 v. Chr.) zurückgeht und im 2. nachchristlichen Jahrhundert von dessen römischen Kollegen Claudius Galenus (Galen) übernommen wurde.

Nach dieser Lehre erkrankt ein Mensch dann, wenn die vier „Säfte“ des Körpers – Blut, Schleim, schwarze und gelbe Galle – aus dem Gleichgewicht geraten. Als probates Mittel, den Ausgleich wiederherzustellen, galt seit der Antike der Aderlass, bei dem die Mediziner mit dem Blut des Patienten auch die schädlichen Kräfte aus dem Körper zu spülen glaubten. Nicht selten aber geriet diese Therapie zum Gewaltakt, der dem Kranken den Rest gab.

Dem Vertrauen in den Aderlass machte William Harveys



Die Acht des **Körperkreislaufs**: Von der linken Herzkammer wird sauerstoffreiches Blut (rot) durch die Aorta [1] in Magen, Milz, Bauchspeicheldrüse, Leber und Darm [2], in die untere Körperhälfte [3] sowie in Oberkörper und Kopf [4] gepumpt und versorgt dort die Zellen mit O₂. Sauerstoffarm (blau) fließt es dann durch die obere [5] und untere [6] Hohlvene über den rechten Vorhof in die rechte Herzkammer zurück. Diese pumpet es in den **Lungenkreislauf** [7], über den es, frisch mit Sauerstoff beladen, wieder in die linke Herzkammer gelangt – bereit zur nächsten Runde

Entdeckung des Blutkreislaufes zwar kein Ende. Aber wenigstens wusste man jetzt, welchen Weg das Blut im Körper nimmt; zumal im Jahre 1660 der Bologneser Anatomie-Professor Marcello Malpighi mithilfe eines Mikroskopes auch die winzigen Kapillaren entdeckt hatte, die in der Lunge die Arterien mit den Venen verbinden.

Auf seinem Weg durch den Körper wird das frische Blut von der linken Herzkammer zunächst in die Aorta gepumpt, aus der etwas oberhalb des Herzens die beiden Halsschlagadern und die zwei Unterschlüsselbeinarterien entspringen. Auch alle anderen Arterien zweigen entweder direkt von der Aorta ab oder sind Unterverzweigungen der nächsten Stufe.

Glatte Muskelzellen in den Wänden der herzfernen Arterien treiben die kostbare Fracht auch während der Diastole und insbesondere bei höherem Sauerstoffbedarf einzelner Organe weiter voran: von den Arterien in die Arteriolen, die sich bis in die Kapillaren immer weiter verästeln. Dort gibt das Blut die mitgebrachten Nährstoffe und den Sauerstoff schließlich an die Gewebsflüssigkeit im Körper ab – und nimmt im Tausch Kohlendioxid und Abfälle aus dem Stoffwechsel wieder mit, damit sie entsorgt werden.

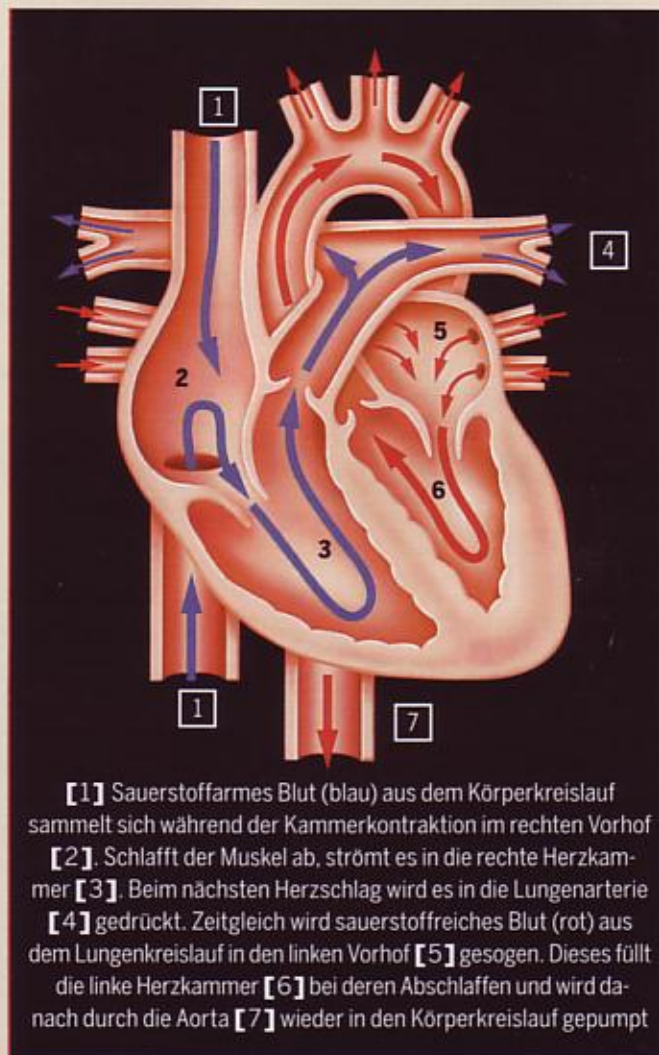
Dieser Austausch geschieht folgendermaßen: Weil die Körperzellen unablässig Nährsubstanzen und Sauerstoff aus der Gewebsflüssigkeit aufnehmen, wird in dieser die Konzentration jener Stoffe folglich auch geringer. Zum Ausgleich sickert – unterstützt vom **Blutdruck** – durch die porösen Ka-

pillarenwände Flüssigkeit mit gelösten Sauer- und Nährstoffmolekülen aus dem Blut ins Körpergewebe. Nur Blutzellen und Plasmaproteine (siehe Seite 70) passen nicht durch die Gefäßwände und bleiben in den Gefäßen zurück.

Am Ende der Kapillaren schließlich ist der Blutdruck niedriger als der Druck der Gewebsflüssigkeit, und nun geht es genau andersherum: Aus den Zellzwischenräumen strömt Flüssigkeit mit gelöstem Kohlendioxid und mit Stoffwechselprodukten in die Blutgefäße zurück und wird mit den verbliebenen Blutbestandteilen erst über die Venolen, also die Venenäste, die Venen und schließlich die untere und obere Hohlvene wieder zum Herzen gebracht.

Mehr noch: Das Herz saugt das „verbrauchte“ Blut durch seine Pumpbewegung buchstäblich an – unterstützt vom Unterdruck, der beim Atmen in der Brust entsteht. Ventile, Klappen in den Venen, sorgen dafür, dass das venöse Blut nicht wieder zurückfließt.

Die subtile Funktion dieses Lebenserhaltungssystems hatten die Anatomen, nachdem es einmal entdeckt war, sehr bald verstanden. Allerdings führte sie das gleich zum nächsten Irrtum – zu der Vermutung nämlich, mit dem Geheimnis des menschlichen Kreislaufs sei auch gleich ein weiteres



[1] Sauerstoffarmes Blut (blau) aus dem Körperkreislauf sammelt sich während der Kammerkontraktion im rechten Vorhof **[2]**. Schläft der Muskel ab, strömt es in die rechte Herzkammer **[3]**. Beim nächsten Herzschlag wird es in die Lungenarterie **[4]** gedrückt. Zeitgleich wird sauerstoffreiches Blut (rot) aus dem Lungenkreislauf in den linken Vorhof **[5]** gesogen. Dieses füllt die linke Herzkammer **[6]** bei deren Abschlaffen und wird danach durch die Aorta **[7]** wieder in den Körperkreislauf gepumpt

entschlüsselt worden: das der ewigen Jugend und der charakterlichen Läuterung.

Denn schließlich war auch zu Harveys und Malpighis Zeiten noch gültige Lehrmeinung, dass das Altern ebenso auf „schlechtes Blut“ zurückzuführen sei wie ein übler Charakter. Dem Blut unschuldiger Tiere, etwa eines Lammes, wurden hingegen verjüngende und reinigende Eigenschaften zugeschrieben. Was also lag näher, als Zeitgenossen zur „Heilung“ eine Portion Schafblut zu verordnen?

Im Jahr 1668 unterzog deshalb Jean-Baptist Denys, der Leibarzt des französischen Königs Ludwig XIV., einen verwirrten Patienten dieser Prozedur. Nach der zweiten Transfusion hatte der Mann starke Schmerzen, und sein Urin färbte sich schwarz. Trotz heftiger Gegenwehr verabschiedete Denys eine weitere Übertragung – an welcher der Patient schließlich starb.

Er war nicht der Letzte, den dieses Schicksal ereilte. Denn das Geheimnis der **Blutgruppen** entschlüsselte erst rund

240 Jahre später der Wiener Karl Landsteiner. Seine Entdeckung revolutionierte die Transfusionsmedizin – und ermöglichte auch einen der größten medizinischen Triumphe des 20. Jahrhunderts: die Ersetzung eines kranken Herzens durch ein gesundes.

In der Nacht zum 3. Dezember 1967 gelang das als Erstem dem südafrikanischen Arzt Christiaan Barnard. Er verpflanzte dem an einer tödlichen Herzkrankheit leidenden Louis Washkansky das Herz einer gerade verstorbenen jungen Frau. Zwar hatte Barnard damit in den Augen mancher Kritiker die menschliche Seele endgültig heimatlos gemacht; Tausenden von Totkranken aber eröffnete sich die Chance auf ein längeres Leben.

Weit mehr als 60 000 Herzen sind seither in aller Welt transplantiert worden. Der Bedarf allerdings ist sehr viel größer. Deshalb arbeiten Mediziner und Techniker bereits am nächsten Schritt – dem komplett implantierbaren künstlichen Herzen, kaum größer und schwerer als das biologische. Das Kunstorgan wird dann aber kein Muskel mehr sein. Sondern eine Maschine aus Plastik und Metall. □

Jürgen Bischoff, 50, hat in GEOkompakt Nr. 1 über die Entdeckung des inneren Erdkerns geschrieben. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Thomas Meinertz**, stellvertretender Ärztlicher Leiter des Herzzentrums am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.

Seit der ersten gelungenen Transplantation im Jahre 1967 sind in aller Welt **mehr als 60 000 Herzen** von einem Menschen zum anderen verpflanzt worden

Luftw

Wie ein unermüdlicher Blasebalg saugt der Brustkorb Luft in die Lunge, mehr als 10 000 Liter am Tag. Denn ohne den Sauerstoff ginge jede menschliche Zelle innerhalb von Minuten zugrunde

Text: Horst Rademacher

Einatmen

Die Rippen heben sich, das Zwerchfell sinkt und zieht sich nach unten, sodass Luft in die Lunge strömt

Zwerchfellgrenze

Meist merkt man es überhaupt nicht. Sitzt völlig entspannt in seinem Sessel und liest einen Roman. Die Welt um einen herum rückt

immer weiter weg. Selbst der eigene Körper scheint allmählich aus dem Bewusstsein zu schwinden. Keinen Muskel strengt man erkennbar an – und außer den Augen, deren Blicke flink über die Buchzei-

len huschen, rührt man keinen Körperteil.

Dennoch bewegen sich Bauch und Brust regelmäßig, ohne dass man es wollte oder die Bewegung bewusst kontrollierte. Im Ruhezustand,

wie beim Lesen, schwillt der Brustraum etwa 12- bis 15-mal in der Minute an und ab – wir atmen, ohne es zu merken.

Wie die Schläge des Herzens vollziehen sich auch die Atemzüge automatisch. Denn nichts



Atemwechsel

Zwerchfellgrenze

Ausatmen

Die Rippen senken sich, das Zwerchfell entspannt und wölbt sich nach oben, Luft wird ausgepresst

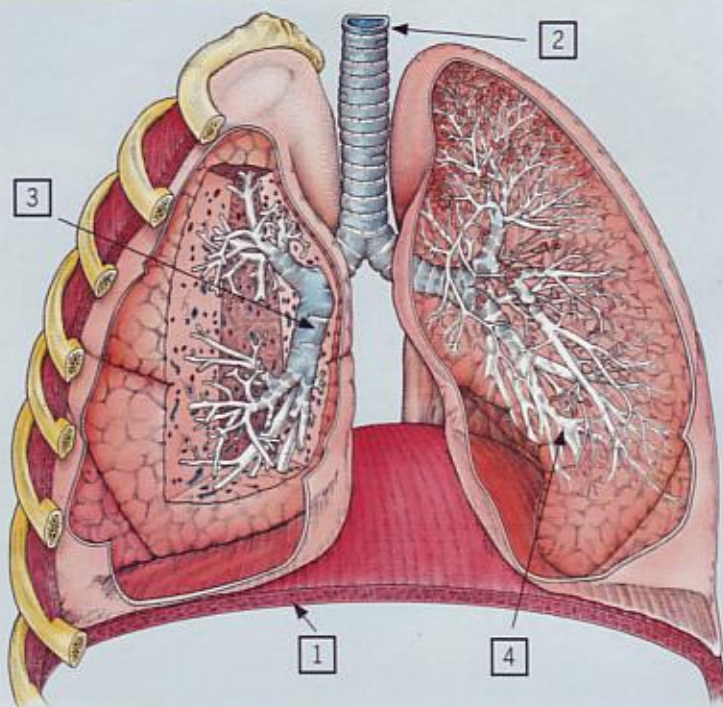
braucht der menschliche Körper mehr als Sauerstoff, jenes Lebenselixier, ohne das keine Zelle auskommt. Und nichts muss dem Körper so gleichmäßig und kontinuierlich zugeführt werden wie O_2 .

Durchschnittlich zwölf bis 15 Atemzüge pro Minute summieren sich zu rund 20 000 Atembewegungen am Tag. Weil mit jedem Atemzug ungefähr ein halber Liter Luft in die Lungen gelangt, saugt der

Mensch also pro Tag mindestens 10 000 Liter Frischluft ein und atmet die gleiche Menge als „Abgas“ wieder aus.

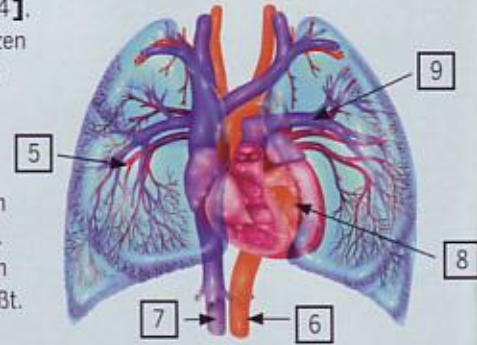
Die eingeatmete Luft besteht unter anderem aus knapp 21 Prozent Sauerstoff

und 0,03 Prozent Kohlendioxid. Beim Ausatmen ist der Sauerstoffanteil auf 16 Prozent gesunken, der Anteil an Kohlendioxid hingegen hat sich auf mehr als das Hundertfache des vorherigen Frischluftwerts



Der Weg des Sauerstoffs

Wenn sich die Muskelfasern des Zwerchfells [1] zusammenziehen und sich das Volumen des Brustkorbs vergrößert, fließt Luft durch die Luftröhre [2] in die beiden Bronchien [3], die sich in den Lungenflügeln verzweigen und immer feinere Verästelungen, die Bronchiolen [4], bilden. An deren Ende sitzen die für den Gasaustausch zuständigen Alveolen: die insgesamt mehr als 300 Millionen Lungenbläschen [10]. Sie geben Sauerstoff an das Blut ab, das über die Lungenvenen [5, rot] zum Herzen fließt.



erhöht: Er beträgt nunmehr vier Prozent.

Wie schafft es die Lunge, in nur ein oder zwei Sekunden zwischen Ein- und Ausatmen die Zusammensetzung der Luft so drastisch zu ändern?

Das Geheimnis liegt darin, dass unsere Lunge mit einer riesigen, 140 Quadratmeter großen Oberfläche ausgestattet ist. Diese große Oberfläche ist Voraussetzung dafür, dass Sauerstoff und Kohlendioxid – ein Abfallprodukt des Zellstoffwechsels (siehe Seite 34) – so effizient gegeneinander ausgetauscht werden. Dazu muss die Atemluft allerdings tief in das Innere des Organs eindringen.

Vom Aufbau her ähnelt die Lunge einem umgekehrten Baum – mit einem dicken Stamm, der sich in zwei große Äste aufspaltet und dann 24-mal in immer kleinere Zweige aufteilt. Beim Einatmen durch Mund oder Nase strömt die Luft über den Rachen zunächst in die zehn bis zwölf Zentimeter lange Luftröhre, die jenem Baumstamm entspricht. Sie teilt sich

im Brustkorb in zwei Äste, die Hauptbronchien, die zu den beiden Lungenflügeln führen und sich dort in immer kleinere **Bronchien** verzweigen.

Am Ende der feinsten Verzweigungen, der **Bronchiolen**, sitzen die Lungenbläschen, die so genannten **Alveolen** – vergleichbar den Blättern eines Baumes. Doch während von den Blättern einer Pflanze Sauerstoff abgegeben und Kohlendioxid aufgenommen wird, geschieht in den Alveolen genau das Umgekehrte: Sie nehmen Sauerstoff aus der Luft auf und geben Kohlendioxid an die Luft ab.

Unter dem Mikroskop sieht eine Alveole aus wie eine einzelne kleine Weintraube, nur hat jedes Bläschen einen Durchmesser von höchstens einem Drittelmillimeter. Etwa 300 Millionen von ihnen gibt es in der Lunge eines gesunden Menschen. Mit jedem Atemzug blähen sich diese winzigen Ballons auf und ziehen sich beim Ausatmen wieder zusammen. Jeder ist von einem Netz feinsten Blutgefäße umspinnen, und nur eine dünne Membran trennt

Blut und Atemluft. Während dieses stets feuchte Häutchen für Flüssigkeiten undurchlässig ist, können Gasmoleküle es ungehindert durchdringen.

Physiker nennen das Prinzip, nach dem dort der Gasaustausch funktioniert, **Diffusion** durch eine Membran: Herrschen auf den beiden Seiten einer trennenden Membran unterschiedliche Konzentrationen von Gasmolekülen, kommt es zu einem Ausgleich.

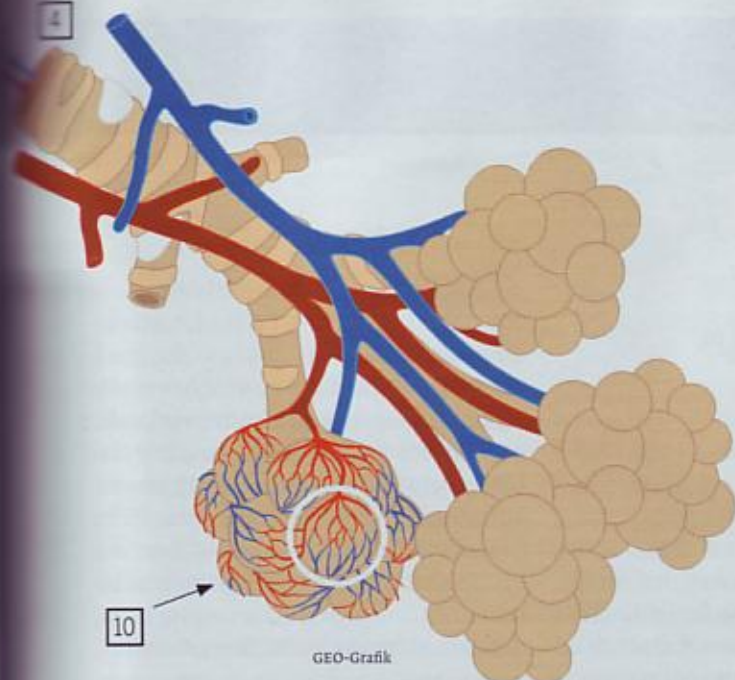
Vereinfacht beschrieben, findet ein ähnlicher Vorgang in einer Teekanne statt. Durch die feinen Fasern eines Teebeutels dringen die Farb- und Aromastoffe des Tees in das heiße Wasser, die Teeblätter bleiben aber zurück. Nach einer gewissen Zeit sind die Teeblätter ausgelaugt und die Konzentration von Aromastoffen im Wasser ist auf beiden Seiten des Teebeutels die gleiche.

In der Lunge verbleibt nach dem Einatmen in jedem Bläschen ein Sauerstoffanteil in der Luft von 14 Prozent (weil die Luft dort mit Wasserdampf gesättigt ist). Dagegen ist in dem Blut, das die Alveolen umspült, die Sauerstoffkonzentration

wesentlich geringer – und deshalb wandern die Sauerstoffmoleküle durch die Membran der Bläschen ins Blut. Gleichzeitig enthält das Blut reichlich Kohlendioxid, die Luft in den Alveolen dagegen nur zu 5,6 Prozent. Aufgrund dieses Konzentrationsgefälles diffundieren deshalb CO₂-Moleküle durch die Bläschenmembran – umgekehrt zum Weg des Sauerstoffs.

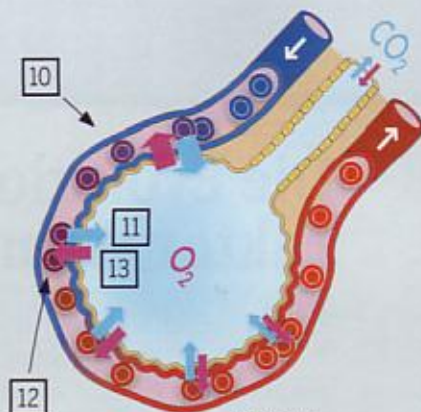
Das in den roten Blutkörperchen vorhandene Protein **Hämoglobin** verstärkt diesen Austausch. Denn es „fängt“ die nun im Blutplasma treibenden Sauerstoffmoleküle größtenteils ein und bindet sie an sich. Dadurch wird die O₂-Konzentration im Plasma wieder geringer – und weiterer Sauerstoff diffundiert aus den Alveolen ins Blut.

Das mit Sauerstoff gesättigte Blut strömt nun von der Lunge zum Herzen und wird über den ganzen Körper verteilt. Weil alle Zellen ständig Sauerstoff verbrauchen, ist dessen Konzentration in den Geweben geringer als in den Blutgefäßen, und deshalb diffundiert das Gas aus den roten



GEO-Grafik

Von dort verteilt sich das sauerstoffreiche Blut (rot) über die Aorta [6] in den Körper. In den Geweben sämtlicher Organe und deren Zellen wird Sauerstoff anschließend gegen das Stoffwechselabfallprodukt Kohlendioxid ausgetauscht. Danach gelangt das „verbrauchte“, nun sauerstoffarme und kohlendioxidreiche Blut (blau) über die Hohlvenen [7] zurück ins Herz [8] und strömt von dort durch die sich verästelnden Lungenarterien [9] in feinste Kapillaren. Diese überziehen jede der Alveolen [10]. Durch deren Membranen wird nun das Kohlendioxid [11] aus dem Blut [12] in die Lungenbläschen abgegeben und umgekehrt frischer Sauerstoff aufgenommen [13].



GEO-Grafik

Blutkörperchen in die Flüssigkeit zwischen den Geweben – und daraus in die Zellen.

In deren Innerem nehmen die **Mitochondrien**, die Kraftwerke der Zelle, den Sauerstoff auf und verbrauchen ihn, um chemische Energie zu erzeugen (siehe Kasten Seite 38). Als Abfallprodukt entsteht Kohlendioxid, das den umgekehrten Weg nimmt: Es gelangt aus den Zellen ins Blut, wird zum Teil vom Hämoglobin und zum Teil in Bikarbonat gebunden, zur Lunge transportiert, dort in die Alveolen entlassen und ausgeatmet.

Möglich ist dieser Gasaustausch nur, weil sich mit jedem Atemzug die Druckverhältnisse im Brustraum ändern. Herrscht dort Unterdruck, strömt Luft in die Lunge, bei Überdruck fließt sie dagegen hinaus. Diese Druckunterschiede entstehen entweder durch Bauch- oder durch Brustatmung.

Bei der Bauchatmung hebt und senkt sich das Zwerchfell – ein starker Muskel – und wirkt dabei wie der Kolben in einer Pumpe: Geht der Kolben, also

das Zwerchfell, nach unten, so wird infolge des Unterdrucks über ihm Luft angesaugt, somit eingeatmet. Das Ausatmen hingegen erfolgt passiv – infolge ihrer Elastizität zieht sich die Lunge wie ein Gummiband zusammen und nimmt

Sensoren in den Gefäßen überwachen ständig den Gehalt von Sauerstoff und Kohlendioxid im Blut

dabei den „Kolben“ Zwerchfell wieder mit nach oben.

Die Brustatmung funktioniert ähnlich, nur dass dabei die Volumen- und Druckänderung durch die Bewegung der Rippen erreicht wird.

Sobald der Körper auch nur etwas angestrengt wird, steigt der Sauerstoffbedarf der Zellen. Das Herz beginnt stärker zu pumpen, und die Lunge muss mehr Sauerstoff umsetzen. Statt der rund acht Liter Atemluft, die bei körperlicher Ruhe jede Minute im Inneren der Lunge ankommen, muss sie bei längerem Radfahren schon etwa 40, bei Höchstleistung sogar über 100 Liter pro Minute umschlagen.

Gesteuert wird die Atmung durch das Atemzentrum im verlängerten Mark – jenem Teil des **Hirnstamms**, der das Gehirn mit dem Rückenmark verbindet. Die Steuersignale kommen von mehreren chemischen Sensoren. Diese spe-

zialisierten Zellen liegen in der Aorta, in den beiden Kopfschlagadern und zentral in der Nähe des Atemzentrums und sind über Nerven mit diesem verbunden. Sie prüfen fortwährend den Gehalt der beiden Gase Sauerstoff und Kohlendioxid im Blut sowie dessen Säuregehalt.

Registrieren die Sensoren eine erhöhte CO_2 -Konzentration, signalisiert das Atemzentrum der Atemmuskulatur, schneller zu atmen. Es erhöht sich die Zahl der Atemzüge pro Minute, und das flache Atmen des Ruhezustandes geht in tiefes Luftholen über. Diese Steuerung erfolgt, ohne dass wir darüber nachdenken müssen.

Dennoch können wir die Atmung auch bewusst steuern. So lernen Opernsänger eine Atemtechnik, mit der sie lange Tonfolgen bewältigen, ohne zwischendurch atmen zu müssen. Durch psychogenes Training, Yoga und Konzentrationsübungen sind Extremtaucher in der Lage, ihren Atem über acht Minuten lang anzuhalten. Damit ist aber die Grenze des physiologisch Möglichen fast schon erreicht.

Denn der Mensch kann nur wenige Minuten ohne Sauerstoff auskommen. Zum einen, weil Gase wie das O_2 im Körper praktisch nicht zu speichern sind. Zum anderen benötigen fast alle biochemischen Reaktionen in einer Zelle Energie, die ohne O_2 nicht erzeugt werden kann. Ohne Energie aber kein Stoffwechsel, ohne Stoffwechsel kein Leben.

Und eben deshalb ist das Atmen so unverzichtbar für das Leben. □

Horst Rademacher, 50, ist Wissenschaftsjournalist in San Francisco.

Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Eckhard Kaukel**, Leiter der Lungenabteilung am Thoraxzentrum Hamburg, Allgemeines Krankenhaus Harburg.



Die Evolution und der Faktor Wahnsinn

So wie sich der Homo sapiens entwickelt hat – war das eigentlich in allen Details folgerichtig? Ein paar Gegenvorschläge

Eine Sache ist, was den menschlichen Körper betrifft, besonders seltsam. Unseren Körper spüren wir meistens nicht, obwohl er doch relativ wichtig ist für uns. Wir setzen seine Existenz sozusagen stillschweigend voraus, sobald wir morgens aufwachen. Nach meiner privaten Zählung gibt es nur vier spezielle Gelegenheiten, bei denen einem das Vorhandensein des Körpers schlagartig bewusst wird und bei denen sich der Körper in seiner Bedeutung für eine gewisse Zeit vor den Ärger im Büro, das Geldproblem sowie die diversen Beziehungsprobleme schiebt: und zwar beim Sport, beim Sex, bei Krankheiten aller Art sowie bei den beiden Körperrevolutionen „Pubertät“ und „Altwerden“.

Wenn ich mir all die Texte hier in diesem Heft durchlese, denke ich: Alles muss genau so sein, wie es beschrieben wird. So wie wir sind, sind wir einfach perfekt. Unser Körper ist eine geniale Erfindung, mit dem ganzen Chymotrypsin überall und mit der famosen Pankreas-Amylase, mit dem Blut, das in seiner Zusammensetzung dem Meerwasser ähnelt – nicht etwa dem Wasser der Elbe, das wäre gesundheitlich ganz übel! – und mit den 1,5 Litern Gas, die unser Darm Tag für Tag majestätisch in die Welt bläst, ähnlich, wie der Wal es mit seiner Atemluft tut.

Wenn ich aber ein paar Minuten länger darüber nachdenke, bin ich nicht mehr dieser Ansicht. In der Geschichte der Menschheit gibt es fast immer eine Alternative. Und natürlich den Zufall. Ohne Hochwasser und Irak-Krise hätte Gerhard Schröder die Wahl im Jahre 2002 vermutlich verloren. Dass alle drei Dinge zeitlich eng zusammenkamen, war Zufall. Über den Körper des amerikanischen Prä-

sidenten Abraham Lincoln hält sich hartnäckig die Geschichte, dass ihm einmal ein kleines Mädchen, elf Jahre alt, einen Brief geschrieben hat. Lincoln war damals noch nicht Präsident. Er sei ein toller Politiker, schrieb das Mädchen, aber er habe leider ein viel zu dünnes Gesicht. Er würde besser aussehen, und mehr Leute würden ihn wählen, wenn er sich einen Bart stehen lasse. Lincoln tat es. Später erzählte er, dass er diesem Mädchen seinen Wahlsieg verdanke. Stimmt vielleicht.

Wieso soll es in der Naturgeschichte völlig anders zugehen? Wissenschaftler mögen den Zufall nicht besonders, sie reden nicht gern darüber. Aber auf diesen Seiten hier befinden Sie sich ja ohnehin in der ganz besonders unwissenschaftlichen Zone des Heftes.

Es hätte ja vielleicht auch alles anders kommen können. Eine kleine Mutation zum Beispiel, die man zuerst gar nicht sieht. Zur Zeit der frühen Menschen herrscht mal wieder eine Hungersnot, das Wild wird knapp, vielleicht hat es zu selten geregnet. Die frühen Menschen essen aus Hunger wochenlang Gras und Blätter, kriegen erst Blähungen, dann furchtbaren Durchfall und werden dahingerafft, alle – bis auf ein paar, denen das Gras überraschend gut bekommt.

Diese Individuen schaffen es, massenhaft pflanzliche Zellulose in ihrem Magen zu verdauen. Normalerweise braucht der Mensch Mischkost, ein bisschen Salat ist bekanntlich gesund, aber immer nur Rohkost ohne Soße, das geht auf die Dauer nicht. Diese Menschen hier aber kommen mit Grünfütter klar, wegen einer zufälligen kleinen Mutation. Und sie vermehren sich, bis es fast nur noch Grünfütteresser gibt.

Die Folge: Unser Körper würde heute völlig anders aussehen. Wir hätten im Laufe der Zeit einen größeren Verdauungstrakt bekommen und würden vielleicht wieder auf allen vieren gehen, wegen der Blähbäuche und um das leckere Gras besser im Blick zu haben. Wir hätten das Feuer nicht gebraucht, um unsere Nahrung zu garen, und wir hätten keine Waffen gebraucht, um zu jagen.

Dies wiederum hätte unser soziales Leben und unseren Charakter beeinflusst. Wir wären friedlich, leider auch nicht ganz

»Meine Bakterien: Wenn ich sterbe, geht ihre Welt unter. Ich bin ihre Sonne und ihr Gott!«

so intelligent. Wir wären eine Art menschliche Kühe, mit malmenden Wiederkäu-erkiefern und wunderschönen, sanften, leicht blöden Augen.

Das ist selbstverständlich Spekulation, und zwar eine besonders unwissenschaftliche und unwahrscheinliche. Denn ich nehme an, dass die pflanzenfressenden Kuhmenschen früher oder später von kriegerischen Allesfressermenschen ausgerottet worden wären, wie ja auch die kürzlich entdeckten Zwergmenschen auf der indonesischen Insel Flores irgendwann wieder von der biologischen Bildfläche verschwunden sind. Die Natur kann in solchen Sachen echt hart sein.

Manche Details weiß unsereins ja noch aus der Schule. Zum Beispiel: Der Körper kann sehr gut Fett speichern, Sauerstoff dagegen speichert er nicht. Hungern geht deshalb wochenlang, Luft anhalten geht nur ein paar Minuten. Luft gibt es halt immer, fettreiche Nahrung dagegen gibt es nicht immer. Auf einem Planeten mit reichlich Nahrung und wenig Sauerstoff müsste es logischerweise genau umgekehrt sein.

Diese Außerirdischen würden pausenlos essen, ohne es zu merken, aber nur drei- oder fünfmal am Tag würden sie mit viel Genuss Luft holen, am liebsten im Kreise der Familie. Sie wären klepperdürr und würden tonnengroße Luftvorratsspeicher an ihrem Körper herumschleppen. Besonders gierige und unmäßige Atmer könnten sich fast nicht mehr bewegen, so aufgebläht wären ihre Lungenspeicher. Wenn diese Außerirdischen auf der Erde landeten, würden sie langsam an Überatmung sterben. Nein, stopp, sie würden ja innerhalb von Minuten verhungern.



Der Mensch könnte auch die Fähigkeit zur Photosynthese besitzen – warum eigentlich nicht? In diesem Fall wären wir in der Lage, aus Wasser mithilfe des Lichts Energie zu gewinnen und das Kohlendioxid aus unserer Atmosphäre in Zucker zu verwandeln. Unsere Haut wäre grün, und unsere äußere Erscheinung hätte

etwas leicht Froschiges. Wir wären extrem wetterfühlend. Im Fernsehen würden zur besten Sendezeit stundenlang Wettershows laufen. Im Büro gäbe es statt einer Kaffeemaschine eine Sprinkleranlage, unter der sich in den Pausen alle versammeln. Zu Weihnachten schenkt der Herr seiner Dame ein Döschen Luxus-Dünger. Wassertöpfe wären so wertvoll und so umkämpft wie bei uns die Ölvorkommen.

Klingt verrückt? Bedenken Sie, dass sogar jetzt, bei uns, hier und heute, sich unsere Körper und ihre Möglichkeiten verändern. Ein heute geborenes Mädchen hat eine realistische Chance, seinen 100. Geburtstag zu erleben – nicht als seltenes Glück, sondern beinahe als Regelfall. Gestern war das noch eine Utopie. Womöglich werden einige unserer Kinder sogar 110 oder 120.

Der Körper ist innerhalb weniger Jahrzehnte zumindest in einigen Details historisch wandelbar. Beweis: Korea. Bei den Koreanern ist es so, dass die schlecht ernährten, brutal unterdrückten Nordkoreaner unverändert klein bleiben, während die wohlversorgten Südkoreaner im Durchschnitt immer größer werden. Vor ein paar Jahrzehnten waren sie im Norden und Süden noch gleich groß. Jetzt liegt die durchschnittliche Nordkoreaner-Länge,

ermittelt an Flüchtlingen, bei 159 Zentimetern. Ein Südkoreaner-Körper dagegen erstreckt sich bereits auf durchschnittlich 165 Zentimetern.

Noch ein paar hundert Jahre Steinzeit-Kommunismus in Nordkorea, und sie schrumpfen. Dann gibt es auf der Erde womöglich wieder Zwergmenschen, die mit dünnen Ärmchen taschentuchgroße rote Fahnen schwenken, die in winzigen volkseigenen Betrieben putzige Führerbüsten von der Größe eines Playmobil-Männchens herstellen und mit ihren zwitschernden Stimmchen den jeweils regierenden Kim hochleben lassen.

Ich stelle mich vor den Spiegel. Eigentlich ist mein Körper okay. Ich habe mich an ihn gewöhnt – und denke fast nie darüber nach, dass das, was ich im Spiegel sehe, einen Schlauch von etwa fünf Meter Länge enthält, dazu 100 000 Kilometer Adern, 100 Quadratmeter Dünndarm und 300 Millionen Lungenbläschen. Mein Körper produziert täglich zwei Liter Speichel, vorausgesetzt, ich trinke reichlich. In meinem Magen befindet sich Salzsäure. Inwendig werde ich von einem Bakterienzoo bevölkert, über 100 verschiedene Arten. Die Zusammensetzung des Bakterienzoo ist bei jedem anders und typisch für die jeweilige Person.

Ich habe also nicht nur unverwechselbare Fingerabdrücke, eine einmalige Iris im Auge und eine einmalige DNS, nein, ich besitze auch eine weltweit einmalige Darmflora, die wie ein Fingerabdruck zum Zweck der Identifikation eingesetzt werden könnte, aber das kommt hoffentlich niemals in Mode. Aber ich könnte meine Darmflora, falls ich ein bildender Künstler wäre, zum Gegenstand einer Ausstellung machen.

Meine Bakterien. Wenn ich sterbe, geht ihre Welt unter. Ich bin ihre Sonne und ihr Gott!

Wahnsinn.

Harald Martenstein hat sich bei seinen Texten unter anderem auf die „Was wäre, wenn...“-Kolumnen der GEO-Autorin Johanna Romberg gestützt.

Fig. 1.

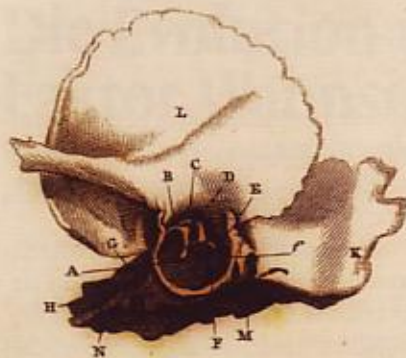


Fig. 3.



Fig. 2.



Fig. 4.



Fig. 5.

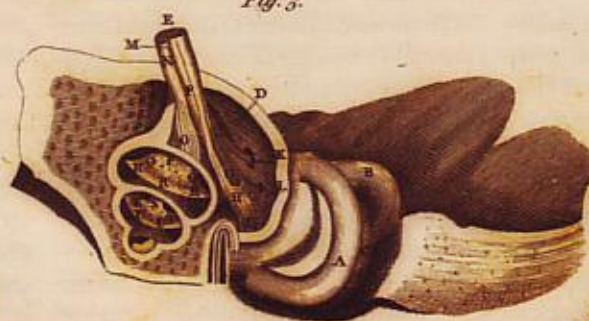


Fig. 6.

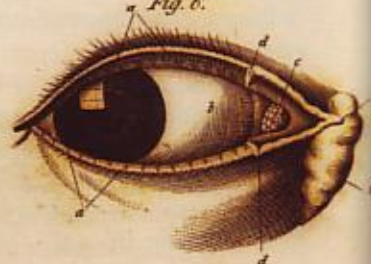
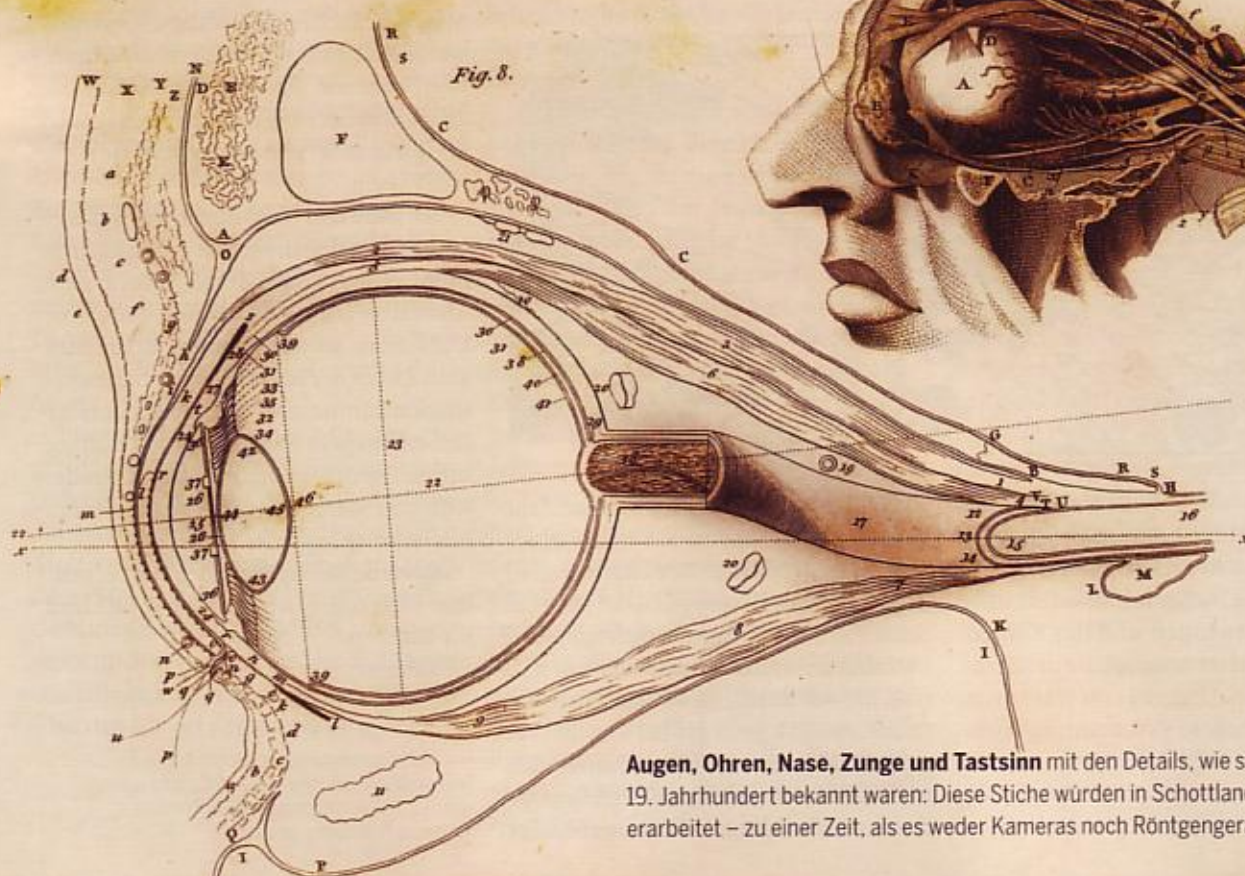


Fig. 7.



Fig. 8.



Augen, Ohren, Nase, Zunge und Tastsinn mit den Details, wie sie im 18. und 19. Jahrhundert bekannt waren: Diese Stiche würden in Schottland für Lehrtafeln erarbeitet – zu einer Zeit, als es weder Kameras noch Röntgengeräte gab

Fig. 1.

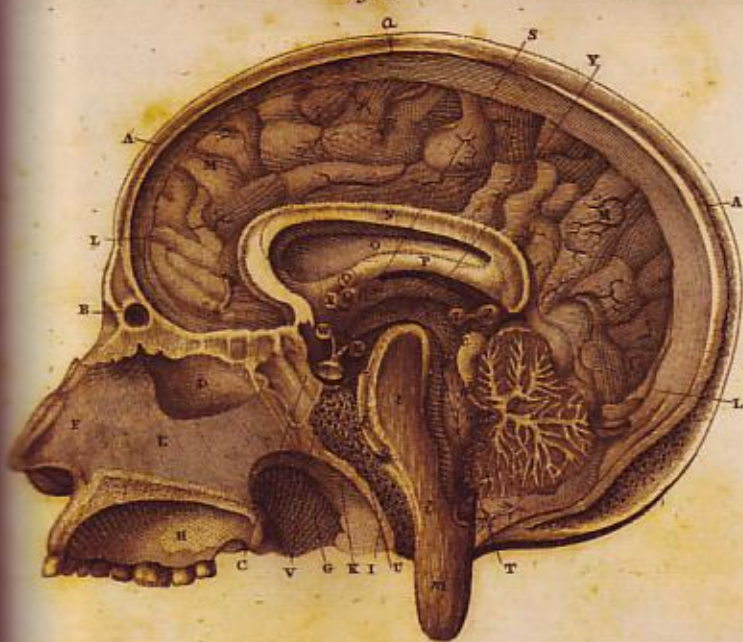


Fig. 2.

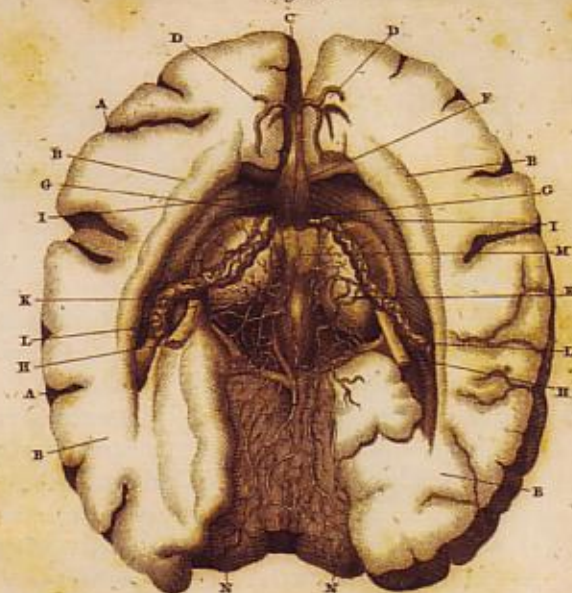


Fig. 3.



Fig. 4.

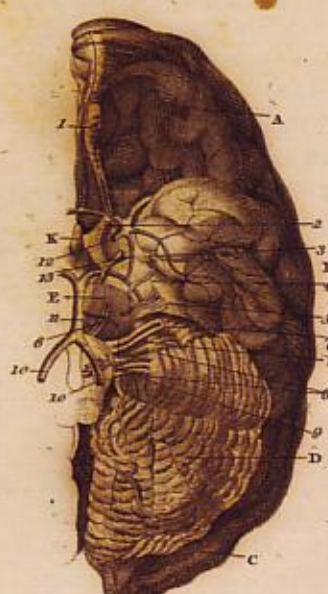


Fig. 5.



Fig. 6.



Text: Jürgen Bischoff

Das Reich der Sinne

Unsere fünf Sinnesorgane vermitteln dem Hirn die Formen und Farben der Welt. Sie registrieren deren Geräusche, deren Gerüche, deren Geschmack und helfen uns zu unterscheiden, was oben und unten ist: Sie sind unsere Tore zur Wirklichkeit



Wenn die Menschen wüssten, wie viel Arbeit es macht, morgens aufzustehen – viele würden einfach liegen bleiben. Jeden Tag. Selbst dann, wenn sie zu jenen gehören, die gleich nach dem ersten Ton des Weckers mit der Frühgymnastik beginnen. Denn Aufstehen ist eine ziemlich komplizierte Angelegenheit. Zumindest für den menschlichen Körper.

Schließlich beschleunigt dieser quasi von null auf hundert, sobald neben dem Bett der Wecker klingelt. Eines nach dem anderen gehen die fünf klassischen **Sinnesorgane** wieder in vollen Betrieb. Erst dringt das Läuten des Weckers an das Ohr, dann tasten die Finger nach dem Schalter der Nachtschlampe, und fast im selben Moment blinzeln die Augen in die plötzliche Helligkeit; im Badezimmer schließlich ist der Duft des Duschgels zu riechen – alles Empfindungen, die der Körper in Sekundenbruchteilen bewältigen muss.

Was wir allmorgendlich erleben und nach Jahren der täglichen Wiederholung kaum noch registrieren, ist in Wirklichkeit eine Abfolge höchst komplexer Vorgänge, die nur einem einzigen Zweck dienen: dass wir die Welt, in der wir leben, überhaupt wahrnehmen.

Dank der fünf Sinnesorgane – Augen, Ohren, Haut mit Tastsinn, Nase, Zunge – erkennen wir Tiere, Pflanzen oder andere Menschen, hören wir, was um uns herum vor sich geht, wissen wir, wie sich Wasser oder ein Mantelstoff anfühlt, können wir Gerüche

und Geschmäcker, Genießbares von Ungenießbarem unterscheiden.

Damit wir die Komplexität unserer Umwelt auch wirklich erfassen und uns entsprechend in ihr einrichten können, sind zumeist an einer einzigen Wahrnehmung gleich mehrere Sinnesorgane beteiligt. Den Morgenkaffee beispielsweise nehmen wir nur dann als solchen wahr, wenn er so aussieht wie das uns vertraute Getränk, so riecht und so schmeckt. Würde die Flüssigkeit in der Tasse zwar wie Kaffee riechen und schmecken, aber aussehen wie Orangensaft, würde kein sehender Mensch sie als Kaffee identifizieren – ein Blinder hingegen sehr wohl.

An dem, was wir schmecken, ist wiederum zum erheblichen Teil die Nase beteiligt; unsere Zunge allein wäre viel zu unempfindlich für die Vielzahl der Geschmacksnuancen.

Aber auch wenn Auge und Ohr, Nase und Zunge sowie der Tastsinn der Haut ganz unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen haben, ist all diesen Sinnesorganen doch eines gemeinsam: Ihre **Sinneszellen** sorgen dafür, dass von außen kommende Reize mittels so genannter **Rezeptoren** in elektrische Impulse verwandelt werden, die das Gehirn zu Wahrnehmungen verarbeitet.

Dieses filtert aus der Fülle der zeitgleich einströmenden Reize diejenigen heraus, die gerade wichtig sind: So holt uns morgens nicht etwa der einsetzende Straßenlärm aus dem Schlaf, sondern erst der Ton des Weckers.

Durchschnittlich 100 Millisekunden – etwa so lange, wie ein Lidschlag dauert – braucht der Schall vom Ohr zum Hirn: Laute Töne dringen schneller ins Bewusstsein als leise, höhere rascher als tiefe. Denn im Frequenzbereich zwischen 2000 und 5000 Hertz ist das menschliche Gehör am empfindlichsten. Ein vor sich hin brummender Wecker hätte als Wachmacher gegen einen lauten Piepser kaum Chancen.

bis wir jedoch dieses Geräusch wahrnehmen, hat es im Ohr selbst bereits eine gehörige Strecke zurückgelegt: Aufgefangen vom Trichter der Ohrmuschel, dringen die von dem Wecker ausgesandten Schallwellen durch den Gehörgang ans **Trommelfell**. Dieses überträgt die Schwingungen auf die beweglichen Gehörknöchelchen des Mittelohres, die sie weiterleiten zum Innenohr, das im harten Felsenbein unseres Schädels eingebettet ist.

Dort bringt der Schall in der **Cochlea**, der Schnecke, Flüssigkeiten und feine **Membranen** in Schwingungen, was wiederum einen Teil der etwa 16 000 Haarzellen erregt. Diese Zellen „übersetzen“ den mechanischen Reiz in einen Nervenimpuls, der über die Hörbahn in die **Großhirnrinde** geleitet wird.

Und erst jetzt kommt der Ton des Weckers uns im Wortsinne „zu Bewusstsein“: Zeit zum Aufstehen. Dabei können wir trotz der Dunkelheit bereits mit dem Gehör annä-

hernd feststellen, wo im Raum sich der Wecker befindet: Das Gehirn errechnet aus den in beiden Ohren zu leicht unterschiedlicher Zeit eintreffenden Signalen den ungefähren Standort der Tonquelle. Und ziemlich verschlafen ertasten wir nun den Schalter der Bettlampe.

Der Tast- oder Berührungssinn entwickelt sich beim Menschen als erster. Bereits von etwa der siebten Schwangerschaftswoche an nimmt ein Fetus Berührungen wahr. Hören, riechen und schmecken kann ein werdender Mensch dagegen erst im letzten Drittel einer Schwangerschaft, sehen erst nach der Geburt. Anders als die anderen lässt sich der Tastsinn nicht willentlich unterdrücken – selbst während des Schlafes bleibt er aktiv: Viele Millionen Sensoren dicht unter der Hautoberfläche informieren das Gehirn unablässig über die Lage von Körper und Gliedern.

Wenn nun am Morgen die Hand im Dunkeln nach dem Lichtschalter tastet, funktioniert sie zugleich als Augenersatz. Und zwar buchstäblich: Kleinkinder haben in einem Test Gegenstände, die sie zuvor zwar hatten berühren, nicht aber sehen dürfen, später mit den Augen wiedererkannt.

Während wir also die Gegenstände neben dem Bett ertasten – die Lesebrille, das aufgeschlagene Buch, den Knopf des Weckers –, entsteht ein Bild davon in unserem Kopf. Je länger wir tasten, umso genauer wird dieses Bild. Denn intensiver als mit den Finger-



Im Querschnitt offenbare
der menschliche Kopf Schichten
wie eine Zwiebel, notierte
Leonardo da Vinci gegen Ende
des 15. Jahrhunderts zu
diesen Zeichnungen. Während
er das Auge annähernd rich-
tig darstellte, gelang ihm das
Gehirn mangels besserer
Kenntnisse offenbar weniger
gut: Er hielt es für dreigeteilt

[Fast 90 Prozent aller Eindrücke aus der Umwelt registriert der Mensch mithilfe zweier kleiner Hohlkugeln – seinen Augen]

spitzen fühlt der Mensch nur mit den Lippen, der Zunge und den erogenen Zonen. In jeder Fingerbeere arbeiten etwa 2000 Rezeptoren als Zuträger für den Spürsinn. Mit rund 40 Metern pro Sekunde jagen die Tasteindrücke als elektrische Reize durch die Nervenbahnen und brauchen von der Hand bis zum Gehirn nur etwa

30 Millisekunden, sind also gut zwei Drittel schneller als der Schall auf der Strecke vom Ohr zum Hirn.

Und so ist der Lichtschalter rasch gefunden, mit dem wir die Nacht für uns beenden. An die plötzliche Helligkeit müssen die Augen sich allerdings erst gewöhnen. Denn während der Dunkelheit waren die

lichtempfindlichen Rezeptoren auf der **Netzhaut** quasi auf Stand-by-Betrieb geschaltet. Die **Pupillen**, die sich durch Erweiterung oder Kontraktion der Iris der jeweils einfallenden Lichtmenge anpassen wie die Blende einer Kamera (siehe Kasten unten), können nachts bis zu acht Millimeter weit geöffnet sein.

Schalten wir die Nachttischlampe an, sorgen zwei kleine Muskeln eilig dafür, dass sich die Pupillen auf rund zwei Millimeter verengen, denn auf zu viel plötzliche Helligkeit reagiert unser Gehirn mit Schmerzempfinden.

Ohnehin sind die Aufgaben, die unsere Augen – anatomisch zwei Hohlkugeln von je etwa

Das Auge

Verkehrte Welt

Alles, was wir sehen, steht zu Anfang auf dem Kopf

Zu etwa drei Vierteln besteht der menschliche Augapfel (*Bulbus oculi*), der in der knöchernen Augenhöhle eingebettet ist, aus dem gallertartigen Glaskörper. Er ist von einer Hülle aus Netz-, Ader- und Lederhaut umgeben. An der Augenvorderseite geht die Lederhaut in die durchsichtige und ihrerseits von der Bindehaut gehaltene Hornhaut über. Unter der Lederhaut liegt die Aderhaut, die insbesondere die **Netzhaut** (Retina) mit Nährstoffen versorgt. Sie geht nach vorn in den Strahlenkörper und dann in die **Regenbogenhaut** (Iris) über. Diese umschließt ringförmig die auf dem Glaskörper liegende Linse und spart in ihrem Zentrum das Sehloch, die Pupille, aus.

Die Hornhaut bricht die Lichtstrahlen so, dass sich das anvisierte Objekt auf der Netzhaut umgekehrt und verkleinert abbildet. Scharf gestellt wird dieses „Lichtbild“ von Linse und Iris: Der **Ziliarmuskel** im Strahlenkörper krümmt oder streckt die Linse je nach Entfernung des Objekts, und die Iris reguliert durch Verengung oder Erweiterung der Pupille die einfallende Lichtmenge. „Registriert“ wird das Bild auf der Netzhaut durch zwei Arten von Sehzellen: Rund 120 Millionen **Stäbchen** unterscheiden hell und dunkel, sieben Millionen **Zapfen** differenzieren bei Licht die Farben. Menschen und viele andere Primaten verfügen über drei Zapfentypen zur Unterscheidung von Rot, Blau und Grün; alle anderen Säugetiere besitzen höchstens zwei. Inzwischen gibt es Hinweise auf eine dritte Sehzellenart – eine, die auf der menschlichen Retina Lichtintensität und -dauer registriert und so das Tag-Nacht-Empfinden, die „innere Uhr“ reguliert.

Strahlenkörper

Regenbogenhaut (Iris)

Pupillenöffnung

Hornhaut

vordere Augenkammer

Glaskörper

Linse

Sehachse (gelbe Linie)

Horizontale (blaue Linie)

Blinder Fleck

Lederhaut

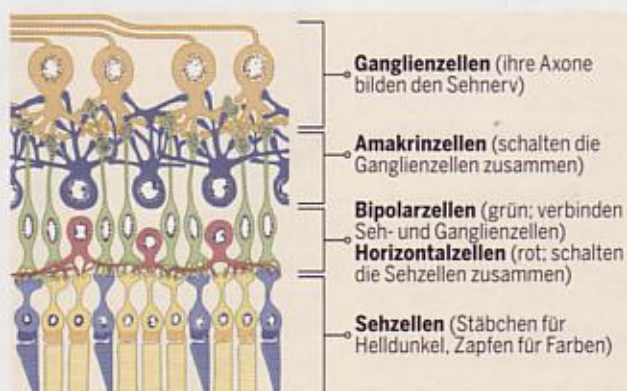
Aderhaut

Netzhaut (Retina)

Gelber Fleck

Sehnerv

Der Augapfel: 130 Millionen Sehzellen in der Netzhaut



Aufbau der Netzhaut, die im Auge das Licht registriert

Der Farbstoff Rhodopsin in den Stäbchen und eine ähnliche Verbindung in den Zapfen wandeln Lichtsignale in elektrische Impulse. Diese werden von den Seh- an anliegende Nervenzellen weitergeleitet und von diesen über den Sehnerv an die visuellen Zentren des Gehirns.

Wo in der Retina die „Kabel“ der Nervenzellen in den Sehnerv übergehen, befindet sich der **blinde Fleck** – eine Stelle, an der mangels Lichtrezeptoren kein Licht registriert wird. Dagegen häufen sich im **gelben Fleck** – nur drei Millimeter daneben – die Zapfen so sehr, dass er zum Ort des schärfsten Sehens wird.

Ihre Farbe erhalten die Augen durch Zellen im Iris-Gewebe, die das Pigment **Melanin** produzieren: Viel Melanin lässt die Augen braun, wenig grün erscheinen; fehlt es, wirken die Augen blau. Tränen schließlich zeugen nicht nur von Trauer: Bei gesunden Menschen fließen sie unablässig und säubern so Horn- und Bindehaut von Staub und Erregern.

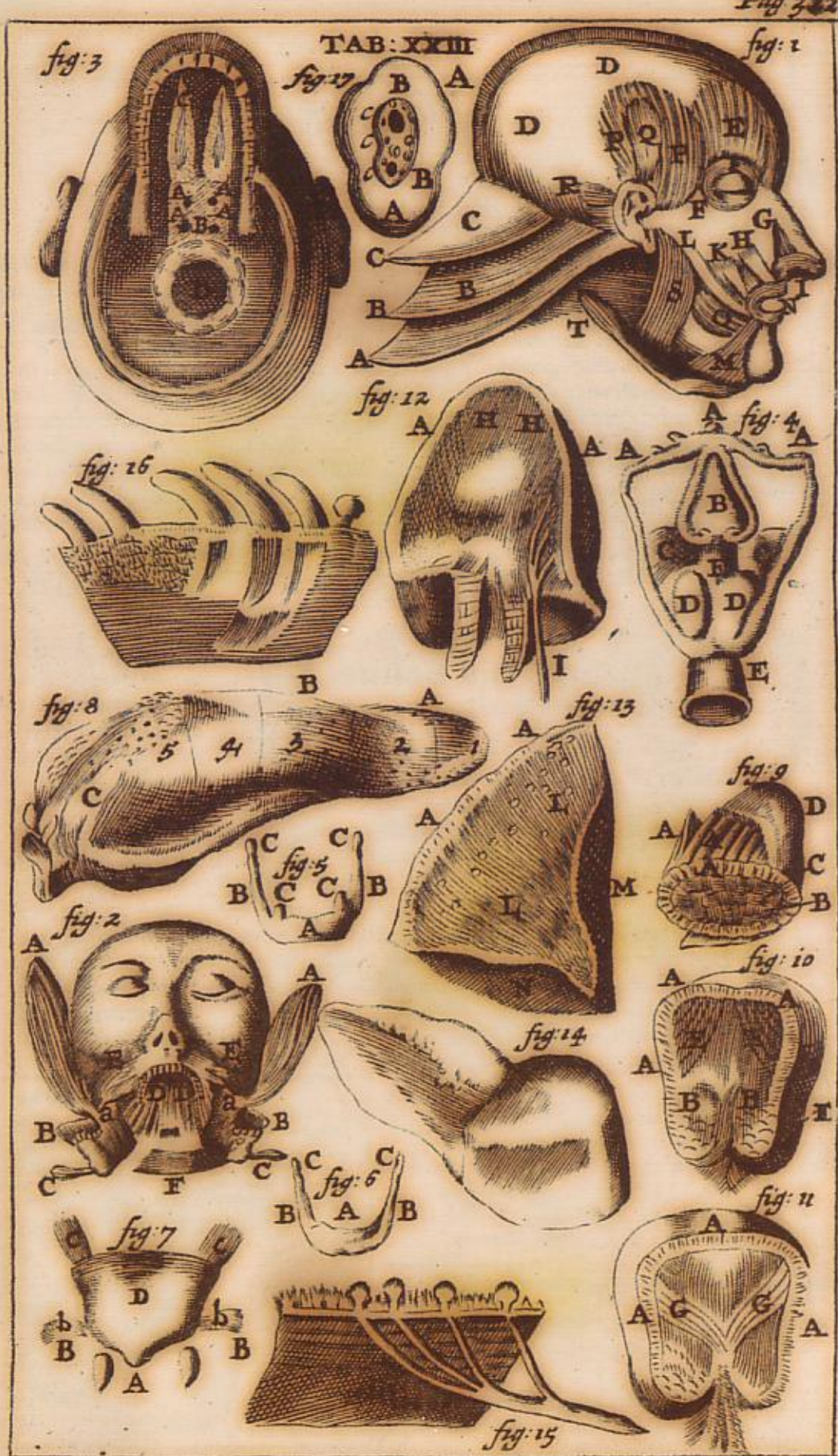
7,5 Gramm Gewicht – tagsüber zu übernehmen haben, anstrengend genug: Sie registrieren 80 bis 90 Prozent aller Eindrücke aus der Umwelt.

Entsprechend groß ist ihr Energiebedarf: Keine andere Zelle des Körpers verbraucht mehr Sauerstoff als jede der etwa 260 Millionen Sehzellen in beiden Netzhäuten, weshalb in ihnen das Sauerstoff bindende Protein Neuroglobin auch 100-mal so hoch konzentriert ist wie beispielsweise im Gehirn.

der Blick auf den Wecker zeigt: Es ist 6.30 Uhr.

Gleichsam in seine Einzelteile zerlegt, sähe dieser Vorgang etwa so aus: Die von den Leuchtziffern des Weckers ausgesandten Lichtstrahlen treffen zuerst auf die 1,3 Quadratzentimeter große Hornhaut der Augen, die das Bild der Ziffern wie ein umgedrehtes Fernrohr verkleinert. Von der Pupille reguliert, werden die Strahlen dann durch die **Linse** geschickt, die sich auf die Entfernung des betrachteten Objektes scharf stellt.

Nun durchquert das Licht den Glaskörper im Augapfel und trifft an dessen Rückwand auf die **Netzhaut**. Hier fügen die Strahlen sich wieder zum Bild: immer noch stark verkleinert, seitenverkehrt, auf den Kopf gestellt – und nur in einem kleinen Bereich wirklich scharf. Sehzellen nehmen die Lichtsignale auf: Drei Arten von so genannten **Zapfen** reagieren auf Farben, und bei schlechtem Licht sorgen die **Stäbchen** auf der Netzhaut da-



Die Anatomie des Kopfes und der Zunge gibt dieser Stich von 1686 wieder. Muskeln, Schädelknochen und sogar Geschmackspapillen (Fig. 15) sind bereits recht präzise dargestellt

[Während der Bewegung erlaubt das Gleichgewichtsorgan nur die Wahrnehmung der Beschleunigung, nicht aber die der Geschwindigkeit]

für, dass wir überhaupt etwas erkennen.

Wie in einem Netzwerk die Computer mit dem Server sind die Rezeptoren der Netzhaut mit dem Sehnerv verkabelt, der die visuellen Informationen an die Sehrinde im **Hinterhauptslappen** des Großhirns schickt. Dort wird das Bild vom Kopf wieder auf die Füße gestellt, seitenrichtig gedreht und die Unschärfe herausgerechnet.

Resultat: Wir sehen klar und deutlich, dass der Wecker 6.30 Uhr zeigt – höchste Zeit, aus dem Bett zu steigen.

Das allerdings hört sich leichter an, als es ist. Denn ab sofort nehmen Millionen von Sinneszellen ihre Arbeit auf, die zwar nicht zu den klassischen fünf Sinnesorganen gehören, ohne die wir aber in der Welt jeden Halt und jede Orientierung verlören.

So sorgen etwa die **Rezeptoren** des Bewegungsapparates unter anderem für das reibungslose Zusammenspiel von Muskeln und Gelenken und verhindern Überbelastung und Überdehnung. Und dass wir überhaupt oben von unten und rechts von links unterscheiden und uns in dieser 3-D-Welt zurechtfinden können, verdanken wir dem Gleichgewichtssinn.

Dieser registriert beständig die Lage unseres Körpers im Raum und ermöglicht so dem Gehirn, bei Bedarf Befehle zur Positionskorrektur auszugeben – damit wir uns zum Beispiel auf abschüssiger Strecke nicht wie sonst senkrecht zum Untergrund bewegen. Gleichzeitig stellt der Gleichgewichtssinn fest, ob wir im Augenblick beschleunigt oder abgebremst werden.

Das Ohr

Von Muschel bis Schnecke

Über viele Stationen dringt der Schall ins Bewusstsein

Die Ohrmuschel empfängt wie ein Trichter die Schallschwingungen der Luft. Der bis zu 35 Millimeter lange äußere Gehörgang bündelt und lenkt diese dann auf das **Trommelfell**. Diese Membran – Durchmesser: etwa ein Zentimeter – trennt das Außen- vom Mittelohr und überträgt die Schallschwingungen auf die Gehörknöchelchen in der Paukenhöhle: und zwar auf „Hammer“, „Amboss“ und „Steigbügel“.

Je lauter der Schall, desto stärker dessen Druck auf das Trommelfell und umso heftiger bewegen sich die Gehörknöchelchen. Am Steigbügel setzt der *Musculus stapedius* an. Ist der Lärm lauter als etwa 75 Dezibel, spannt sich dieser mit sieben Millimeter Länge kleinste quer-gestreifte Muskel im Körper zusammen mit anderen an und verhindert so u. a. allzu kräftige Schwingungen des Steigbügels. Der Steigbügel

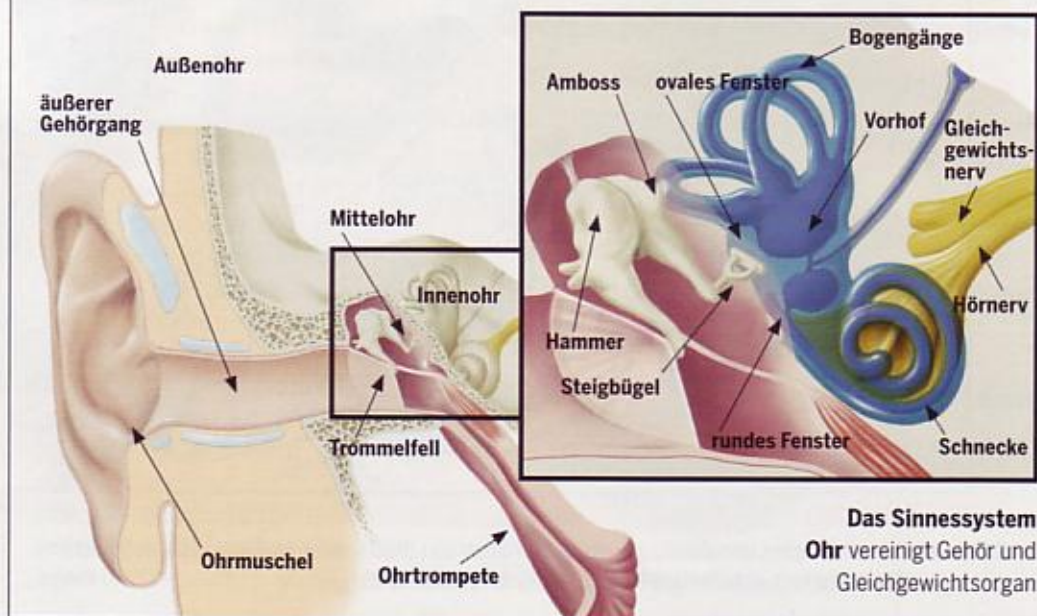
überträgt nun den Schall auf eine weitere Membran, das „ovale Fenster“, den Übergang zum Innenohr. Und damit in ein Gangsystem, das sich in das **knöcherne Labyrinth** und das darin befindliche **häutige Labyrinth** gliedert. Den Raum zwischen beiden füllt die **Perilymphe**, während sich im häutigen Teil die **Endolymphe** befindet.

Das knöcherne Labyrinth besteht aus drei großen Abschnitten – dem Vorhof, an dem zur einen Seite die Bogengänge anschließen und der zur anderen Seite in die Schnecke (*Cochlea*) übergeht. Vorhof und Bogengänge enthalten die Sinneszellen des Gleichgewichtssinns, während die Cochlea das Hörorgan ist.

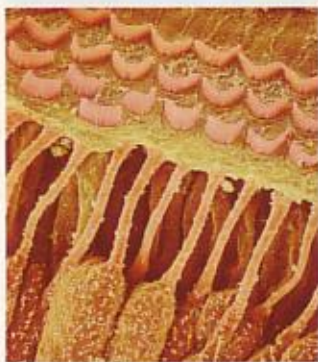
Die Vibrationen des ovalen Fensters lösen in der Perilymphe Schwingungen aus, die im Takt der Schallsignale an den Membranhäuten der Cochlea entlangwandern und dabei die mit Härchen besetzten vielen tausend Sinneszellen des dortigen Corti-Organ stimulieren. Diese setzen die Schwingungsenergie in biochemische Signale um, die dann der Hörnerv in neuronale Impulse wandelt und über die Hörbahn ins Gehirn schickt.

Bislang hat das Sinnessystem Ohr „hoch“ von „tief“ und „laut“ von „leise“ getrennt. Bewusst wird der Schall erst im Gehirn wahrgenommen, wo Milliarden Nervenzellen die eintreffenden akustischen Signale verarbeiten.

Diesen Prozess rationalisiert das Gehirn, indem es im Laufe des Menschenlebens Millionen „Schablonen“ anlegt, mit denen zum Beispiel typische Tonmuster, etwa der Klang einer Geige, erkannt und häufig wiederkehrende Laute identifiziert werden. Allerdings geraten die Schablonen bei längerer Nichtbenutzung in Vergessenheit.



Angesiedelt sind die Gleichgewichtsdetektoren im Innenohr – im Vorhof und den drei Bogengängen des **Labyrinthes**. In diesem knöchernen System befinden sich dünne Hautschläuche, gefüllt mit so genannter **Endolymphe** – der gleichen wässrigen Flüssig-



Büschel von »Stereozilien« (rosafarben) sitzen auf den Sinneszellen des »Corti-Organ« im Innenohr (1230fach vergrößert). Sie übersetzen Schallschwingungen in biochemische Impulse

keit, die beim Hören an der Erregung der Haarzellen beteiligt ist.

Dreht sich der Kopf, verhält sie sich wie Tee in einer angeordneten Tasse: Sie braucht, dem Trägheitsgesetz folgend, ein bisschen Zeit, bis sie sich ebenfalls bewegt. Nun sitzen auch in den Hautschläuchen des Gleichgewichtsorganes, wie in der Cochlea, Haarzellen, und diese machen jene Kopfdrehung sofort mit. Dabei gleiten sie in der noch ruhenden Endolymphe, krümmen sich dadurch ein wenig, was als Nervenimpuls das Gehirn erreicht.

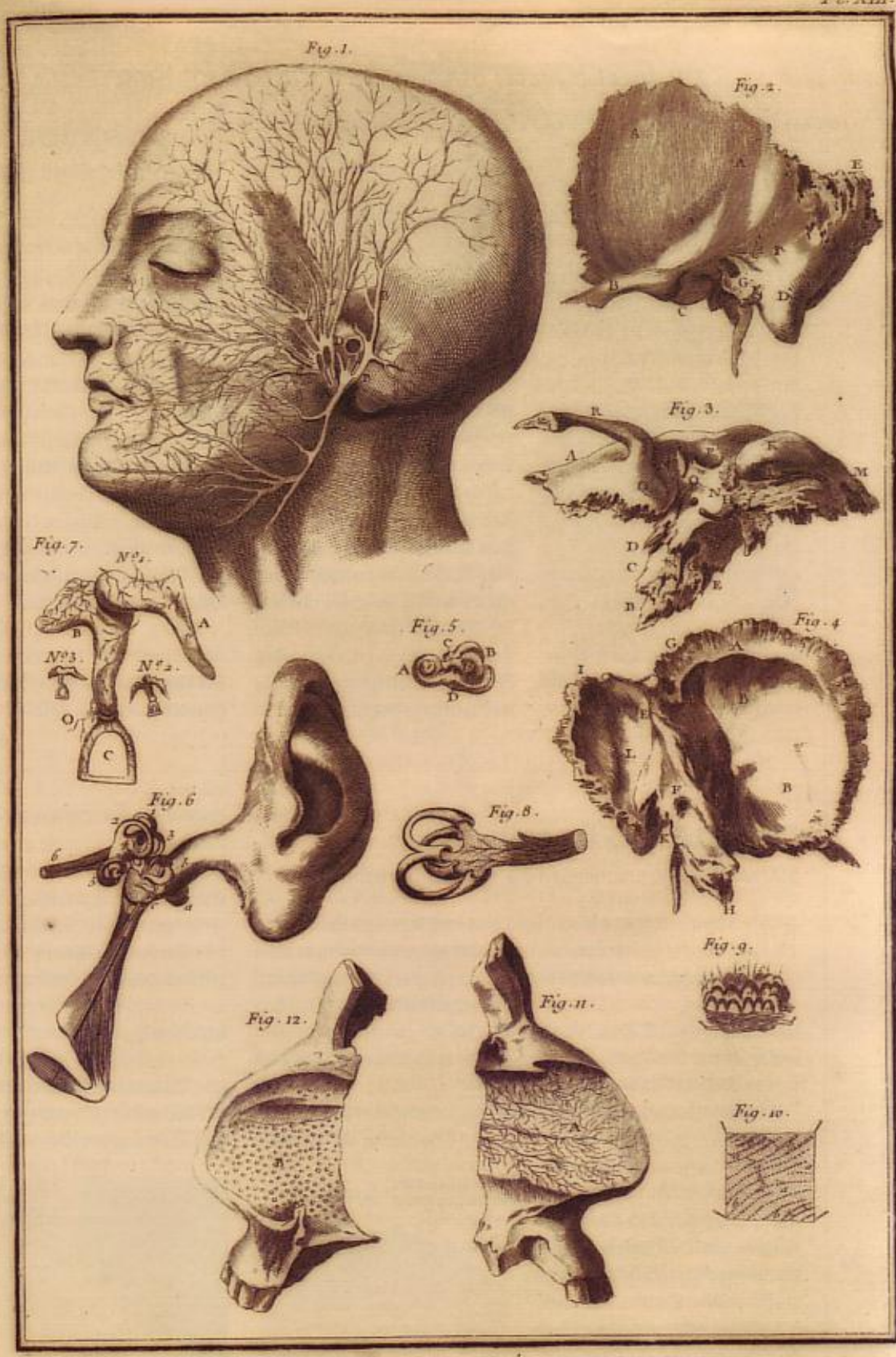
Setzt der Kopf sich indes gradlinig in Bewegung, so werden an anderer Stelle des

Labyrinths die Sinneshärdchen durch eine von kleinen Kristallen beschwerte Gelschicht angeregt, die ebenso träge verharret wie die Flüssigkeit. Wahrgenommen wird stets

eine Veränderung der Bewegung, also eine Beschleunigung, nicht jedoch eine stete Geschwindigkeit. So spüren wir zwar im Flugzeug den Schub beim Start. Fliegen wir

dann aber mit stetig gleichem Tempo unserem Ziel entgegen, bleiben Endolymphe und Kristalle im Ohr genauso regungslos wie vor uns der Saft im Glas.

Illustrationen des Ohrs aus der »Enzyklopädie der Wissenschaften, Künste und Gewerbe« – dem epochalen Werk der französischen Aufklärer Denis Diderot und Jean le Rond d'Alembert von 1751–1772



[Die Nase ist unser feinstes Sinnesorgan – allein im Bukett eines guten Rotweins identifiziert sie rund 800 unterschiedliche Düfte]

Das kurze Schwindelgefühl, welches das Aufstehen jetzt verursacht, ist schnell vorbei – der Gleichgewichtssinn hat sich „eingependelt“. Wir wenden uns der Morgentoilette zu.

Im Badezimmer duftet es nach Seife, möglicherweise auch nach Hautcreme oder Rasierwasser.

Schätzungsweise 10 000 Gerüche kann ein Mensch voneinander unterscheiden und im Gedächtnis speichern, viele davon ein Leben lang. Das

Gehirn ist zudem imstande, diese Erinnerungen beliebig zu kombinieren.

So geben Weintrinker das Bukett eines guten Rotweins schon mal als „Duft von Schwarzer Johannisbeere und Vanille“ wieder. Und der legendäre britische Önologe Michael Broadbent erschrak sich ewigen Ruhm, als er über eine Flasche des Jahrgangs 1784 aus dem Bestand des US-Präsidenten Thomas Jefferson urteilte, der Duft des Weins erinnere ihn an ein „Vollblutpferd, das auf sauberes Stroh pinkelt“.

Keine andere Sinneswahrnehmung ist derart subjektiv wie das Riechen. Und vor noch gar nicht so langer Zeit war der Geruchssinn selbst für Forscher ein Rätsel. Zwar weiß man seit langem um das Prinzip: Beim Einatmen, im Durchschnitt 12- bis 15-mal pro Minute, gelangen Geruchsstoffe in die Nase, die sich wie alle Verbindungen aus Molekülen zusammensetzen.

Diese Geruchsmoleküle docken an die Härchen der **Riechzellen** in der Nasenschleimhaut an. Die in der

Zelle dadurch entstehenden Signale werden an kleine Zellknäuel weitergereicht, gesammelt und an die Hirnrinde übermittelt. Aber was genau in unserem Riechorgan passiert, haben erst Anfang der 1990er Jahre die Amerikaner Richard Axel und Linda Buck entdeckt, die dafür den Medizin-Nobelpreis des Jahres 2004 erhielten.

Die beiden Forscher fanden beim Menschen insgesamt etwa 1000 Riech-Gene – gut drei Prozent unseres Erbgutes. Davon sind rund 350 Gene intakt;

Die Nase

Der Duft-Fänger

350 aktive Gene erschließen die Welt der Gerüche

Mehr als 20 Millionen Riechzellen sind im **Riechepithel** versammelt, dem hinteren oberen Teil der Nasenschleimhaut. In jeder dieser **Sinneszellen**, die sich etwa alle ein bis drei Monate erneuern, ist genau eines der rund 350 aktiven von insgesamt etwa 1000 „Riech-Genen“ im menschlichen Erbgut angeschaltet – und programmiert die Zellen auf die Wahrnehmung mehrerer bestimmter Moleküle im chemischen Konglomerat der Gerüche.

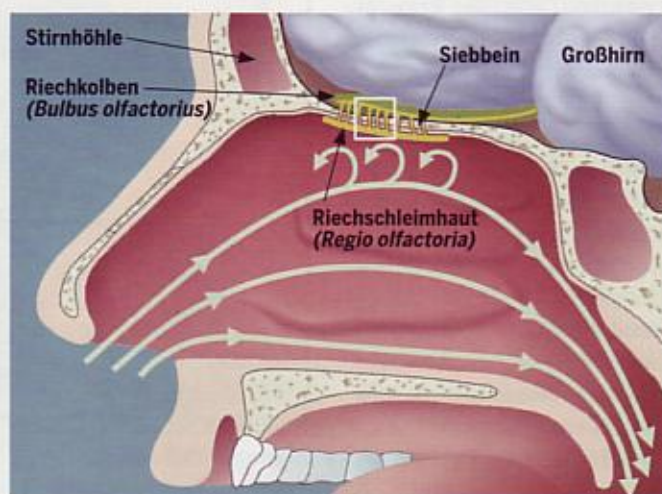
Mit der Atemluft in die Nase gesogen, docken diese Moleküle an den **Zilien** an. Diese feinen Haare auf der Oberfläche der Riechzellen enthalten jeweils Ketten von Aminosäuren. Mit einem Ende ragen diese aus den Zilien und fangen die Duftmoleküle ein. Innen werden daraufhin Botenstoffe aktiviert, worauf die Zellmembran mit einem elektro-physiologischen Signal reagiert. Wie mit den gleichen Buchstaben zahllose Wörter aus unterschiedlichen Sprachen zu bilden sind, so ergeben sich aus den Geruchsmolekülen, welche die 350 **Rezeptortypen** registrieren können, Tausende mögliche Duftkombinationen. Ihre Signale senden die Riechzellen über



lange Ausläufer, die **Axone**, in den **Riechkolben**. In dieser entwicklungs- geschichtlich sehr alten Gehirnregion „sortieren“ etwa 1000 bis 2000 kleine Zellknäuel, die **Glomeruli**, die Signale vor, denn in jedem enden nur Axone von Riechzellen mit jeweils gleichen Rezeptortypen.

So gebündelt, werden die Signale zur „Riechrinde“ an der Unterseite des **Großhirns** übermittelt. Als Fliederduft oder Schwefelgestank gelangen die Riechinformationen nach ihrer Auswertung in der Riechrinde ins Bewusstsein, während ihre Verarbeitung im **limbischen System** Emotionen hervorruft. Manche Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass die Riechzellen auch bei Menschen über Zu- oder Abneigung mitentscheiden.

Riechzellen befinden sich vereinzelt auch in der Haut. Ihre Funktion dort konnte aber bisher noch nicht entschlüsselt werden.



12- bis 15-mal pro Minute atmet der Mensch neue Duftmoleküle ein

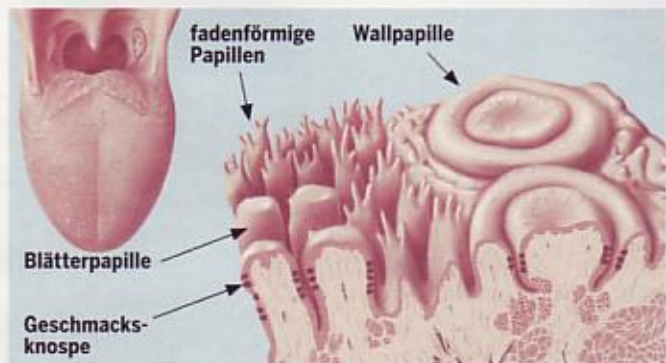
Quintett des Schmeckens

Schlicht gebaut, aber überlebenswichtig: der Geschmackssinn

Der Geschmackssinn registriert chemische Substanzen mit den **Geschmacksknospen**, die in einigen hundert Blätter-, Pilz- oder Wallpapillen sitzen – kleinen Erhebungen in der Schleimhaut auf der Zungenoberfläche. Jede Knospe enthält im Schnitt 50 Rezeptorzellen, die auf fünf für das Überleben wichtige Geschmacksrichtungen spezialisiert sind:

- Der Salzgeschmack reagiert vor allem auf Kochsalz (NaCl).
- Der Sauergeschmack warnt vor unreifen Früchten und sauer gewordenen Speisen, regt vermutlich aber auch den Appetit an.
- Der Süßgeschmack dient vor allem der Wahrnehmung kohlenhydrathaltiger Nahrung, also des für den Menschen wichtigsten Energielieferanten.
- Der Bittergeschmack wird von giftigen Substanzen in Pflanzen oder Pilzen aktiviert. „Bitterzellen“ reagieren wegen ihrer Bedeutung für das Überleben bis zu 100 000-mal empfindlicher als jene für die Geschmacksempfindung süß.
- Umami signalisiert besonders proteinhaltige Nahrungsmittel. Das Wort aus dem Japanischen bedeutet etwa „fleischig“ oder „herzhaft“. Träger dieses Geschmacks ist Glutamat, das Salz der Glutaminsäure. Viel davon findet sich in Käse, Fleisch, reifen Tomaten – und in menschlicher Muttermilch.

Während etwa das Natrium des Kochsalzes (NaCl) in den Geschmackssinneszellen eine schwache Spannung erzeugt, die dann als



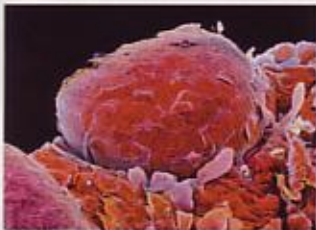
Die Zungenschleimhaut mit den Geschmacksmeldern (oben); das Innere einer Geschmacksknospe (rechts)



Neurosignal weitergegeben wird, produzieren die Rezeptorzellen für süß und bitter an ihrer Oberfläche spezielle Eiweiße, an welche die betreffenden Geschmacksstoffe andocken. Der elektrische Impuls ans Gehirn ist in allen Fällen Ergebnis weiterer Reaktionsschritte. Die Reizverarbeitung des Umami-Geschmacks ist noch ungeklärt.

Geschmackssinneszellen sind kurzlebig: Etwa alle zehn bis 15 Tage werden aus den Epithelzellen der Mundschleimhaut neue gebildet.

der Rest ist, vereinfacht gesagt, „abgeschaltet“, aber keinesfalls überflüssig. Denn ein olfaktorisches Gen, das bei einem Men-



In den Papillen auf der Zunge liegen Geschmacksknospen mit jeweils etwa 50 Rezeptorzellen (150fach vergrößert)

schon „abgeschaltet“ ist, kann beim nächsten durchaus intakt sein – und umgekehrt.

Jedes dieser Gene liefert nun die Bauanleitung für einen **Geruchsrezeptor** an der Oberfläche der Sinneshärcchen in den Riechzellen; zu dem passen wiederum die Moleküle ganz bestimmter Stoffklassen. Auf

diese Weise verfügt der Mensch dann über 350 **Geruchsrezeptor**-Typen, von denen jeder jeweils mehrere Geruchsmoleküle identifizieren kann.

In unserer Nase befinden sich ungefähr 20 bis 30 Millionen Riechzellen, und jede ist mit bis zu 20 feinsten Sinneshärcchen besetzt, den **Zilien**. Auf diesen Härcchen sitzen die Rezeptoren, und zwar auf allen Härcchen der jeweiligen Riechzelle derselbe Rezeptortyp.

Die Nase ist damit unser feinstes Sinnesorgan. Denn während die **Netzhaut** des Auges mit nur drei Farbrezeptor-Typen auskommt – je einem für Blau, Rot und Grün –, aus denen sie alle Farben bildet, kann die Nase durch die Kombination ihrer 350 Mehrfach-Rezeptoren eine riesige Palette aus Düften und Gerüchen identifizieren. Was auch dringend geboten

ist: Allein das Bukett eines ordentlichen Rotweins setzt sich aus rund 800 Einzeldüften zusammen.

Der Duft des Kaffees, der nun morgens bei vielen auf dem Frühstückstisch steht, ist aus gut 600 Signalen zusammengesetzt. Hätten wir die Nase nicht, würde er uns vermutlich erbärmlich „schmecken“. Denn der Geschmackssinn ist unter den Sinnen des Menschen der vergleichsweise am einfachsten strukturierte.

Die Geschmacksknospen auf der Zunge, die in Hunderten kleiner Erhebungen, in den **Papillen**, versteckt sind, können gerade einmal fünf Geschmacksrichtungen unterscheiden: süß, sauer, salzig, bitter und – jüngst erst entdeckt und noch wenig erforscht – Umami, den

würzigen Geschmack in proteinhaltigen Nahrungsmitteln.

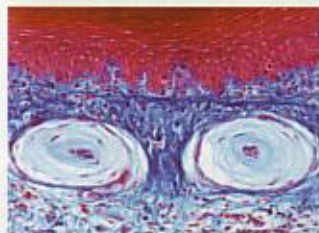
Und jenes Quintett der Geschmacksempfindungen verliert mit den Jahren auch noch an Kraft: Verfügt ein Teenager über rund 9000 **Geschmacksknospen**, sind es beim alten Menschen nur noch rund 4000.

Da ist es von Vorteil, dass die menschliche Anatomie den Duft des Morgenkaffees durch einen kleinen Kamin gleich aus der Rachenhöhle in die Nase gelangen lässt. Denn in Wirklichkeit ist sie es, die entscheidet, ob uns etwas schmeckt oder nicht.

Dabei ist vieles von dem, was wir als wohl- oder nichtschmeckend empfinden, anscheinend genetisch programmiert. Süßes zum Beispiel schmecken (und riechen) wir meistens gern, denn es signalisiert den Sinneszellen koh-

lenhydrathaltige Nahrung, aus welcher der Körper einen Großteil seines Energiebedarfs deckt. Der Gestank von Verfaultem hingegen kann bei Menschen sogar Übelkeit hervorrufen – Ergebnis eines klassischen Schutzreflexes: Fauliger Geruch ist ein Hinweis auf Ungenießbares. Ist er stark, reagiert unser Körper so, als hätten wir das Verfaulte versehentlich verschluckt: Er will sich sofort wieder davon befreien.

Gegenwärtig suchen Wissenschaftler danach, was an den Duftmolekülen eigentlich die Riechzellen anspringen



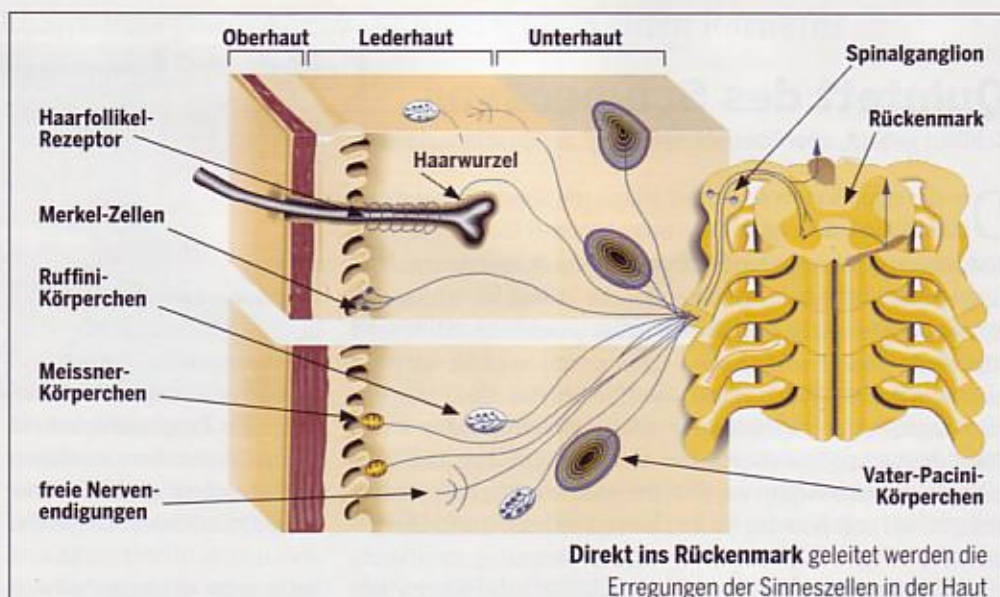
Vater-Pacini-Körperchen:

Sie registrieren in der Haut Berührungen und Vibrationen, ohne sie jedoch genau zu lokalisieren (160fach vergrößert)

lässt. Ihre unterschiedliche Oberflächenstruktur? Die Schwingungen der Moleküle?

Denn obwohl die menschlichen Sinnesorgane seit wenigstens 2500 Jahren erkundet werden, ist vieles noch offen. So wurde erst kürzlich auf der Netzhaut von Mäusen ein neuer Rezeptortyp entdeckt. Andere Forscher fanden Riechzellen auf der Haut, können aber nicht erklären, welche Funktion sie dort haben. Und wie viele Tastsinneszellen etwa in der menschlichen Haut stecken, ist bis heute ein Rätsel.

Eines allerdings ist inzwischen erwiesen: dass es vor al-



Die Haut

Netzwerk der Empfindungsmelder

Ob Schmerz, Hitze, Kälte, Berührungen oder Vibrationen – alles registriert die Haut

Die Haut ist das größte der fünf klassischen Sinnesorgane (siehe Seite 124), und der in ihr angelegte Tast- oder Berührungssinn verfügt über schätzungsweise 5, vielleicht mehr als 20 Millionen Sinneszellen. Sie sind in Ober-, Leder- und Unterhaut verteilt und kommen in drei Versionen vor: als

- Thermo-Rezeptoren, die Temperatur registrieren;
- Mechano-Rezeptoren, die auf Berührung, Druck (Intensität) und Vibration reagieren;
- Nozizeptoren, die Schmerz auslösende Reize aufnehmen.

Der größte Teil dieser Rezeptoren nimmt Reize über **freie Nervenendigungen** auf, die zwar „frei“ im Gewebe zu enden scheinen, aber tatsächlich größtenteils von einer Schutzhülle umgeben sind. Sie führen direkt ins Rückenmark (siehe Seite 100) und vermitteln relativ unscharfe Informationen.

Thermo-Rezeptoren unterteilen sich in zwei Typen: „Kalt-Rezeptoren“ treten bei Außentemperaturen von 20 bis etwa 32 Grad Celsius in Funktion, „Warm-Rezeptoren“ von 32 bis etwa 42 Grad. Allerdings operieren „Kalt-Rezeptoren“ wieder ab 43 Grad. Deshalb empfindet man auch derart heißes Badewasser anfangs als kühler als eines von nur etwa 38 Grad. Mechano-Rezeptoren sind zum Teil auch noch stärker spezialisiert und haben Tastkörperchen ausgebildet:

- Merkel-Zellen registrieren präzise Berührung und Druck auf kleiner Fläche;
- Ruffini-Körperchen melden Gelenkbewegungen und die Dehnung der Haut;
- Meissner-Körperchen und Haarfollikel-Rezeptoren verspüren Anfang, Ende und Änderungen von Berührungen;
- Vater-Pacini-Körperchen registrieren Berührungen und Vibrationen, ohne sie präzise zu lokalisieren.

Zudem unterscheiden sich Mechano-Rezeptoren in jene, die „langsam adaptieren“ (einen Reiz so lange melden, bis er verschwindet), und solche, die „schnell adaptieren“ (einen Reiz nur melden, wenn er beginnt, aufhört oder seine Intensität ändert). Zu den „langsamen“ zählen Merkel-Zellen und Ruffini-Körperchen, zu den „schnellen“ Haarfollikel-Rezeptoren, Meissner- und Vater-Pacini-Körperchen sowie die freien Nervenendigungen.

Alle diese Reizmelder sind auf der Haut sehr ungleichmäßig verteilt: Während am Rücken der Abstand zwischen den Rezeptoren mehrere Zentimeter beträgt, versammeln sich auf einer Fingerkuppe rund 2000 Sensoren, darunter 80 Merkel-Zellen.

lem das Riechen ist, das dem Menschen zeigt, wo es langgeht. Und zwar schon beim Zeugungsakt. Eine Bochumer Forschergruppe entdeckte

kürzlich an Spermien Riechrezeptoren, die ihnen den Weg zur Eizelle weisen. Seither

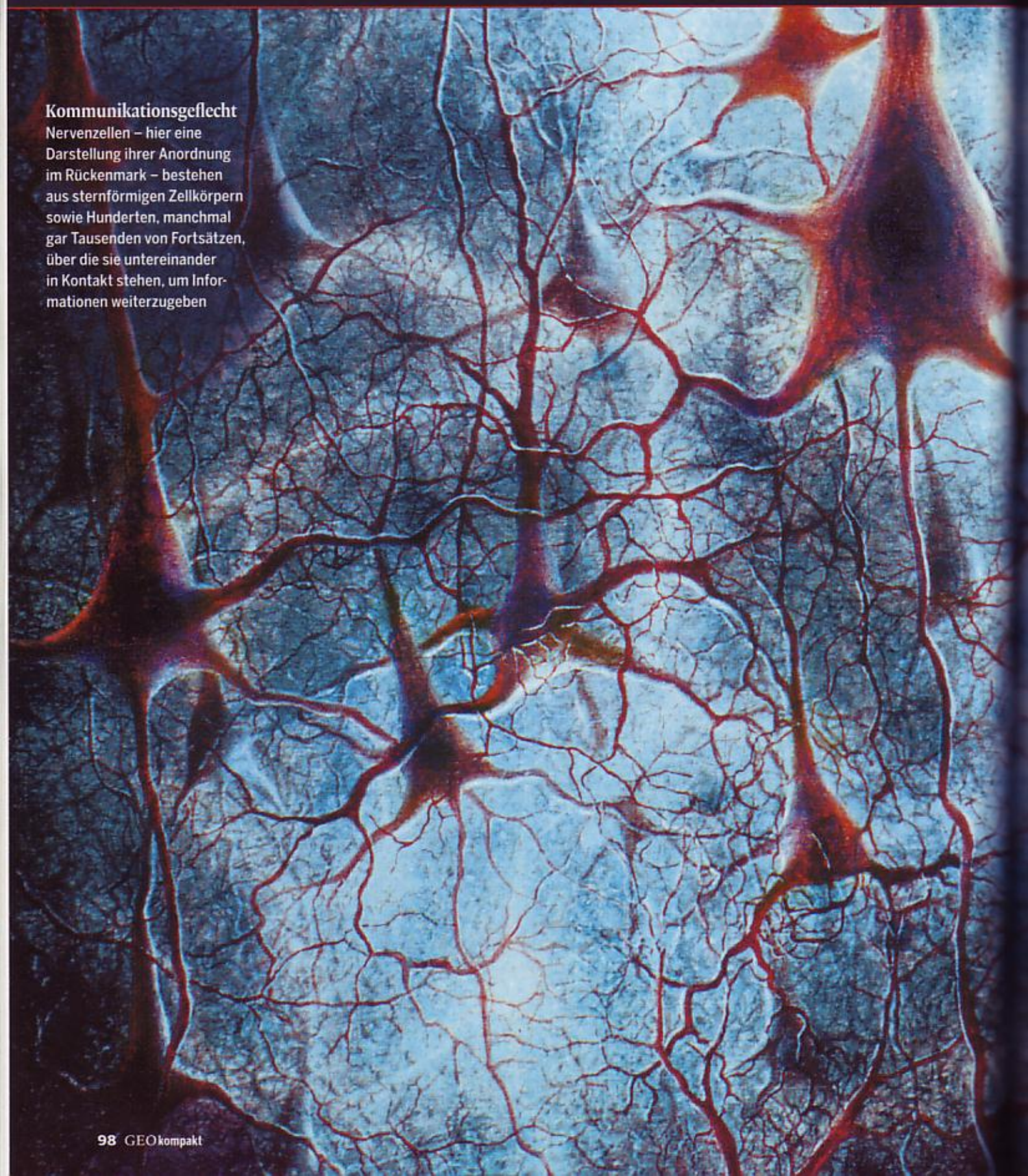
weiß man, was Spermium und Eizelle zusammenführt: der Duft von Maiglöckchen. □

Wissenschaftliche Beratung: Dr. Martin Trepel, Medizinische Klinik und Institut für Molekulare Medizin, Universität Freiburg.

Im Netz

Kommunikationsgeflecht

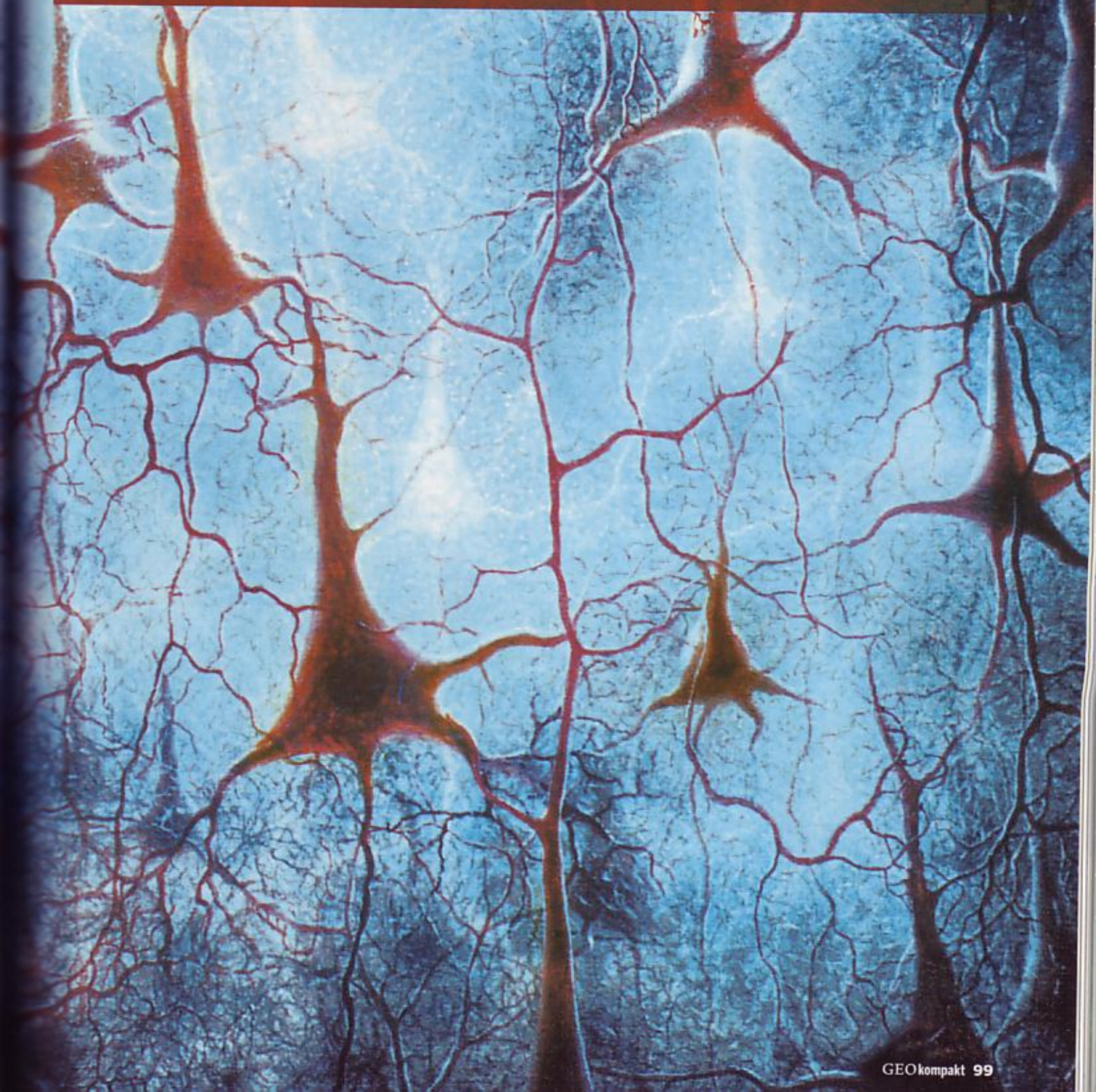
Nervenzellen – hier eine Darstellung ihrer Anordnung im Rückenmark – bestehen aus sternförmigen Zellkörpern sowie Hunderten, manchmal gar Tausenden von Fortsätzen, über die sie untereinander in Kontakt stehen, um Informationen weiterzugeben



der Signale

Milliarden elektrischer Impulse jagen unablässig durch unseren Körper. Sie informieren das Gehirn über den Zustand der Organe, übermitteln ihm die von Auge, Ohr, Nase oder Haut registrierten Sinnesreize oder senden umgekehrt Steuerimpulse an die Muskeln. Nervenfasern, manche mehr als ein Meter lang, verbinden jeden Winkel des Körpers mit den rund 100 Milliarden Nervenzellen in der Schaltzentrale – dem Gehirn

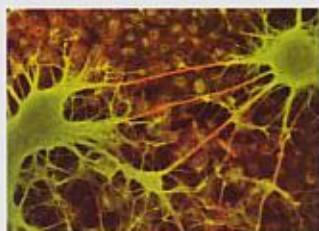
Text: Martin Paetsch



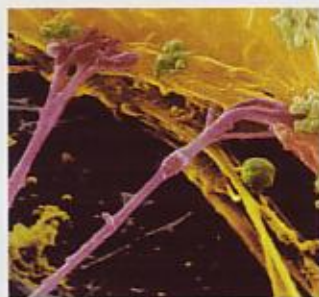
Das Nervensystem ähnelt einem **extrem komplexen Telefonnetz**, das alle Teile des Körpers miteinander verbindet

Durch unseren Körper zieht sich ein Fasergeflecht, über das Milliarden von **Nervenzellen** (oder Neuronen) ständig miteinander kommunizieren. Dieses Netz, das **Nervensystem**, leitet nicht nur Sinnesreize weiter, es steuert auch Bewegungen – und kontrolliert lebenswichtige Organfunktionen.

Selbst wenn der Mensch schläft, arbeitet es nimmermüde in seinem Innern. In jeder Sekunde jagen elektrische Impulse über verzweigte Leitungsbahnen durch den Organismus. Mit bis zu 120 Metern pro Sekunde melden sie dem Gehirn das Umbiegen feiner Hauthaare unter der Bettdecke, leichte Schwankungen der Zimmertemperatur oder die Schallwellen des Weckers.



Leitung Fortsätze der Nervenzellen leiten elektrische Signale zum Zellkörper hin (Dendriten, grün gefärbt) oder von ihm weg (Axone, rot)



Kommunikation Die Signalübermittlung zwischen zwei Nervenzellen erfolgt über chemische Kontaktstellen (violette Knöpfchen)

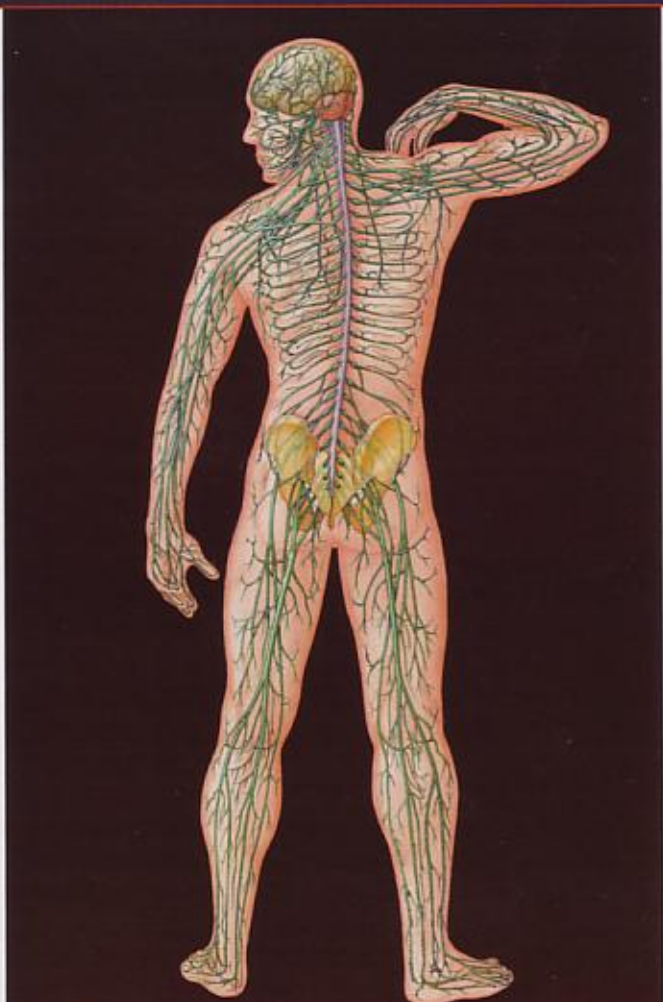
Ebenso rasch übermitteln sie Befehle an die Organe, lassen die Augen unter geschlossenen Lidern rollen oder einzelne Muskeln zusammenzucken.

Das Nervensystem überwacht und steuert einen Großteil der Körperfunktionen, hilft uns zu denken, zu fühlen, zu handeln. In seiner Geschäftigkeit gleicht es einem gigantischen Telefonnetz, durch das ständig Gespräche in alle Richtungen rasen. Dessen Teilnehmer, die Nervenzellen, führen Orts- oder Ferngespräche, die über Fernmeldekabel aus Tausenden von Drähten laufen. Manche Anrufe werden von lokalen Umschaltstationen durchgestellt, andere an übergeordnete Vermittlungsstellen weitergeleitet – an die Zentren des Gehirns.

Doch das Nervensystem ist weit komplexer als jedes Telefonnetz: Mehr als 100 Milliarden ständig aktive Nervenzellen, der größte Teil davon im Gehirn, stehen über Billiarden von Verknüpfungen miteinander in Kontakt.

Wissenschaftler unterteilen es in zwei Bereiche. Das **zentrale Nervensystem** umfasst das Gehirn und das mit ihm verbundene **Rückenmark**, das innerhalb der Wirbelsäule bis hinab zu den Lendenwirbeln verläuft. Diese Schaltzentrale kommuniziert mit den Außenbezirken des Körpers über das **periphere Nervensystem**. (Neben dieser *anatomischen* gibt es auch eine *funktionelle* Einteilung, die zwischen **willkürlichem** und **unwillkürlichem Nervensystem** unterscheidet – siehe Glossar.)

Zu dem peripheren Nervensystem gehören zum einen die aus der Basis des Gehirns austretenden Hirnnerven, die



Nervenzellen Mediziner unterscheiden zwei Bereiche des menschlichen Nervensystems: Das zentrale Nervensystem (Gehirn und Rückenmark) *speichert und verarbeitet* vor allem angelieferte Informationen, etwa die Signale von Sinnesorganen. Das periphere Nervensystem *übermittelt* dagegen Daten aus der Peripherie des Körpers an das Gehirn oder leitet dessen Steuerbefehle an Muskeln und Organe. Seine Nervenzellen führen zum Beispiel vom Rückenmark bis in die Finger- und Zehenspitzen. Zu ihm gehört auch das unwillkürliche (oder vegetative) Nervensystem, das die Aktivität der inneren Organe regelt, etwa des Herzens.

etwa Augen und Kopfmuskulatur mit dem Organ verbinden (siehe Seite 106). Zum anderen zählen dazu die **Spinalnerven**, quasi die Daten-Highways.

Diese Bündel aus Tausenden von **Nervenfaser**n treten, zu 31 Paaren angeordnet, an den Zwischenwirbellochern aus dem Rückenmark her-

vor. Jeder der Stränge ist mit einem fest umrissenen Körperbereich verdrahtet: Wird ein Spinalnerv durchtrennt, nimmt etwa die Empfindung für Berührung, Wärme und Schmerz in dem dazugehörigen Hautgebiet ab.

Neben äußeren Reizen senden die in den Spinalnerven

gebündelten **sensorischen Nervenfasern** auch Informationen über die Stellung von Gelenken und Skelettmuskeln zum zentralen Nervensystem. In umgekehrter Richtung verlaufen **motorische Nervenfasern**, die Signale zurück an die Muskeln leiten.

Daneben erfüllen die Kommunikationsbahnen noch andere Aufgaben. Über Nervenknoten außerhalb des Rückenmarks verknüpfen sie das zentrale Nervensystem mit den **Organen** und **Drüsen**. Dieses Netzwerk regelt unter anderem Atemfrequenz, Herzschlag und Verdauung.

Ein Untersystem, das **sympathische System**, versetzt den Körper in Alarmbereitschaft: Das Herz schlägt schneller, die Haut schwitzt, der Darm arbeitet langsamer. Sein Gegenspieler, das **parasympathische System**, sorgt hingegen dafür, dass der Körper nicht überfordert wird. Unter seinem Einfluss verlangsamt sich der Herzschlag, und die Verdauung wird angeregt.

So vielfältig die Funktionen des Nervensystems sind, sie beruhen im wesentlichen alle auf einem Zelltyp – dem Neuron. Je nach Aufgabe und Lage sehen Neuronen sehr unterschiedlich aus: Einige weisen komplexe Verästelungen auf, andere sind relativ simpel aufgebaut.

Alle verfügen jedoch über zwei Arten von Fortsätzen, mit denen sie untereinander kommunizieren. Die wenige Millimeter langen **Dendriten**, die hauptsächlich dem **Dateneingang** dienen, spalten sich in Zweige auf. Die **Übertragung von Signalen** übernehmen dagegen dünne, meist wenig verzweig-

te **Axone** – von einem Neuron im Rückenmark können sie sich mehr als einen Meter weit zu den Muskeln erstrecken.

Diese Nervenfasern sind röhrenförmige Hohlkörper, die mit einer elektrisch leitenden, gegenüber der äußeren Umgebung negativ geladenen Lösung gefüllt sind. Normalerweise leitet ein Axon schlecht: Schwache Signale verebben nach wenigen Millimetern. Erst wenn ein elektrischer Reiz, etwa von einem Lichtblitz oder einer Muskeldehnung ausgelöst, den Ladungsunterschied über eine gewisse Schwelle hinaus verringert, entsteht ein rund eine Millionstelsekunde währender Impuls.

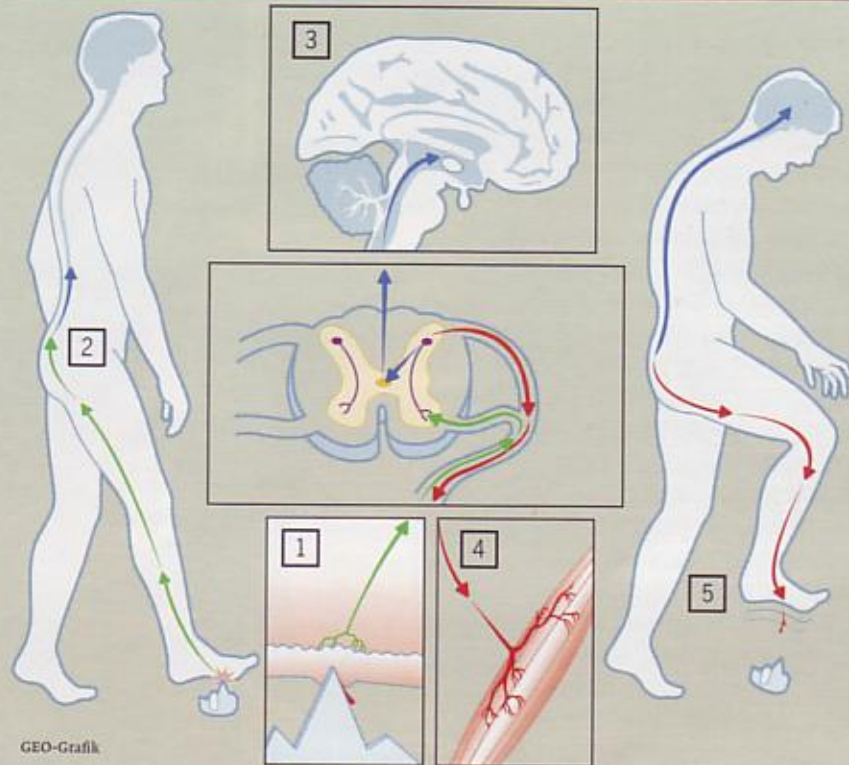
Dieses **Aktionspotenzial**, das sich rasant längs der Faser fortpflanzt, ist von stets gleicher Art und Stärke – es ähnelt einer binären Information in einem Computer. Je stärker der Reiz, desto größer ist die Anzahl derartiger Impulse und desto schneller folgen sie aufeinander. Alle Informationen bestehen zunächst aus solchen Impulssalven. Erst das Gehirn macht daraus ein differenziertes Bild der Außen- und Innenwelt.

An seinem äußeren Ende gabelt sich das Axon meist in mehrere Spitzen, die jeweils in einer Schwellung enden – über diese **Endknöpfchen** kann das Neuron das Aktions-

potenzial an eine weitere Nervenzelle übertragen. Dazwischen klafft jedoch ein Spalt. Endknöpfchen, Spalt sowie die Membran der nächsten Zelle bilden zusammen eine **Synapse**.

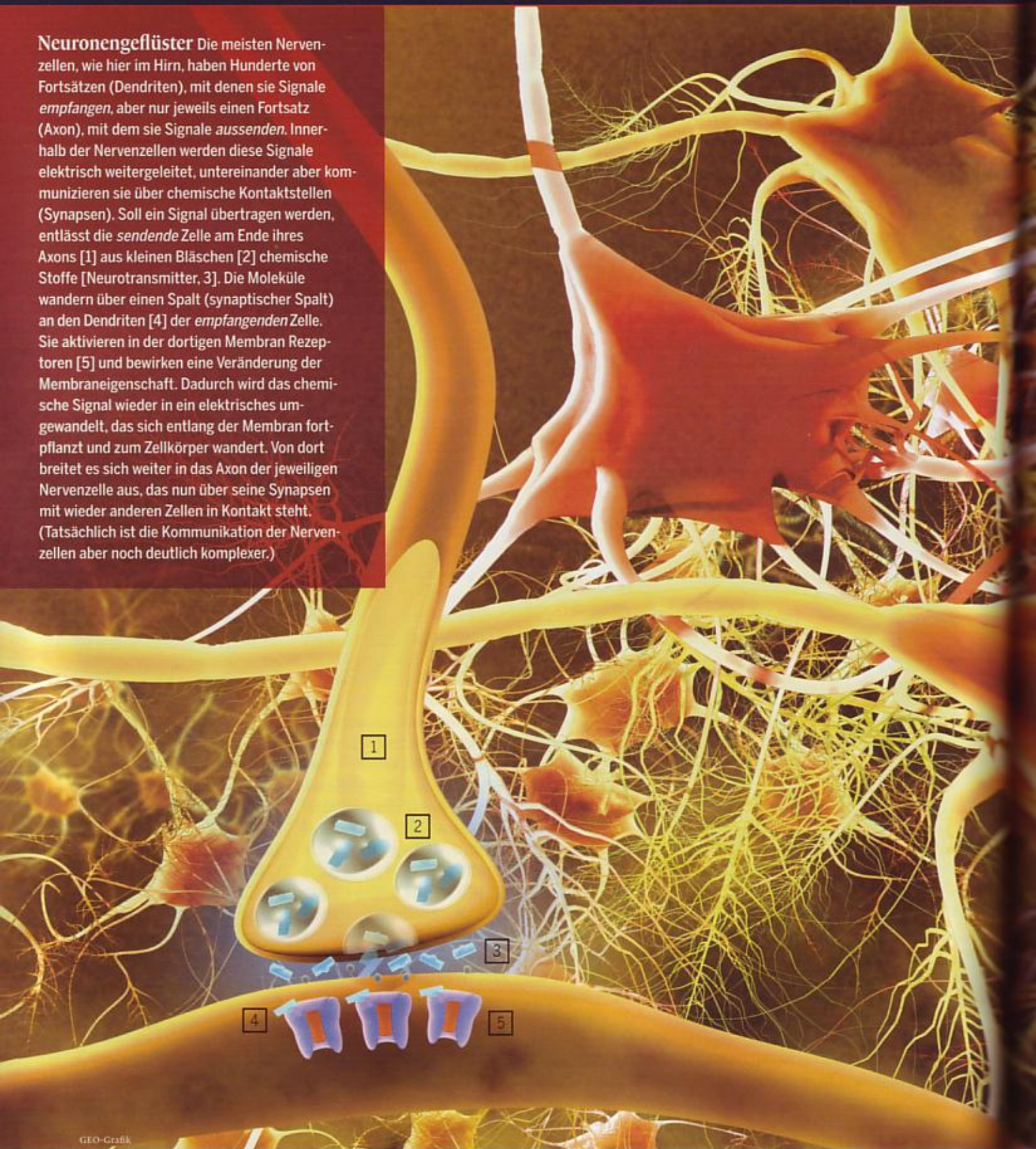
Um den synaptischen Spalt zu überwinden, wird das elektrische Signal in ein chemisches umgewandelt: Ausgelöst vom eintreffenden Aktionspotenzial, schüttet das Endknöpfchen eines Axons **Neurotransmitter**, „Botenstoffe“, aus, die den Spalt überbrücken.

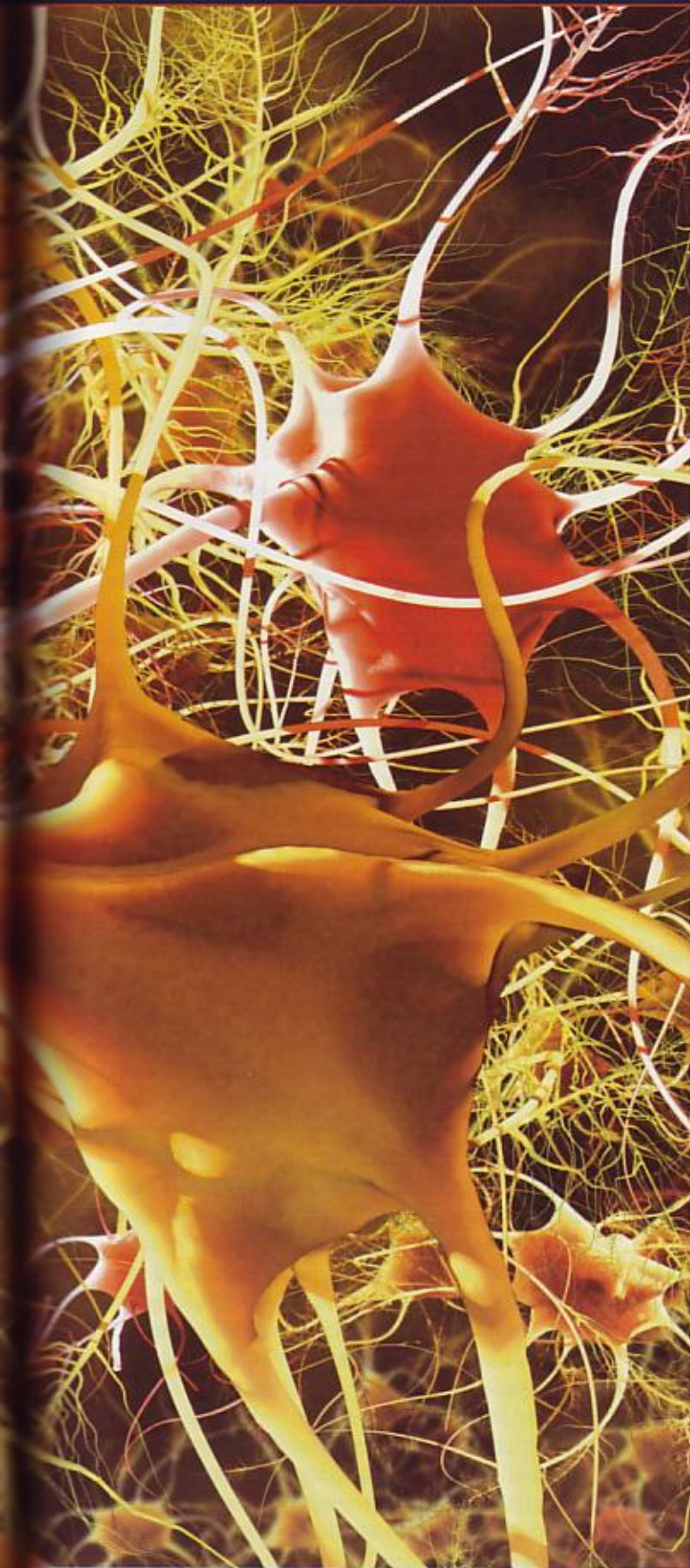
Am anderen „Ufer“ der Synapse nehmen Rezeptoren nun den Neurotransmitter auf und wandeln das chemische zurück in ein elektrisches Signal, das



Reflex Tritt man auf einen spitzen Stein, löst die Berührung an bestimmten „freien Nervenendigungen“ [1] in der Fußsohle ein Signal aus, das blitzschnell ins Rückenmark geleitet wird [2]. Fortsätze der Nervenzelle übertragen das Signal zum einen auf jene Nerven, die weiter zum Gehirn führen [3], zum anderen auf motorische Nervenfasern, die vom Rückenmark aus die Muskeln des Beines erreichen und sie sofort zusammenziehen lassen [4]. Der Reflex lässt das Bein zurückzucken [5], noch ehe das Signal das Gehirn erreicht hat und uns als Schmerz bewusst wird. So ist eine extrem schnelle Reaktion möglich, was größere Verletzungen zu vermeiden hilft.

Neuronengeflüster Die meisten Nervenzellen, wie hier im Hirn, haben Hunderte von Fortsätzen (Dendriten), mit denen sie Signale *empfangen*, aber nur jeweils einen Fortsatz (Axon), mit dem sie Signale *aussenden*. Innerhalb der Nervenzellen werden diese Signale elektrisch weitergeleitet, untereinander aber kommunizieren sie über chemische Kontaktstellen (Synapsen). Soll ein Signal übertragen werden, entlässt die *sendende* Zelle am Ende ihres Axons [1] aus kleinen Bläschen [2] chemische Stoffe [Neurotransmitter, 3]. Die Moleküle wandern über einen Spalt (synaptischer Spalt) an den Dendriten [4] der *empfangenden* Zelle. Sie aktivieren in der dortigen Membran Rezeptoren [5] und bewirken eine Veränderung der Membraneigenschaft. Dadurch wird das chemische Signal wieder in ein elektrisches umgewandelt, das sich entlang der Membran fortpflanzt und zum Zellkörper wandert. Von dort breitet es sich weiter in das Axon der jeweiligen Nervenzelle aus, das nun über seine Synapsen mit wieder anderen Zellen in Kontakt steht. (Tatsächlich ist die Kommunikation der Nervenzellen aber noch deutlich komplexer.)





von der Empfängerzelle zur nächsten Synapse fließt.

Diese aufwendige Konstruktion gewährleistet, dass der Signaltransfer nur in *eine* Richtung läuft. Ohne solche „Einbahnstraßen“ wäre der Körper einem Informationschaos ausgesetzt.

Doch treffen in einer Nervenzelle stets zahlreiche Signale zugleich ein: Über Tausende von Synapsen, die an dem Zellkörper oder den Fortsätzen liegen, kann sie mit anderen Neuronen verbunden sein. Je nach Art der Synapse wirken eingehende Impulse entweder hemmend oder erregend auf die Zelle. Das Neuron verrechnet all diese Einflüsse miteinander – und falls die Schwelle für ein Aktionspotenzial erreicht ist, wird dieser Impuls an die nächste Nervenzelle gesendet.

Auf diese Weise trifft schon eine einzelne Nervenzelle Entscheidungen und kann, wenn die hemmenden Signale überwiegen, die Weiterleitung von Botschaften unterbinden. Zudem können so die einzelnen Bereiche des Nervensystems aufeinander Einfluss nehmen: So sendet das Gehirn während des Schlafes unterdrückende Impulse an Neuronen im Rückenmark, um die Skelettmuskeln erschlaffen zu lassen.

Denn das Nervensystem leitet und verknüpft nicht nur Informationen auf vielfältige Weise, es arbeitet auch überaus ökonomisch. Die denkbar einfachste Form der Kommunikation ist der **monosynaptische Reflexbogen**, der zum Beispiel den Kniesehnenreflex steuert. Dabei verursacht etwa ein Schlag unterhalb der Knie-

scheibe eine Muskeldehnung, die in einer *sensorischen* Nervenfaser ein Aktionspotenzial hervorruft. Die zugehörige Nervenzelle leitet die Information über eine Synapse direkt an ein zweites, *motorisches* Neuron im Rückenmark weiter, das sofort einen Steuerimpuls zurück an den Muskel sendet und ihn zur Gegenbewegung veranlasst. Der Vorgang dauert weniger als 50 Millionstelsekunden – dem Gehirn wird er erst bewusst, wenn er sich bereits ereignet hat.

Ohne solche direkten „Nervenverdrahtungen“ könnte der Mensch nicht einmal stehen: Unablässig korrigieren Reflexbewegungen die Streckung und Dehnung der Muskeln und halten den Körper so im Gleichgewicht.

In lokalen Verschaltungen des Rückenmarks sind noch viele weitere, auch komplexere Bewegungsroutinen gespeichert, die das Gehirn mehr oder weniger bewusst abruft. Bereits für so etwas Simples wie das Umblättern einer Seite müssen Dutzende von Arm- und Handmuskeln präzise und schnell angesteuert werden, damit sie aufeinander abgestimmt kontrahieren. Auch wenn der Mensch sich bewusst vornimmt, diese Handlung auszuführen, unterliegt deren Ausführung nur bedingt seiner willentlichen Kontrolle.

Ist das Umblättern aber einmal beschlossen, übernimmt das Rückenmark die Regie – das Gehirn wäre durch die Fülle derart einfacher Aktionen überfordert. □

Martin Paetsch, 34, arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Hamburg. Beratung: Dr. Martin Trepel, Med. Klinik und Institut für molekulare Medizin, Universität Freiburg.

Erkenntnis aus dem Loch im Kopf

Die ungewöhnliche Hirnverletzung eines Arbeiters wird für den amerikanischen Arzt John Harlow Mitte des 19. Jahrhunderts zur wissenschaftlichen Chance: Daran, wie sie diesen Menschen verändert, kann er den viel umstrittenen Zusammenhang zwischen Gehirn und Charakter erstmals zuverlässig beschreiben

Text: Maren Wernecke

Cavendish, US-Staat Vermont: 13. September 1848. Der 25-jährige Eisenbahnarbeiter Phineas Gage bereitet eine Sprengung vor. Durch sanfte Stöße mit einer Eisenstange verdichtet er Zündpulver in einem Bohrloch und legt den Zünder. Nur der Sand zur Dämmung des Sprengstoffs fehlt noch. Abgelenkt durch Kollegen, blickt Gage über die rechte Schulter. Und stampft, ohne hinzuschauen, die Stange erneut ins Loch. Dieses Mal trifft er den Fels. Ein Funke, und die sechs Kilo schwere, mehr als ein Meter lange Eisenstange schießt durch Gages Kopf – zur linken Wange rein, zur Schädeldecke raus – und landet gut 20 Meter hinter ihm.

Gage wird auf den Rücken geworfen, ist aber allenfalls für einen kurzen Moment bewusstlos. Nach wenigen Minuten kann er wieder sprechen, mithilfe seiner Kollegen sogar laufen. Mit einem Ochsenkarren wird der Verletzte nach Hause gefahren, und zwar sitzend. Kurze Zeit später untersucht ihn der Arzt John Harlow. Gage, blutüberströmt, ist bei vollem Bewusstsein und in der Lage, den Unfallhergang genau zu beschreiben. In ein oder zwei Tagen, versichert er, könne er wieder arbeiten.

Ohne den geringsten Widerstand, notiert Harlow, habe er seinen Zeigefinger in das Loch im Schädel geschoben – und den anderen Finger berührt, den er durch die Wange geführt habe. Dass Gage bei klarem Verstand ist, beeindruckt den Arzt zutiefst.

Auch wenn er dem Unfallopfer kaum Überlebenschancen einräumt und der Sargmacher des Städtchens schon mal Maß nimmt, dokumentiert Harlow fortan detailgetreu die Befindlichkeit und das Verhalten seines ungewöhnlichen Patienten. Die Eisenstange habe einen beträchtlichen Teil des linken Stirnlappens zerstört, diagnostiziert der Mediziner.

Zwar erblindet Gage auf dem linken Auge und kann das Lid nicht mehr öffnen. Ansonsten aber erholt er

sich – doch als anderer Mensch. Beschrieben ihn seine Vorgesetzten vor dem Unfall als verantwortungsvoll und zurückhaltend, so wirkt er nun – so Harlow – „launhaft und respektlos“. Er „erlaubt sich die derbsten Flüche und reagiert empfindlich auf Einschränkungen und Ratschläge, die seinen Wünschen entgegenstehen. Das Gleichgewicht zwischen seinen geistigen Fähigkeiten und seinen tierischen Leidenschaften scheint zerstört zu sein.“ Freunde und Bekannte meinen: „Gage was no longer Gage!“

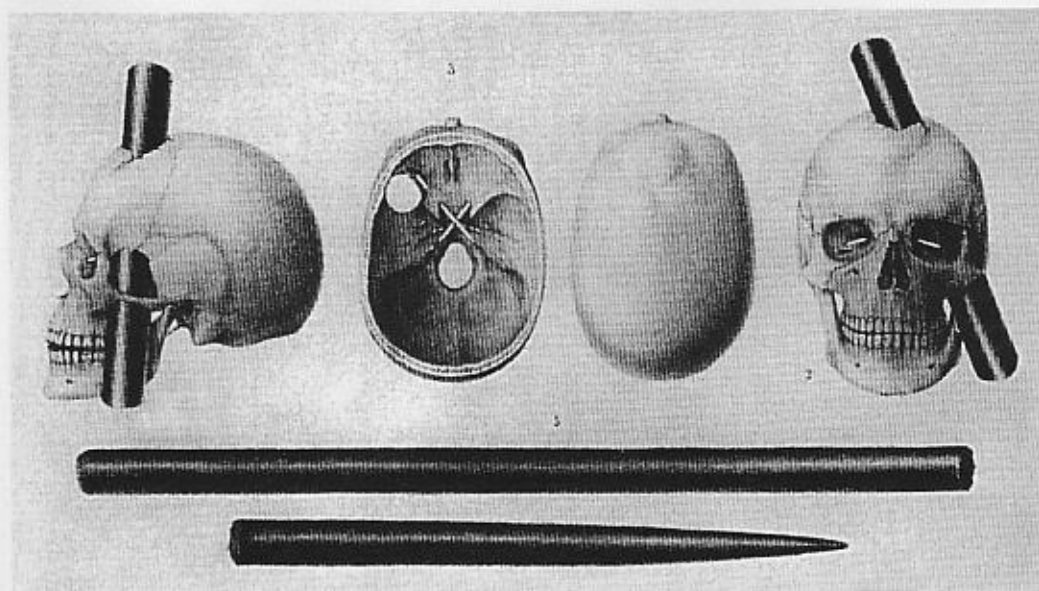
Der Verwandelte verliert seinen Job bei der Bahn, wandert für einige Jahre nach Chile aus und stirbt 1860 – unbeachtet von der Öffentlichkeit – in San Francisco an einem epileptischen Anfall. Harlow erfährt davon erst sechs Jahre später und veranlasst mit Billigung der Familie eine Exhumierung des Leichnams.

Harlows Untersuchungen des Schädels von Phineas Gage gehören zu den ersten wissenschaftlichen Studien über den Zusammenhang zwischen Gehirn und Charakter. Zwar waren bereits in der Antike Ärzte überzeugt, dass der Charakter mit der Konstitution des Gehirns zusammenhängt. So erklärte Hippokrates (ca. 460–370 v. Chr.) Reizbarkeit und Offenheit eines Menschen als Folge eines weichen und feuchten, Sturheit hingegen als die eines harten, eher trockenen Gehirns. Wissenschaftlich gesehen, ist das Nonsense.

Im 19. Jahrhundert gingen viele Forscher davon aus, dass Gehirne außerordentlicher Persönlichkeiten entsprechend außerordentlich gestaltet seien. Anfang jenes Jahrhunderts begründete der Arzt Franz Joseph Gall (1758–1828) in Wien die so genannte Phrenologie und lehrte, dass sich kognitive und emotionale Eigenschaften in der Hirnrinde ausprägen und im Extremfall als Höcker sichtbar würden: Im Vorderteil des Kopfes seien Scharfsinn und Witz angesiedelt, eine kräftige Stirn stehe für Intelligenz, ein ausgeprägter Hinterkopf verrate den Triebmenschen.



Dr. John Martyn Harlow (1819–1907) wird durch seine Studien im Fall des hirnerkrankten Phineas Gage vom Arzt zum Forscher. Sein später beträchtliches Vermögen vermachte er vor allem Forschungsinstituten



Die Verletzung des Schädels von Phineas Gage, wie sie das »American Journal of The Medical Sciences« 1849, noch zu Lebzeiten des Patienten, illustrieren lässt. Das Unglückswerkzeug, die Eisenstange, hat der Zeichner, vermutlich aus Platzmangel, zweigeteilt

Völlig falsch lagen die Phrenologen mit ihren Ideen nicht. Indem sie verschiedenen Teilen des Gehirns unterschiedliche Funktionen zuordneten, begründeten sie die teilweise noch heute gültige Lokalisationslehre. In der Tat gibt es im Gehirn spezialisierte Regionen – wie der französische Chirurg und Anthropologe Paul Broca bereits 1861 mit der Entdeckung des Sprachzentrums beweisen konnte (siehe Seite 112).

Broca erkannte, dass bei einem Patienten, der nur die Silbe „Tan“ sagen konnte, eine bestimmte Stelle des linken Stirnlappens geschädigt war. Dort, folgerte er, müsse die Fähigkeit zum Sprechen lokalisiert sein. Heute heißt diese Hirnregion Broca-Areal.

Inzwischen werden wissenschaftliche Erkenntnisse über die Gehirnfunktionen in großem Stile von Aktivitätsmessungen durch Elektroenzephalographen (EEG) oder durch bildgebende Verfahren wie die Positronenemissionstomographie (PET) gewonnen. Aber lange noch bezog man sie fast ausschließlich aus „Läsionsstudien“, aus Studien an Hirnverletzten. Einem Patienten beispielsweise, der unter starken epileptischen Anfällen litt, entfernte ein amerikanischer Neurochirurg 1953 große Teile der Schläfenlappen. Fortan war nicht nur dessen Epilepsie verschwunden, sondern auch dessen Gedächtnis gestört. Lediglich das Kurzzeitgedächtnis arbeitete noch, und der Mann konnte sich Zahlen und Bilder für wenige Sekunden merken.

Einem anderen Patienten war es aufgrund eines Tumors oder eines degenerativen Prozesses in seinem Sehzentrum unmöglich geworden, Gegenstände oder Personen anhand visueller Informationen zu identifizieren – was dazu führte, dass er den Kopf seiner Frau mit einem Hut verwechselte.

Ein weiterer Fall wurde im Jahr 1985 publiziert. Dem Patienten hatte ein bösartiger Tumor von der Größe einer kleinen Apfelsine aus dem Stirnhirn herausoperiert werden müssen. Obwohl dem Mann von den Ärzten aufgrund von Intelligenz- und Persönlichkeits-

tests normale Fähigkeiten bescheinigt wurden und er weder sensorisch noch motorisch beeinträchtigt war, verlor der zuvor erfolgreiche Geschäftsmann seinen Job, wurde von seiner Frau verlassen, ließ sich auf riskante Geschäfte ein und endete als Sozialfall. Dem Mann, so stellten die Ärzte fest, schien es nach seiner Erkrankung extrem schwer zu fallen, sich zu entscheiden oder Verabredungen einzuhalten. Er war emotionslos und unfähig, aus seinen Misserfolgen zu lernen.

Damit ähnelt das Schicksal dieses Patienten dem des ebenfalls gefühlkalten Phineas Gage. Seit dessen Unfall 1848 haben Ärzte mehrfach versucht, jenen Weg zu rekonstruieren, den die Eisenstange durch Gages Kopf genommen haben könnte. Eine Autopsie hatte ja nie stattgefunden, und es blieb unklar, genau welche Teile des Gehirns verletzt worden waren.

Lange überwog die Meinung, die Stange habe nur die linke Gehirnhälfte durchstoßen. 1994 schließlich setzte ein amerikanisches Forscherteam Fotografien und Röntgenaufnahmen von Gages Schädel zu dreidimensionalen Schädelmodellen zusammen. Ergebnis: Neben dem linken sei auch der rechte Stirnlappen verletzt worden. Und diese Läsion habe einen Defekt bei der rationalen Entscheidungsfindung und der Verarbeitung von Emotionen verursacht.

Diese Interpretation ist jedoch unter Wissenschaftlern umstritten. Und so hat sich kürzlich wieder ein Team amerikanischer Ärzte daran gemacht, Gages Schädel zu untersuchen. Denn in früheren Studien seien nach ihrer Meinung wichtige Punkte übersehen und unzulässige Schlüsse gezogen worden.

Am Kern der Sache, nämlich dass Charakter und Gehirn allem Anschein nach zusammenhängen, wird das nichts ändern. Nur wie und wodurch welche Effekte auftreten, ist noch nicht hinreichend geklärt. □

Maren Wernecke, 30, ist freie Journalistin in Rheinfelden.



Die Kopfmaste, die dem hirnerkrankten Gage 1849, ein Jahr nach seinem Unfall, abgenommen wird, und dessen echter Schädel

Zentrale ohne Zentrum

Hundert Milliarden Nervenzellen mit jeweils mehreren Tausend Kontaktstellen bilden in unserem Kopf einen gigantischen Verbund, der uns das Denken, Sprechen, Fühlen, Sehen und Gehen ermöglicht. Einigen Zentren im Gehirn sind bestimmte Funktionen zuzuordnen, doch die meisten Leistungen werden von nicht lokalisierbaren und sich ständig verändernden Neuronen-Netzwerken erbracht. Noch ist rätselhaft, wie diese komplexeste Struktur des Universums genau arbeitet

Text: Martin Lindner

Illustrationen: Tim Wehrmann

Die Eltern des elfjährigen Philipp Dörr hielten zunächst die Wahrheit zurück, als er aus der Narkose erwachte. Sie mochten ihm nicht sagen, was in seinem Kopf für immer fehlen würde: Denn die Ärzte hatten ihm nahezu die gesamte rechte Großhirnhälfte herausoperiert.

Seit frühester Kindheit hatte Philipp Dörr unter schwerer Epilepsie gelitten. Als er nun elf Jahre alt war, wussten ihm die Ärzte nicht mehr anders zu helfen und wagten den Eingriff. Er werde danach vielleicht nicht mehr derselbe sein, sagten sie den Eltern.

Was dann geschah, mutet an wie ein medizinisches Wunder. Denn die verbliebene linke Großhirnhälfte lernte, ohne die rechte auszukommen, übernahm Schritt für Schritt durch intensives Training viele ihrer Aufgaben. „Philipp hat sich nie hängen lassen und besaß immer einen starken Willen, auch deshalb hat sein Gehirn alle Ressourcen mobilisiert“, erklärt der Münchner Neuropsychologe Reinhard Werth, der den Patienten seit langem betreut.

Zwar kann Philipp Dörr auch heute, mehr als 13 Jahre nach der Operation, einen Arm nur sehr eingeschränkt bewegen. Doch ist er immerhin so sportlich, dass er eine Prüfung zum Rettungstaucher bestanden hat. Er hört auf beiden Ohren gut. Und selbst mit dem linken Auge, das nach der Operation erblindet war, nimmt er teilweise wieder Lichtreize wahr. Besonders beeindruckend jedoch sind seine geistigen Fähigkeiten. Sein Sprachvermögen ist völlig normal, sein Intelligenzquotient überdurchschnittlich, er spielt Schach. Auch ohne rechte Hirnhälfte hat er sein Abitur gemacht.

Blackbox Gehirn: Wie genau tut es seine Arbeit? Sprechen, Denken, Fühlen, Gehen, Sehen – im Grunde fordert jede der Fähigkeiten, die wir tagein, tagaus ganz selbst-

Scheitellappen

Kontrolliert Tastgefühl und Körperwahrnehmung

Schläfenlappen

Enthält das Hörzentrum, ist an Lernen, Gedächtnis, Gefühlen beteiligt

Broca-Areal

Motorisches Sprachzentrum, wichtig für Spracherzeugung

Stirnlappen

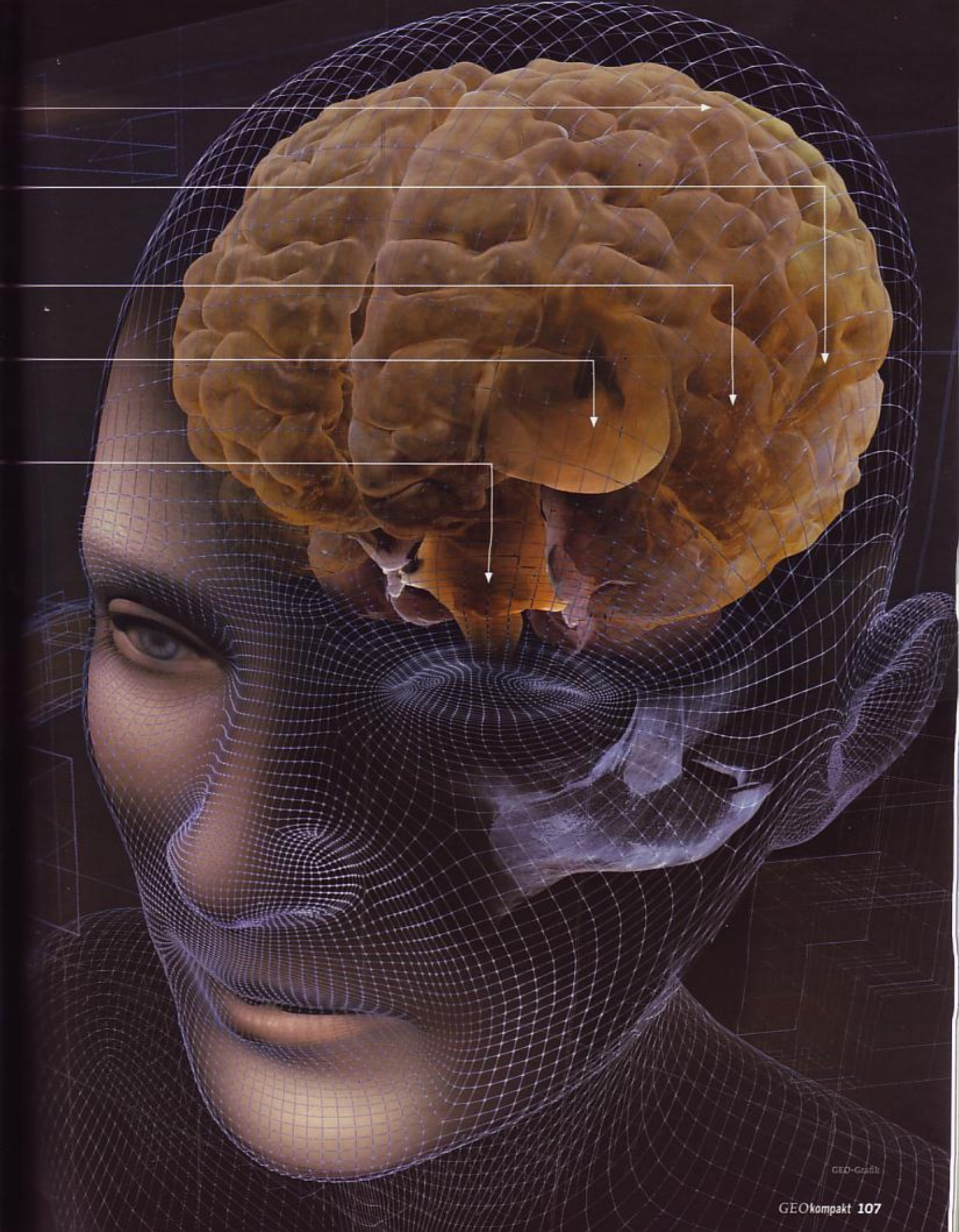
Wichtig für Planung, Bewusstsein, Bewegungs- und Selbstkontrolle

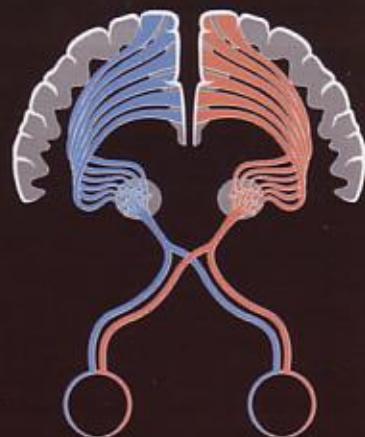
Hirnstamm

Liegt unter dem Großhirn (verbunden über das Zwischenhirn), besteht aus Mittelhirn, Brücke und verlängertem Mark (rötlich daneben: das Kleinhirn), steuert lebenswichtige Grundfunktionen

Großhirnrinde

Der so genannte Kortex (gelbe Bereiche) ist der am stärksten entwickelte Teil des Gehirns. Vor allem seine vorderen Abschnitte (präfrontaler Kortex) tragen zu den höheren geistigen Fähigkeiten des Menschen und dem Bewusstsein bei – ohne dass sich einzelne Funktionen eng umgrenzten Strukturen zuordnen lassen





Ein Abbild der Welt

Das Licht, das auf die Netzhaut der Augen [1] fällt, wird in elektrische Impulse umgewandelt und von den Sehnerven [2] weitergeleitet (siehe Seite 90). Dabei kreuzen sich die Sehnerven [3] und senden jeweils die Eindrücke der rechten Hälften der beiden Augäpfel an die rechte, die der linken Hälften an die linke Hirnhälfte (siehe oben). Im äußeren Kniehöcker [4] werden die Impulse umgeschaltet und an das Sehzentrum [5] im Hinterhauptslappen geschickt. Dort werden Farben und Formen, Bewegungen und räumliche Anordnung von verschiedenen, spezialisierten Nervenzellgruppen analysiert und schließlich zu einem räumlichen Gesamtbild zusammengesetzt.

GEO-Grafik

verständlich nutzen, von den schätzungsweise 100 Milliarden **Nervenzellen** im Kopf eine Meisterleistung. Wenn aber ein Mensch noch mit etwa der Hälfte der Großhirnzellen einen intakten Geist entwickeln kann, was besagt das über die Funktionsweise dieses wohl rätselhaftesten aller Organe?

Fest steht: Um das rund drei Pfund schwere Gebilde von der Konsistenz eines weich gekochten Eies wirklich zu verstehen, taugen viele der alten Hypothesen wenig. So hatten Mediziner lange Zeit angenommen, dass einzelne Fähigkeiten und selbst Cha-

raktereigenschaften anatomisch eindeutig umschriebenen Hirnregionen zugewiesen werden könnten – eine Idee, die bis weit ins 20. Jahrhundert die Hirnforschung prägte.

Im Jahr 1934 etwa veröffentlichte der deutsche Psychiater Karl Kleist eine detaillierte, in Dutzende von Feldern eingeteilte Karte des Großhirns, auf der er nicht nur dem Farbenerkennen, den Tonempfindungen und den Kopfbewegungen einen festen Ort zuwies, sondern auch eine Region für „tätige Gedanken“ eingezeichnet hatte, ein Gebiet für „Gesinnungen, gesin-

nungsmäßige Handlungen und Ausdauer“ und ein Feld für das „Selbst- und Gemeinschafts-Ich“.

Zwar würde auch heute kein Neuroforscher bestreiten, dass unterschiedliche Hirnbereiche unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Denn dass es im **Gehirn** eine Arbeitsteilung gibt, legt schon die charakteristische Form der Hirnanteile nahe. Unser Denkorgan besteht rein äußerlich aus:

- den beiden Hälften (Hemisphären) des **Großhirns**, die durch ihre vielen Furchen und Windungen an eine Walnuss erinnern;

- dem **Hirnstamm**, einem dicken Stiel, der sich nach unten verjüngt und ins Rückenmark übergeht;
- und dem **Kleinhirn**, einer blumenkohlartig anmutenden Ausstülpung auf der Rückseite des Hirnstamms.

Doch eine simple Zuordnung komplexer Hirnleistungen zu einzelnen Regionen, die als Kommandozentren fungieren würden, lehnen die meisten Neurobiologen inzwischen ab. Die Seele, so ihre Überzeugung, hat keinen festen Sitz, ebenso wenig die Sprache, das **Gedächtnis**, die Gefühle oder die Gedanken.

„Das Gehirn ist viel dynamischer, als oft behauptet wird“, urteilt Reinhard Werth. Zum einen spielen offenbar immer mehrere Regionen zusammen. Beim Lesen beispielsweise sind, so Werth, mehr als ein Dutzend Areale beteiligt.

Zum anderen können sich diese Nervenzell-Netzwerke im Laufe des Lebens verändern und zumindest bis zu einem gewissen Grad wechselnden Anforderungen anpassen. So weiß man heute, dass die Kontakte zwischen den Nervenzellen, die **Synapsen**, wachsen oder auch schrumpfen können – je nachdem, ob sie viel oder wenig genutzt werden.

Durch frühzeitiges und langjähriges Musizieren etwa wandelt sich die Struktur der Hirnrinde. Bei manchen Schlaganfallpatienten „verdrahten“ sich Nervenzellverbindungen neu, sodass die Betroffenen einen Teil ihrer Bewegungsfähigkeit zurückgewinnen. Und mitunter kann das Gehirn sogar massive Verluste verkraften – wie bei Philipp Dörr.

Anders als ein Computer, so hat es die Oxforder Neurowissenschaftlerin Susan Greenfield ausgedrückt, besitze das Hirn eben keine unveränderliche Hardware: Es baue sich ständig um.

Am ehesten vergleichbar ist das Organ wohl einem Rechnerverbund wie dem Internet. Die weltweit angeschlossenen Groß- und Kleinrechner entsprächen in diesem Bild den „Zentren“ und Schaltstellen

des Gehirns. Sie sind zu einem diffusen, extrem dynamischen Netz verbunden, in dem es Knotenpunkte und Redundanzen gibt, sodass ausfallende „Rechner“, also Hirnregionen, in ihren Funktionen durch andere ersetzt werden können.*

Gleichwohl gibt es Netzwerke von Nervenzellen, die stets bei bestimmten Hirnfunktionen aktiv werden – und sie lassen sich recht genau ausmachen. Beispiel Bewegung: Das motorische System zählt zu den raffiniertesten Funktionsbereichen des Gehirns. Als wichtige Schaltstelle der Bewegungssteuerung fungiert dabei der **motorische Kortex**, ein Areal im Stirnappen der **Großhirnrinde**.

In diesem Feld finden sich spezifische Nervenzell-Ensembles, die für verschiedene Körperbereiche zuständig sind. Wird bei Experimenten beispielsweise das für die Hand, die Lippen oder das Bein zuständige motorische Areal elektrisch gereizt, führt das unweigerlich zu entsprechenden Muskelbewegungen an Hand, Lippen oder Bein.

Denn aus dem motorischen Kortex ziehen die langen Fortsätze der Nervenzellen hinab in den Hirnstamm, wechseln hier die Seite – weshalb die rechte Hemisphäre die linke Körperhälfte steuert – und setzen ihren Weg fort bis ins Rückenmark. Von dort werden die Bewegungsbefehle durch die Nerven direkt zu

den Muskeln geschickt. Von dem Moment an, in dem ein bestimmtes Bewegungsprogramm im motorischen Kortex entworfen wird, bis zum eigentlichen Bewegungsbeginn vergehen etwa 100 bis 200 Millisekunden. Gerade für die Feinmotorik der Finger ist dieses enge Zusammenspiel von Hirnrinde und Handmuskeln unerlässlich.

Allein könnte der motorische Kortex die Bewegungssteuerung jedoch niemals bewältigen. Deshalb steht er mit tiefer liegenden Hirnstrukturen in Kontakt: den Basalganglien und dem Kleinhirn.

Die **Basalganglien** – geballte Ansammlungen von Nervenzellkörpern im Großhirn – sorgen dafür, dass Bewegungen koordiniert in Gang gesetzt werden. Bei einer Krankheit wie etwa der Schüttellähmung ist die Funktion der Basalganglien gestört, und es kommt zu gehemmten oder unkontrolliert überschießenden Bewegungsabläufen.

Ebenso wichtig für die Bewegungssteuerung ist das Kleinhirn, das gleichsam als Servolenkung des Gehirns fungiert. Denn von der Großhirnrinde erhält es stets eine Kopie des gerade gestarteten Bewegungsprogramms. Ebenso laufen in ihm Rückmeldungen aus den Muskeln, dem Gleichgewichtsorgan sowie aus Ohren und Augen ein.

Durch den Abgleich der Signalströme kann das Kleinhirn schnell entdecken, wenn eine Bewegung nicht wie geplant

verläuft. Abweichungsfehler meldet es an die Großhirnrinde zurück und sorgt für sofortige Korrekturen. Fällt das Kleinhirn aus, zum Beispiel durch eine Hirnblutung, ist es dem Patienten oft nicht einmal mehr möglich, flüssig und sicher nach dem Autoschlüssel auf dem Tisch zu greifen – vom Klavierspielen ganz zu schweigen.

Ähnlich wie für die Bewegung kennt man auch für die Sprache Hirnregionen von herausgehobener Bedeutung – allerdings sind auch hier die Modelle dafür, wo und wie die neuronalen Sprachprozesse ablaufen, immer komplexer geworden. So ist zwar seit dem 19. Jahrhundert das Broca-Areal im Stirnlappen bekannt. Damals galt es als das Hirnzentrum, in dem die gesprochene Sprache entsteht. Später wurde das Wernicke-Areal im Schläfenlappen entdeckt, das man als Ort des Sprachverstehens betrachtete. Beide Felder sind bei den meisten Menschen in der linken Hemisphäre deutlich aktiver als in der rechten.

Doch inzwischen habe sich, so argumentiert etwa die Leipziger Neurolinguistin Angela Friederici, diese Zwei-Zentren-Theorie der Sprache als viel zu simpel erwiesen. Vielmehr verteilen sich vermutlich die Sprachfunktionen über einen beträchtlichen Teil des gesamten Großhirns. Friederici hat nun ein neues Modell des Sprachverstehens entwickelt.

Demnach arbeiten Regionen im Stirn- und Schläfenlappen zusammen, um zunächst zu erkennen, ob es

* In jeder Zeit gab es technische Metaphern zur Beschreibung des Gehirns: Für die Römer arbeitete es ähnlich wie das Heizungssystem ihrer Bäder, Descartes hielt es für eine Art hydraulischer Maschine, im 19. Jahrhundert wurden Körper und Gehirn mit einem Staat verglichen, für das Industriezeitalter ist die Analogie zu einer Fabrik typisch. Viele Hirnforscher halten solche Vergleiche angesichts der Komplexität des Gehirns allerdings für wenig hilfreich und letztlich irreführend.

sich bei dem Gehörten etwa um ein Substantiv oder ein Verb handelt. Danach wird die Bedeutung der Wörter registriert. Vor allem die linke Hemisphäre scheint für diese beiden Aufgaben zuständig zu sein.

Doch ist damit die Sprachanalyse keineswegs abgeschlossen. Denn auch die Nuancen einer Sprachmelodie – Rhythmus, Tonfall, emotionale Färbung der Stimme – enthalten wichtige Informationen. Die werden meist von der rechten Hirnhälfte verarbeitet.

Die beiden Hemisphären teilen sich die Arbeit also bis zu einem gewissen Grad auf. Tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass die rechte Hemisphäre immer dann zusätzlich aktiviert wird, wenn man einen schwierigen Satz, eine ganze Geschichte oder einen Witz verstehen will.

Auch im umgekehrten Fall, bei der Produktion von gesprochener Sprache, ist eine Vielzahl von Hirnregionen im Spiel. Das Broca-Areal fungiert dabei gewissermaßen als letzte Etappe in der Produktionskette. Von hier wird eine Art Steuerungsprogramm an die eng benachbarten motorischen **Rindenfelder** (die zum motorischen Kortex gehören) weitergegeben, welche die Muskelbewegungen von Kehlkopf, Gesicht und Zunge in Gang setzen.

Der motorische Kortex dient also sowohl bei gewöhnlichen Körperbewegungen wie auch beim Sprechen als fester Ausgangskanal, durch den die neuronalen Signale die Groß-

hirnrinde verlassen. Umgekehrt verfügt diese auch über festgelegte Eingangskanäle, nämlich für die Informationen aus den Sinnesorganen.

So liegt beispielsweise im Scheitellappen das so genannte primär-sensorische Feld für die Berührungsempfindungen aus der Haut. Die primäre Hör-rinde für akustische Signale findet sich dagegen im Schläfenlappen – und die primäre Sehrinde im **Hinterhauptslappen**.

In diese primäre Sehrinde, ein ganz am hinteren Pol der Hemisphäre gelegenes Rindenfeld, gelangt alles, was die Augen dem Großhirn über den Sehnerv zuspülen. Der komplexe Signalverarbeitungsprozess, der dort beginnt, ist inzwischen eine der am besten erforschten Leistungen des Gehirns überhaupt.

So sitzen in der Sehrinde und den eng benachbarten Feldern hochspezialisierte Nervenzellen. Manche reagieren lediglich auf einzelne Farben wie Rot oder Grün. Andere können unterscheiden, von welcher Form, Kontur oder Ausrichtung ein Gegenstand ist. Sie feuern beispielsweise nur dann, wenn ein Balken quer, nicht aber wenn er längs durchs Bild verläuft. Dank dieser Spezialisierung zerlegt das Gehirn ein Bild in dessen einzelne Eigenschaften.

Erst in nachgeschalteten Rindenregionen erhält dieses Mosaik aus Einzelinformationen dann eine Bedeutung. So wandern die Signale aus dem Hinterhauptslappen zum einen in den Schläfenlappen:

Hier entscheidet das Gehirn, ob es sich bei dem Gesehenen um eine Uhr, ein Gesicht oder ein Auto handelt. Dieser Informationsstrom wird als „Was“-Bahn bezeichnet.

Zum anderen gelangen die Sinnesinformationen über die „Wo“-Bahn in den Scheitellappen, der für die Orientierung im Raum und die Bewegung darin eine entscheidende Rolle spielt. Bis wir also ein Bild vor uns „sehen“, muss das Hirn entlang mehrerer „geistiger Fließbänder“ viele hintereinander geschaltete Arbeitsschritte vollziehen: Die visuellen Signale werden sowohl nacheinander als auch gleichzeitig verarbeitet.

Das Bild im Kopf sei, so argumentiert der Frankfurter Hirnforscher Wolf Singer, daher auch nirgends im Gehirn als Ganzes vorhanden, sondern auf viele

verschiedene Regionen verteilt (siehe Seite 114). Was wir im Alltag als simplen Gegenstand wahrnehmen, ein rotes Auto etwa, beansprucht im Gehirn weit auseinander liegende, diffus verstreute Netzwerke von Nervenzellen. Eine genaue Antwort auf die Frage, wie und wo genau eine bewusste Wahrnehmung oder ein Gedanke letztlich zustande kommt, kennen Neurobiologen nach wie vor nicht.

Vergleichsweise leicht fällt ihnen dagegen, jene Ein- und Ausgangssignale zu interpretieren, die durch die **primären Sinnesfelder** in die Großhirnrinde hineinfließen und sie – beispielsweise zur Bewegungssteuerung – wieder verlassen. Auch den direkten Nachbarregionen – man spricht von sekundären motorischen und sensorischen Rindenfeldern – lassen sich ziemlich exakt Funktionen zuordnen.



Großhirnrinde

Enthält vorwiegend stark miteinander vernetzte Zellkörper (graue Substanz) von Nervenzellen und besteht zu 80 Prozent aus assoziativen, Information verarbeitenden Arealen.

Zwischenhirn

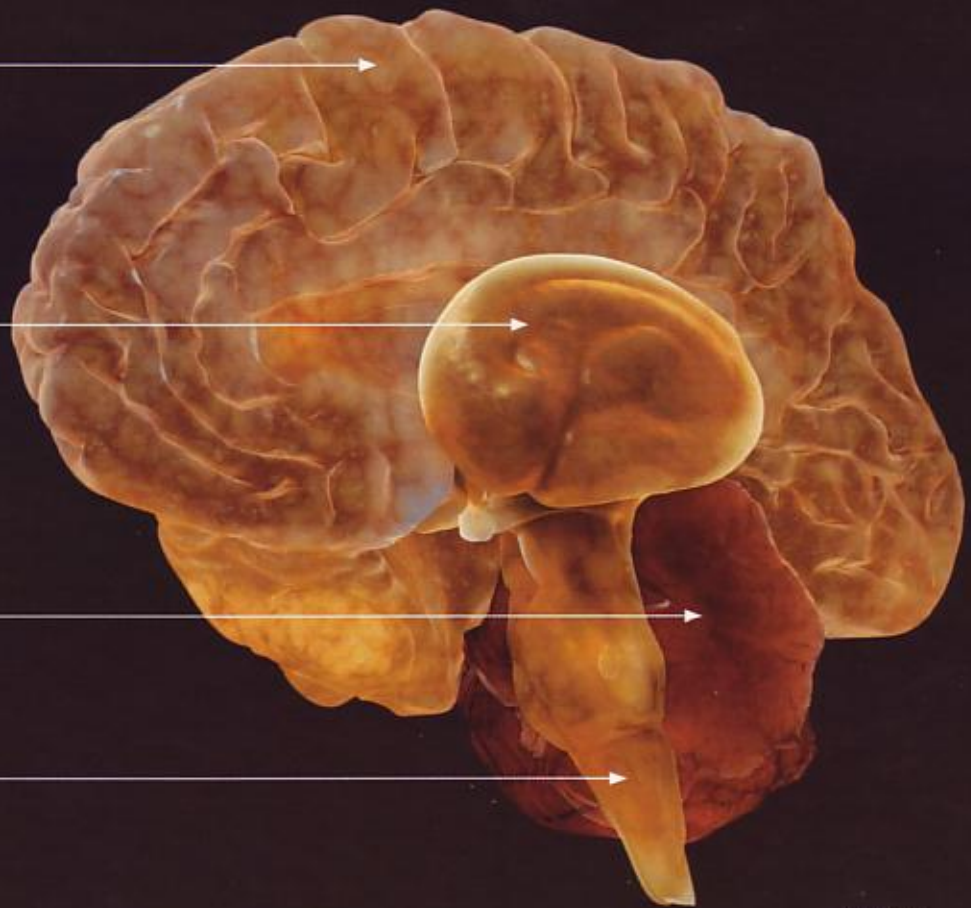
Enthält Thalamus und Hypothalamus, gilt als Umschalt- und Filterstation für Informationen, die von anderen Hirnteilen zur Großhirnrinde gelangen, reguliert Tag-Nacht-Rhythmus und hormonelle Steuerung.

Kleinhirn

Ermöglicht Feinregulierung von Bewegungen; wichtig für Gleichgewicht und Bewegungslernen.

Hirnstamm

Reguliert Wachheit, Aufmerksamkeit, Verdauung, Atmung, Herzschlag, verbindet Groß- und Kleinhirn.



GEO-Grafik

Doch dann wird es richtig kompliziert: Neben den Primär- und Sekundärfeldern befinden sich auf der Großhirnrinde so genannte **Assoziationsareale**. Hier vermengen sich so viele unterschiedliche Signalimpulse, dass sich deren Arbeitsweise nur schwer entschlüsseln lässt.

In den Assoziationsfeldern, die beim Menschen einen Großteil der gesamten Hirnrinde einnehmen, führt das Gehirn gewissermaßen einen inneren Dialog. Während nur relativ wenige Neuronen der Großhirnrinde bestimmte Signale verarbeiten, bleiben die anderen nicht untätig: Sie kommunizieren unablässig miteinander. „Die Hirnrinde ist hauptsächlich mit sich selbst beschäftigt“, so Wolf Singer.

Schon wegen ihrer Größe ist plausibel, dass die Assoziationsfelder für komplexe geistige Leistungen wie das Denken wichtig sein müssen –

ohne dass man freilich genau wüsste, was ein Gedanke eigentlich ist. Immerhin scheint klar zu sein, dass das Assoziationsareal im **präfrontalen Kortex** (PFK), der im Stirnbereich der Großhirnrinde liegt, besondere Bedeutung für unsere Geistesarbeit besitzt.

Der PFK ist ein Generalist. Er steht mit den Sinnessystemen ebenso in Verbindung wie mit Regionen, die Bewegungen steuern und Gedächtnisinhalte speichern. Offensichtlich gehört es zu seinen Aufgaben, unterschiedliche Informationsströme im Gehirn miteinander zu verknüpfen und die Aufmerksamkeit auf für den Betreffenden wichtige Punkte zu lenken.

Tatsächlich können die Nervenzellen im PFK ihr Signalfeuer länger aufrechterhalten als andere Neurone im Gehirn. Dies scheint dafür wichtig zu sein, dass einmal gefasste Pläne nicht sofort wieder ver-

gessen, sondern über einen gewissen Zeitraum behalten werden. Zudem ist der PFK, vielen Forschern zufolge, dann im Spiel, wenn wir die Konsequenzen einer Entscheidung erwägen, wenn wir moralisch handeln, andere Personen oder Ereignisse bewerten oder über uns selbst nachdenken.

Darüber hinaus ist der PFK auch in das limbische System eingebunden. Damit ist eine Gruppe von mindestens einem halben Dutzend über das Großhirn verteilter Regionen gemeint, die vor allem für das Gefühlserleben wichtig sind.

Einem Modell des amerikanischen Neurowissenschaftlers Antonio Damasio zufolge hat der PFK insbesondere die Funktion, frühere emotionale Erfahrungen in Handlungsentscheidungen mit einzubeziehen. Dies könnte gerade dann von Bedeutung sein,

wenn sich eine Situation nicht allein durch eine logisch-rationale Analyse durchschauen lässt oder eine intuitive soziale Bewertung erfordert.

In engem Austausch steht der PFK dabei mit dem Mandelkern (**Amygdala**), einem Hirngebiet, das tief im Schläfenlappen liegt und zu den wichtigsten Schaltstellen im limbischen System gehört.

Der Mandelkern ist eine Art Alarmglocke des Gehirns, die anspringt, wenn wir einen Angreifer mit aggressivem Gesichtsausdruck auf uns zukommen sehen. Die typische Folge: Furcht. Gleichzeitig wird der Körper durch Signale aus dem Mandelkern in Bereitschaft versetzt, möglichst schnell zu fliehen.

Genau umgekehrt liegen die Dinge bei Lust und Freude. So verfügt das Gehirn über eine Art Belohnungssystem – ein diffuses Netzwerk kleinerer Neuronen-Ensembles –,

das eng mit dem limbischen System verknüpft ist. Wird es erregt, stellt sich ein Gefühl von Wohlbefinden und Glück ein.

Bekannt ist, dass derartige interne Belohnungssignale, die vor allem über den Hirnbotsenstoff Dopamin vermittelt werden, die Leistungs- und Lernfähigkeit des Gehirns steigern, aber auch die Entstehung einer Sucht begünstigen können. Denn die unterschiedlichsten Dinge aktivieren das Belohnungssystem: eine gute Mahlzeit, ein Lottogewinn, Kokain – oder Sex.

Indes wäre es sinnlos, im Gehirn den präzisen Ort der Freude oder das Zentrum der Furcht dingfest machen zu wollen. Denn zum einen spielen auch bei den Emotionen stets mehrere Hirngebiete

hinein. Bei sexueller Erregung beispielsweise sind Nervenzellen in der Hirnrinde ebenso aktiv wie Neurone im Zwischenhirn, im Hirnstamm und sogar im Rückenmark.

Zum anderen lassen sich gerade bei den Gefühlen neuronale Signalmuster nicht von körperlichen Vorgängen trennen: Angst ist nicht vorstellbar, ohne dass sich die Pupillen weiten, das Herz rast und der Atem schneller geht. Zwar werden Herz- und Atemfrequenz wie viele andere Körperfunktionen von Nervenzellen im Hirnstamm gesteuert. Doch wirken die Körperprozesse wiederum auf das Gehirn zurück. Im Experiment hat beispielsweise die Substanz Cholecystokinin, ein im Verdauungstrakt produzierter,

Sättigung anzeigender Signalstoff, der über die Blutbahn ins Gehirn gelangt, zu Panikattacken geführt.

Wir weinen nicht, weil wir traurig sind, sondern wir sind traurig, weil wir weinen“ – so hatte es der amerikanische Psychologe William James Ende des 19. Jahrhunderts postuliert. Derart zugespitzt gilt diese These zwar als überholt. Doch argumentieren auch heute die meisten Neurowissenschaftler, dass viele Emotionen ohne „embodiment“ – ohne körperliche Komponente – nicht denkbar seien. Anders ausgedrückt: Das Gehirn allein fühlt nur wenig.

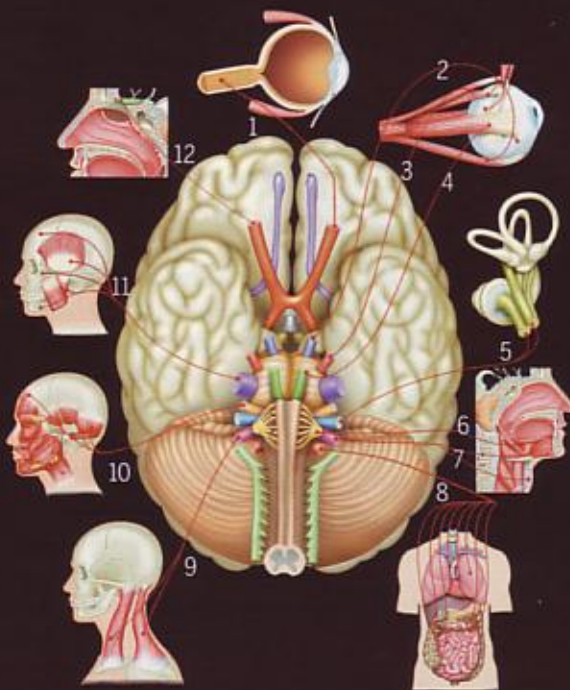
Doch noch aus einem anderen Grund ist es schwierig,

Gefühle präzise im Gehirn zu verorten. So unterscheidet sich die neuronale Verarbeitung von Emotionen stark von Mensch zu Mensch. Beispielsweise kann das Gefühl von Traurigkeit mit sehr unterschiedlichen Erregungsmustern im Gehirn einhergehen. Und der Mandelkern – dem nicht nur bei der Entstehung von Furcht, sondern auch bei positiven Emotionen eine wichtige Rolle zugesprochen wird – lässt sich bei extrovertierten Menschen durch den Anblick glücklicher Gesichter weitaus stärker aktivieren als bei introvertierten. Fast noch überraschender: Auch die Erregungsmuster im Mandelkern wandeln sich offenbar im Laufe des Lebens.

Mag sein, dass die ungeheure Flexibilität des Gehirns Philipp Dörr zugute kam. Einer populären, freilich umstrittenen Vorstellung zufolge ist die rechte Hirnhälfte der für Emotionen wichtigere Teil des Großhirns – im Gegensatz zur vermeintlich logisch operierenden linken. Doch Dörr habe, so Reinhard Werth, keineswegs Einbußen in seinem Gefühlsleben hinnehmen müssen. Er kann lebhaft und still sein, traurig und glücklich, verliebt sich gern und hat eine Freundin. Selbst ohne rechte Großhirnhälfte empfindet Philipp Dörr wie andere Männer Mitte 20 auch. □

Außenkontakt

Über das periphere Nervensystem (siehe Seite 98) unterhält das Gehirn den Kontakt zu allen Bereichen des Körpers sowie zur Außenwelt. Zu diesem Nervensystem gehören auch die zwölf Paar Hirnnerven, die besonders spezialisiert sind. Sie halten die Verbindung zur Netzhaut im Auge [1], zur Augenmuskulatur [2, 3, 4], zum Innenohr [5], zur Zunge (zum Sprechen) [6, 7], zu den inneren Organen [8], zur Halsmuskulatur [9], zum Gesicht (Mimik und Geschmack) [10], zur Gesichtshaut und Kaumuskulatur [11] und zur Nase [12].



Dr. Martin Lindner, 36, hat Medizin studiert und ist Autor in Berlin.
Wissenschaftliche Beratung:
Dr. Reinhard Werth, Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin, Universität München.

Wie die Erinnerung funktioniert

Unser Gedächtnis speichert einen Inhalt als Verknüpfungsmuster von Nervenzellen, das sich bei Bedarf erregen und dann als Erinnerung abrufen lässt

Wissen Sie, wie alt Sie sind? Wie Ihre Großmütter mit Vornamen heißen? Was Sie am Dienstagmorgen letzter Woche gemacht haben? Die erste Frage ist kinderleicht zu beantworten; Nummer zwei und drei sind schon schwieriger. Vielleicht haben Sie Ihre Großmütter das letzte Mal als Kind erlebt, ist der vergangene Dienstag längst im alltäglichen Einerlei untergegangen. Wie schafft es das Gehirn dennoch, bestimmte Dinge im **Gedächtnis** zu speichern, oft ein Leben lang?

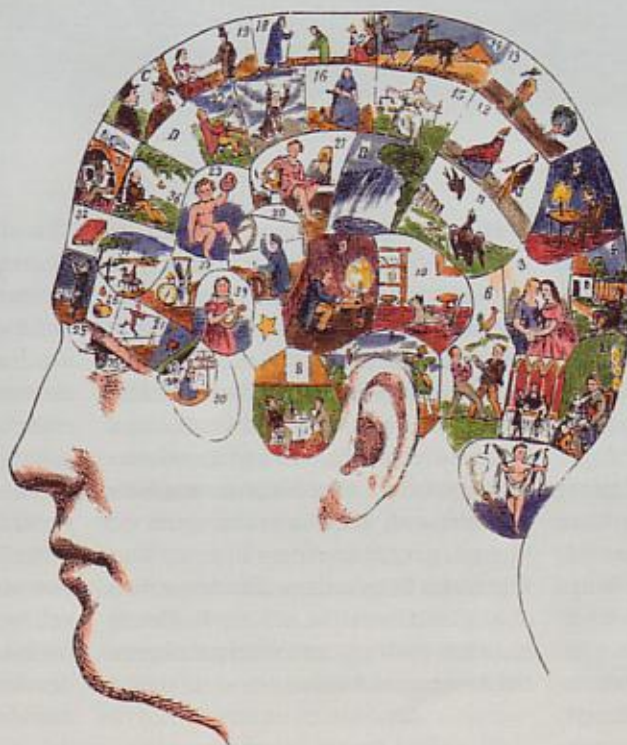
Die Antwort liegt vor allem in den Eigenschaften der **Synapsen**. Sie sind die Verknüpfungspunkte, an denen Nervenzellen Signale einander übergeben (siehe Seite 98). Das Besondere dabei ist, dass Synapsen keine starren Gebilde sind, sondern sich verändern können – je nachdem, ob sie viel oder wenig genutzt werden.

Man stelle sich beispielsweise vor, dass man eine Telefonnummer im Kopf behalten will und sie sich mehrmals hintereinander vorsagt. Jedes Mal werden dabei dieselben Schaltkreise mit denselben Nervenzellen und Synapsen erregt. Und dadurch kann eine bleibende Gedächtnisspur entstehen.

Denn solche fortgesetzten Erregungen der Nervenfasern vermögen die Durchlässigkeit der Synapsen zu verbessern. Es setzt ein biochemischer Prozess ein, bei dem mehr Neurotransmitter (biochemische „Botenstoffe“) ausgeschüttet werden. Gleichzeitig werden die nachgeschalteten Zellen durchlässiger und damit empfindlicher für diese Signale. Bereits durch Erregungen von wenigen Sekunden Dauer kann dieser Pfad für Minuten bis Stunden bestehen bleiben, bis er dann wieder verblasst.

Im Gegensatz zu diesen Kurzzeiterinnerungen bleiben Langzeiterinnerungen durch dauerhafte Veränderungen der Strukturen und Übertragungseigenschaften an den Synapsen erhalten. Bei diesen Umbauvorgängen, die mitunter schon innerhalb von weniger als 30 Minuten ausgelöst werden, können sogar völlig neue Synapsen auswachsen.

Gedächtnisbildung besteht also gewissermaßen darin, dass im Gehirn neue Pfade angelegt und vorhandene immer fester ausgetreten werden. Solche Vorgänge sind offenbar ein universeller



Im 19. Jahrhundert ordneten Mediziner Fähigkeiten, Eigenschaften und auch das Gedächtnis eigenen Hirnarealen zu (Holzstich von 1864)

Lernmechanismus. Allerdings haben verschiedene Hirnanteile auch unterschiedliche Funktionen bei der Gedächtnisbildung, und sie läuft stets in mehreren Schritten ab.

Zunächst werden potenzielle Gedächtnisinhalte – etwa die Fakten, die Ihnen in diesem Text begegnen – im Kurzzeitgedächtnis abgelegt. Dafür scheint insbesondere der **präfrontale Kortex**, ein Teil der Großhirnrinde im Stirnbereich, zuständig zu sein. Das Kurzzeitgedächtnis kann aber nur eine begrenzte Menge von Informationen und auch nur für einige Sekunden, höchstens für wenige Minuten festhalten.

Sollen Gedächtnisinhalte dauerhafter gespeichert werden, muss die Großhirnrinde mit dem Hippocampus und dessen engster Nachbarschaft zusammenarbeiten. Das Hippo-

campus-Gebiet liegt unterhalb der Großhirnrinde im Schläfenlappen und fungiert als eine Art Gedächtnis-Zwischenspeicher. Hier wird festgelegt, wo und wie unverstörbare Erinnerungen schließlich in der Großhirnrinde gespeichert werden. Erst allmählich und durch wiederholtes Abrufen fixieren sich dort, im Langzeitgedächtnis, über Jahre präsen te Erinnerungen.

Eine solche Kooperation zwischen Großhirnrinde und Hippocampus-Region bei der Gedächtnisbildung gilt allerdings nur für Gedächtnisinhalte, die wir bewusst reproduzieren – beispielsweise Englischvokabeln, die wir gelernt haben, oder Erlebnisse, an die wir uns erinnern. Diese Gedächtnisvariante wird **Wissensgedächtnis** genannt.

Im **Verhaltensgedächtnis** sind dagegen automatisierte Abläufe wie das Fahren eines Autos oder das Spielen eines Musikinstruments verwahrt, die wir weithin unbewusst abrufen. Bei diesem „motorischen Lernen“ spielt das Kleinhirn eine herausragende Rolle.

Gemeinsam ist beiden Formen des Langzeitgedächtnisses aber, dass sie das Gehirn verändern: Jedes Mal, wenn es im Laufe des Lebens mit neuen Erlebnissen und Lernprozessen konfrontiert wird, prägt sich das Verknüpfungsmuster der Neuronen untereinander aufs neue um. Ein Gehirn erwirbt dadurch sein unverwechselbares, individuelles Gedächtnis – und verhilft jeder Person zu ihrer spezifischen Identität.

Martin Lindner

»Ein wunderbares Organ«

Lassen sich mit modernen Methoden Gedanken und Gefühle enträtseln?
Gespräch mit dem Hirnforscher Wolf Singer über die Evolution und Anpassungs-
fähigkeit des Gehirns, über Bewusstsein und die Theorie des Geistes

*Herr Professor Singer, die modernen bildgeben-
den Verfahren haben die Hirnforschung revo-
lutioniert. Kann man jetzt dem Gehirn beim
Denken zusehen?*

Wolf Singer: Wir können mithilfe der
Elektroenzephalographie (EEG) beim
Menschen elektrische Signale abgreifen,
die über die Hirntätigkeit Auskunft ge-
ben. Allerdings ist schwer feststellbar, von
welcher Stelle welches Signal kommt. Man
muss mit vernünftigen Annahmen Al-
ternativen eingrenzen und kann dann
angeben, woher die Signale mit welcher
Wahrscheinlichkeit kommen.

Daneben gibt es die Positronenemis-
sionstomographie (PET). Man appliziert
intravenös radioaktiv markierte Substan-
zen, die sich dort anreichern, wo erhöhter
Blutfluss oder Energieverbrauch ist. Aktives
Gehirngewebe ist stärker durch-
blutet und verbraucht mehr Energie. Mit
aufwendigen Messverfahren lässt sich
dann rückrechnen, wo und wann Gehirn-
regionen besonders aktiv waren.

*Wie kann ich die Aktivität erkennen? Daran,
dass mehr Blut fließt?*

Ja, das ist die Grundlage vieler bild-
gebender Verfahren und vor allem des
jüngsten, der funktionellen Kernspin-
tomographie. Man nutzt aus, dass akti-
ves Hirngewebe für die Weitstellung von
Blutgefäßen sorgt. Diese Weitstellung der
Gefäße bedingt, dass in aktivem Hirngewe-
be mehr sauerstoffreiches Blut fließt. Nun
gibt es einen Unterschied in den para-
magnetischen Eigenschaften von sauer-
stoffgebundenem und kohlendioxidge-
bundenem Hämoglobin, der sich mit der
Kernspintomographie messen lässt.

*Wenn wir jetzt über Rainer Maria Rilke
redeten und dann über den Mond, würden Sie
den Unterschied erkennen?*

Nein. Es lässt sich nur angeben, ob
jemand Sprache produziert oder gera-
de zuhört oder ob er sich visuell etwas
vorstellt oder ob er wirklich schaut. Wir
können daneben aber auch messen, ob
jemand Aggression, Ekel oder Mitgefühl
empfindet. Beim Mitgefühl werden zum
Beispiel die vordere Insel und das vordere
Zingulum aktiv. Allerdings werden diese
Bereiche auch dann aktiviert, wenn ein
Mensch gerade in einem inneren Kon-
flikt steht. Man müsste also feststellen,
ob zusätzlich auch in anderen Regionen
Aktivität auftritt, um zwischen Alterna-
tiven zu unterscheiden.

*Was halten Sie von Anwendungen dieser
Technik im Bereich der Neuro-Ökonomie? Etwa,
um mit solchen Verfahren das Markenbewusst-
sein beim Verbraucher abzufragen?*

Da sich semantische Inhalte nicht
fassen lassen, kann allenfalls angege-
ben werden, ob der Proband etwas ge-
sehen hat beziehungsweise ob die vi-
suellen Regionen aktiv waren. Wenn
auch die Amygdala aktiv wird, wurde
wahrscheinlich etwas gesehen, das ek-
lig war. Viel mehr kann nicht abgeleitet
werden.

Könnte das irgendwann präziser werden?

Da gibt es Grenzen. Ich bin sicher, dass
die Tasse hier auf dem Tisch in meinem
Gehirn anders repräsentiert ist als in
Ihrem Gehirn.

Heißt das, wir sehen die Tasse anders?

Ich denke, wir sind uns schnell ein-
ig, dass dies eine Tasse ist und wie sie
aussieht. Aber Sie nutzen wahrschein-
lich andere Neuronenpopulationen als
ich. Deshalb haben wir beim Betrachten
des gleichen Objekts unterschiedliche
Assoziationen.

*Und wenn es jetzt nicht um eine Tasse geht,
sondern um ein Gefühl wie Angst oder Hass?*

Hierbei ist die individuelle Variabilität
nicht so groß. Bei Ekel und großer Angst
werden immer ganz bestimmte Bereiche
der Amygdala aktiviert, und zwar auch in
einer bestimmten Hirnhälfte.

*Haben wir eigentlich unser Leben lang das
gleiche Gehirn?*

Nein. Es finden anfangs dramatische
Veränderungen statt. Bestimmte Nerven-
zellen senden zum Beispiel eine Faser
ins Rückenmark und eine andere über
den Balken in die andere Hirnhälfte. Je
nachdem, um welche Zellen es sich han-
delt, verlieren die einen dann die Faser,
die in den Hirnstamm zieht, und die
anderen die Faser, die über den Balken
in die andere Hemisphäre projiziert. Die
„überschüssigen“ Fasern werden von
Fresszellen vernichtet. Dieser Rückbau
ist ein ganz normaler Prozess in der Ent-
wicklung.

*Und diese Langstreckenverbindungen kom-
men nie wieder?*

Nein. Wenn die kritische Phase der
Entwicklung für die jeweilige Struktur
überschritten ist, erfolgt weder neues Aus-
wachsen noch Vernichten. Die Phasen, in
denen sich das Gehirn noch umgestaltet,
enden etwa mit dem 20. Lebensjahr.

Baut Erfahrung das Gehirn um?

Während der Entwicklung in ganz be-
sonders hohem Maße. Es wird tatsächlich
die Architektur der Verschaltung durch
Erfahrung modifiziert. Wenn ein Kind
schielt und die Bilder der beiden Augen
nicht fusionieren kann, dann führt das zu
Änderungen in der Verschaltung zwischen
den beiden Augen und der Hirnrinde, die
wir im Mikroskop sehen können.



»Die Evolution hat unser Gehirn mit großartiger Lern- und Anpassungsfähigkeit ausgestattet«

Und wenn Sie jetzt einen Schweißer nehmen – also jemanden, der immer die gleichen Vorrichtungen macht. Halten Sie es für möglich, dass diese Erfahrungen in 60 Jahren in seinem Hirn Strukturen hinterlassen haben?

Jedes Lernen hinterlässt eine Veränderung der funktionellen Architektur des Gehirns. Es gibt im Gehirn erregende und hemmende Verbindungen. Wie stark eine bestimmte Verbindung erregt oder wie stark sie hemmt, ist modifizierbar, und zwar von null bis zu der maximal erreichbaren Stärke. Verbindungen können funktionell abgeschaltet werden. Sie bleiben zwar erhalten, aber funktionieren nicht. Auch das geht mit strukturellen Veränderungen einher.

Nur vollziehen sich die Änderungen – etwa die Bildung neuer Synapsen – auf einer Ebene, die man gerade noch im Lichtmikroskop sehen kann. Wenn es nicht zur Bildung von neuen Kontaktstellen kommt, sondern nur zur Verstärkung von vorhandenen, dann lässt sich dies nur noch im Elektronenmikroskop nachweisen: Die Kontaktflächen werden größer. Es gibt aber auch Veränderungen der funktionellen Effizienz von Verbindungen, die sich nur auf molekularer Ebene vollziehen. Rezeptormoleküle, welche die chemischen Übertragungssubstanzen empfangen und in elektrische Aktivität umsetzen, werden zum Beispiel dadurch effektiver, dass Phosphoratom an sie gebunden werden.

Warum macht das Gehirn das?

Weil Lernen auf der Veränderung der Effizienz von Verbindungen beruht und dieses über verschiedene Mechanismen erreicht werden kann. Die kleinstmögliche Modifikation ist die Veränderung auf molekularer Ebene: Wenn dadurch eine Synapse über längere Zeit funktionell ver-

stärkt worden ist, dann erfolgt schließlich eine Strukturänderung. Auflageflächen werden größer, und mehr Rezeptormoleküle werden in die Membranen eingebaut. Solches lässt sich dann schon im Elektronenmikroskop erkennen.

Halten Sie es für möglich, dass sich Hirnleistungen mithilfe von Medikamenten oder Eingriffen wesentlich manipulieren lassen?

Es wird nicht leicht sein, die Evolution zu verbessern. Sie hatte sehr, sehr viel Zeit, auszuprobieren, was die besten Lösungen für bestimmte Probleme sind. Es war nicht damit zu rechnen, dass Gehirne irgendwann einmal lernen, Differentialgleichungen zu lösen...

...oder dass wir mit 200 km/h über die Autobahn fahren...

Ja, dafür sind wir eigentlich nicht gebaut. Und es geht trotzdem, weil die Evolution unsere Gehirne mit großartiger Lern- und Anpassungsfähigkeit ausgestattet hat. Zurzeit wird versucht, über pharmakologische Maßnahmen die Lernfähigkeit zu verbessern. Man kennt die biochemischen Kaskaden recht gut, die beim Lernen zur Veränderung der synaptischen Übertragung führen. Durch Steigerung der Effizienz dieser Mechanismen erhofft man sich eine Verbesserung der Lernfähigkeit.

Halten Sie das für möglich?

Nur bedingt. In Versuchen mit Ratten ist es gelungen, bestimmte Lernleistungen zu verbessern. Es stellt sich aber die Frage, ob es gut ist, mehr zu lernen, als durch natürliche Grenzen vorgegeben ist. Vermutlich sind die Lernmechanismen daraufhin ausgelegt, nur so viel zu speichern, wie in den Schlafphasen, die

zur Verfügung stehen, konsolidiert und geordnet werden kann.

Wäre es nicht eine Aufgabe für die Hirnforschung, sich stärker um die Demenz im Alter zu kümmern?

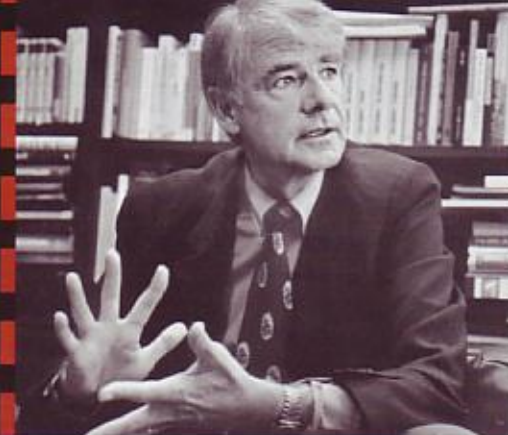
Das Gehirn wird, auch wenn es nicht krank ist, im Alter weniger leistungsfähig. Die Synapsendichte nimmt ab, die Hirnrinde wird dünner, die Zahl der Leitungsbahnen verringert sich. Vieles kann dabei durch Erfahrung und Routine kompensiert werden, aber man wird langsamer, und die Sinnessysteme werden unempfindlicher. Das Gleichgewichtsorgan reagiert weniger sensibel, der Gang wird unsicher, man geht halt dann am Stock. Ob Eingriffe in jene Mechanismen, die Lernprozessen zugrunde liegen, hier etwas vermögen, ist offen. Eine unangepasste Steigerung der Lernfähigkeit könnte auch zur Überlastung des Systems führen. Was, wenn mir bei der Suche eines Zuges nach Bielefeld auch alle die Züge in Erinnerung bleiben, die ich gar nicht nehmen wollte?

Der Alterungsprozess kann also nicht aufgehalten werden?

Der Prozess ist fortschreitend. Man altert einem genetischen Programm folgend. Reparaturvorgänge, die in jungen Jahren ständig ablaufen, kommen langsam zum Stillstand. Die Evolution hat offenbar keine Mechanismen eingebaut, die uns Ewigkeit sichern. Eingriffe in die Prozesse, die normales Altern bedingen, wären in vieler Hinsicht problematisch.

Wie würde ein sehr, sehr langlebiges Gehirn mit dem Problem fertig, ständig Neues speichern zu müssen? Irgendwann würden vermutlich die Speicher voll laufen und es müsste Vergessen einsetzen. Was aber wäre ein Leben, das sich mit der

»Das Bewusstsein erlaubt uns, das zukünftige Verhalten eines anderen treffender vorauszusagen. Aber es befähigt auch zum Schwindeln«



Zeit vergisst? Sollte es in Zukunft gelingen, die Alterung der Körperfunktionen hinauszuschieben, blieben immer noch die zunehmenden Beschränkungen der kognitiven Leistungen unseres Gehirns.

Wie interpretieren Sie das Auftauchen von so etwas wie einem Gehirn in diesem Universum? Ist es selber Ausdruck eines kollektiven Gehirns, ist es selbst, da es Natur ist, sozusagen der Blue-Print von irgendetwas?

Ich weiß es nicht. Aber schon das Überschaubare ist wunderbar genug, die Aggregation von Materie zu reproduktionsfähigen Organismen etwa. Dadurch kam die Evolution in Gang, die über Reproduktion, erwürfelte Veränderung und Selektion immer neue, immer komplexere Strukturen hervorbrachte. Auch das Gehirn ist auf diese Weise entstanden, ein wunderbares Organ, das über universelle Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung verfügt und aufgrund seiner Lernfähigkeit und seiner kognitiven Funktionen letztlich die biologische in die kulturelle Evolution überführte.

Das Immunsystem hat verwandte Eigenschaften. Es ist auch ein kognitives System. Es kann Antigene erkennen, kann sich erinnern und angepasst reagieren. Es lässt sich nachvollziehen, wie informationsverarbeitende Systeme entstanden, die in der Lage sind, aus der Umwelt Informationen aufzunehmen, zu verarbeiten, zu speichern und angepasste Reaktionen zu bewirken. Selbst Organismen, die noch kein Nervensystem besitzen, verfügen über diese Fähigkeiten.

Leben ist von Anfang an darauf angelegt, nicht nur Energie aufzunehmen und in geordnete, reproduktionsfähige Strukturen zu wandeln, sondern auch, Information aufzunehmen und daraus Reaktionen abzuleiten.

War es eine logische Konsequenz dieser Entwicklung, dass die Organismen irgendwann – vermutlich ab der Primatenebene – angefangen haben, über sich selbst nachzudenken, also das Ich-Bewusstsein zu entwickeln?

Ich glaube, die Frage sollte besser lauten, warum die Fähigkeit des Sich-seiner-gewahr-Seins erhalten geblieben ist. Warum hat es sich bewährt, sich seiner bewusst zu sein? Information, die uns bewusst wird, unterscheidet sich von nicht bewusster Information im wesentlichen dadurch, dass sie in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt und damit aus dem Vielen ausgewählt wird, das ständig auf uns einströmt. Offenbar ist es von Vorteil, auswählen zu können und das Ausgewählte nach anderen Regeln zu behandeln, als es im Unbewussten möglich wäre.

Wenn man über Bewusstsein redet, muss man auch über die Theorie des Geistes reden, über die nur Menschen und nicht Tiere verfügen. Wir können uns vorstellen, was im Kopf eines anderen Menschen vor sich geht, wenn dieser sich in einer ganz bestimmten Situation befindet, auch wenn wir es ihm nicht ansehen können.

Hat das auch einen Zweck?

Natürlich, es erlaubt uns, das zukünftige Verhalten des anderen treffender vorauszusagen und damit das eigene Verhalten besser anzupassen. Aber es befähigt auch zum Schwindeln. Nichtmenschliche Primaten können nur sehr eingeschränkt täuschen.

Wie sehen Sie die Chancen für ein „Hybridgehirn“, vielleicht auch zur Behebung von Altersproblemen?

Ein inzwischen sehr bewährtes Beispiel für technische Hilfen ist das Cochlea-Implantat für Taube. Es belegt, dass peri-

phere sensorische Funktionen relativ gut durch technisches Gerät ersetzt werden können – vor allem dann, wenn die große Lern- und Anpassungsfähigkeit des jungen, sich noch entwickelnden Gehirns genutzt werden kann.

Als Nächstes kommt vermutlich die künstliche Netzhaut. Obgleich hier die technischen Probleme weitaus größer sind, wird es Lösungen geben, weil der neuronale Code bekannt ist. Man weiß, wie man die Sehnervenfasern reizen müsste, damit das Gehirn diese Aktivitätsmuster zu sinnvollen Seheindrücken verarbeiten kann.

Auch ist es schon möglich, die Aktivität bestimmter Großhirnrindenbereiche abzugreifen und damit Roboter zu steuern. Vollständig gelähmte Menschen können durch diese technischen Hilfen schon jetzt zumindest sehr einfache Verrichtungen wieder selbst ausführen. Sie können Cursor auf Bildschirmen bewegen und damit zum Beispiel buchstabieren oder Schalter betätigen.

Sehr viel schwieriger wird es sein, wenn die peripheren Sinnesorgane ganz zerstört sind – also wenn der Hörnerv oder der Sehnerv degeneriert ist –, durch direkte elektrische Reizung der Hirnrinde interpretierbare sensorische Muster zu erzeugen. Das liegt daran, dass wir den neuronalen Code noch nicht verstanden haben, nach dem das Gehirn Inhalte auf distributive Weise repräsentiert.

Halten Sie es für möglich, dass moderne Verfahren wie etwa die Kernspintomographie dabei helfen können, die Organisation des Gehirns so gut aufzulösen, dass man irgendwann solche Codes fassen und simulieren kann?

Nein, da sind sich die Experten einig. Wir haben das Instrumentarium, um auf zellulärer und molekularer Ebene die Funktionsweise von Nervenzellen voll-

ständig aufzuklären. Wir haben auch die Methoden, um auf der Makroebene festzustellen, welche Hirnstrukturen für bestimmte Leistungen zuständig sind. Aber mit keiner derzeitigen Methode werden wir herausfinden, was der neuronale Code ist, wie aus der Kommunikation zwischen den Nervenzellen die entsprechenden Leistungen entstehen.

Der neuronale Code ist in den Gesprächen verschlüsselt, die die Nervenzellen untereinander führen. An der Codierung eines bestimmten Wahrnehmungsinhaltes, an der Koordination einer bestimmten Bewegung nehmen viele tausend Neuronen teil. Es muss ein ungeheuer komplexer, dynamischer Code sein, der auf einer Abstraktionsebene verhandelt wird, die uns intuitiv nicht zugänglich ist.

Ist es methodisch unmöglich?

Die Probleme sind prinzipiell lösbar, aber unsere Messverfahren werden nicht ausreichen. Wir sind weiterhin darauf angewiesen, die Aktivität einzelner Nervenzellen zu erfassen, und das erfordert den Einsatz invasiver Techniken, die beim Menschen nicht angewandt werden können. Aber vielleicht gelingt es, Mikrochips zu bauen, die so klein sind, dass sie ohne zu stören im Hirngewebe verbleiben können und lokale Potenziale messen und das Ergebnis senden.

Man könnte dann unter konstanten Bedingungen am frei beweglichen Tier die Aktivität einer sehr großen Zahl von Neuronen erfassen und mit dem jeweiligen Verhalten in Beziehung setzen.

Könnte man die Nervenzellen sozusagen miteinander reden hören?

Fast alles, was wir zurzeit zu wissen glauben, haben wir aus Untersuchungen gelernt, bei denen wir jeweils nur von einer einzigen Nervenzelle abgeleitet haben. Das mutet seltsam an, wenn man bedenkt, dass die Funktionen des Gehirns auf dem koordinierten Zusammenspiel von sehr vielen Neuronen beruhen. Ähnliche Probleme stellen sich auch in anderen Feldern biologischer Forschung.

Deshalb haben wir unlängst das Frankfurt Institute for Advanced Studies ge-

gründet. In vielen Bereichen der Biologie geht es heute darum aufzuklären, nach welchen Prinzipien sich Vielkomponentensysteme selbst organisieren, welcher Art die dynamischen Wechselwirkungen sind, wie in den Relationen der verteilten Aktivitäten Informationen gespeichert, verarbeitet und ausgewertet werden. In all diesen Fällen muss die Aktivität der Komponenten erfasst und mit eigens dafür entwickelten mathematischen Verfahren analysiert werden. Dies erfordert ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Experimentatoren und Theoretikern – eine Kooperation, die neue, flexible Institutsstrukturen erfordert.

Wer über Hirnforschung spricht, darf die Erziehung nicht aus dem Auge verlieren. Wie sollen Schulsystem und Kindergarten aussehen?

Wir können darauf verweisen, dass es kritische Phasen in der Hirnentwicklung gibt, während derer bestimmte Funktionen entwickelt werden müssen, und wir können die neuronalen Mechanismen angeben, welche der erfahrungsabhängigen Ausbildung von Gehirnstrukturen und -funktionen zugrunde liegen. Diese Fakten verdeutlichen, wie wichtig Erfahrung, Betreuung und Erziehung für die Ausbildung von Hirnfunktionen sind.

Auch ist es gut zu wissen, dass Kleinkinder zwei Sprachen parallel und ohne nennenswerte Interferenz erlernen können. Zudem sollte bedacht werden, dass es nicht genügt, nur analytisches Denkvermögen und die Beherrschung rationaler Sprachen einzuüben. Oft werden darüber die vielen anderen Möglichkeiten der Kommunikation außer acht gelassen. Wie dankbar wäre jeder von uns, wenn er mindestens ein Instrument so beherrschte, dass er das, was er spürt, auch sofort in Töne umsetzen könnte. Wer diese Fertigkeit beherrscht, der weiß, wie wunderbar es ist, wenn man anders kommunizieren kann als nur mit der rationalen Sprache. □

Prof. Dr. Wolf Singer, 62, ist Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt/Main und einer der renommiertesten Hirnforscher Deutschlands. Die Fragen stellten Joachim Müller-Jung, Frank Schirrmacher und Reinhard Wandtner für die „Frankfurter Allgemeine Zeitung“.

Östradiol (hier eine Aufnahme von Kristallen in polarisiertem Licht) ist das wirksamste natürliche Hormon aus der Gruppe der Östrogene, weiblicher Geschlechtshormone. Es wird in den Eierstöcken gebildet und wirkt unter anderem an der Ausbildung der sekundären weiblichen Geschlechtsmerkmale mit



Molekulare Boten im Blut

Sie koordinieren das Wachstum, erzeugen Stress-Symptome, regeln den Blutzuckergehalt und lösen bei Frauen den Eisprung aus: Hormone sind chemische Botschafter, die meistens von Drüsen ausgeschüttet werden und binnen Sekunden jede Zelle im Körper erreichen

Text: Volker Stollorz

Das Hormonsystem ähnelt einer Paket-anlage, die chemische Nachrichten an die verschiedensten Orte im Körper trägt

Die Ampel springt auf Grün. Gedankenverloren setzt man einen Fuß auf den Zebrastreifen – und weicht einen Augenblick später erschrocken zurück. Ein Auto rast Zentimeter entfernt an einem vorbei. Man ist starr vor Schreck. Das Herz schlägt wie wild. Alle Glieder zittern.

Schrecksekunde heißt so etwas. Im Körper läuft dabei eine fein orchestrierte Stressreaktion ab. Sie sorgt dafür, dass unser Geist bei Gefahr hellwach ist, unsere Muskeln fluchtbereit sind und der ganze Körper in Alarmbereitschaft versetzt wird. Diesen nur wenige Sekunden dauernden Vorgang steuert unser Gehirn über das vegetative Nervensystem (siehe Seite 98) – im Verbund mit einer Gruppe chemischer Botschafter, den **Hormonen**.

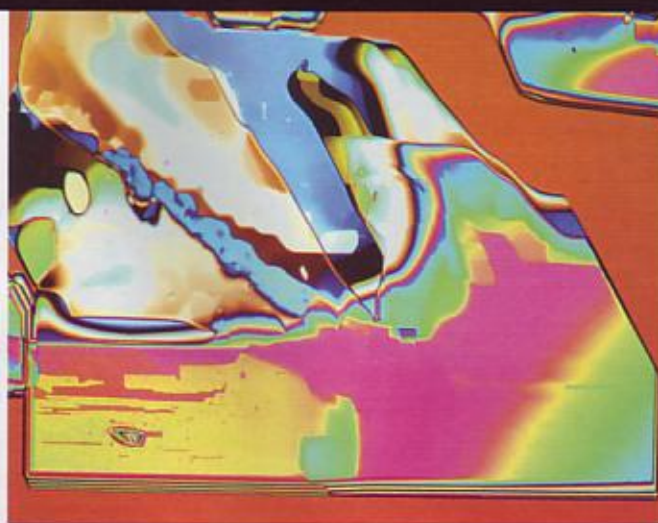
Das Nervensystem kann man sich als ein Telefonnetz vorstellen, in dem innerhalb von Millisekunden Nachrichten überall dorthin versendet werden, wo im Körper Telefonkabel – sprich Nervenfasern – verlegt sind. Melden zum Beispiel die Sinneszellen des Auges über schnelle Nervenverbindungen ans Gehirn, dass gerade ein Auto vorbeirauscht, werden vom Bewegungszentrum in der Hirnrinde sofort Nervensignale zu den beteiligten Muskeln geschickt, um die Körperbewegung zu stoppen. Der ganze Körper wird alarmiert, jetzt alle seine Leistungsreserven bereitzuhalten.

Um das aber zu erreichen, veranlasst das Gehirn die

Freisetzung so genannter Stresshormone. Der Begriff Hormon (vom griechischen *orman* = antreiben) beschreibt zutreffend, was so ein chemischer Botschafter im Körper tut: Er operiert in einem Kommunikationssystem, das dem langsameren Paketsystem der Post vergleichbar ist. Im Blutkreislauf des Körpers reisende „Hormonpäckchen“ sind zwar ein wenig länger unterwegs als Nachrichten per Nervenfasern. Dafür aber können sie alle Zellen im Körper erreichen – und das immerhin innerhalb weniger Sekunden. Das kann für Flucht, Verteidigung oder Kampf überlebenswichtig sein, weil es kurzzeitig „übermenschliche Kräfte“ freizusetzen hilft.

Dieses System hat seine Wurzeln in jener fernen Zeit, als es noch gar keine mehrzelligen Organismen gab. Als dann die Evolution Organismen mit vielen spezialisierten Körperzellen hervorzubringen begann, trat ein Koordinationsproblem auf: Auch Zellen und Organe, die räumlich weit entfernt voneinander arbeiteten, mussten miteinander kommunizieren können – und seither tun sie dies eben auch mithilfe jener chemischen Botschafter.

Im Falle einer Schrecksekunde versendet der **Hypothalamus**, ein spezieller Hirnteil, „Päckchen“ (um im Bild zu bleiben) mit einem Hormon an eine nachgeschaltete Paketversandzentrale, die Hirnanhangdrüse. Die schickt daraufhin Pakete mit ACTH



Testosteron lässt bei Männern Bärte sprießen, Muskeln wachsen und Samenzellen reifen. Zudem steigert es offenbar Aggressivität und Risikobereitschaft – auch bei Frauen, die das Hormon in geringen Mengen ebenfalls produzieren

(Adenocorticotropes Hormon) über den Blutstrom unter anderem zu den Nebennieren. Diese setzen nun aus Hormonlagern in ihrer Rinde große Mengen des Stresshormons Kortisol frei. Gleichzeitig lösen Nervensignale die Ausschüttung von Adrenalin und Noradrenalin aus dem Mark der Nebennieren aus.

Einerseits regelt die Kaskade dieser Stresshormone jetzt in Sekundenbruchteilen alle körperlichen Funktionen herunter, die nicht dringend benötigt werden: Sie bremst Wachstumsvorgänge und den Verdauungsprozess. Andererseits kurbeln die Hormone die Fett- und Zuckerverbrennung an, um Gehirn und Muskeln mit viel Energie zu versorgen. Erst wenn die Gefahr vorbei ist, ebbt der Hormonkick ab.

Die meisten Hormone, nämlich die so genannten endokrinen, treiben mit dem Blut oder gelangen durch **Diffusion** – indem sie also Gefäß- und Zellwände durchsickern – in schwer zugängliche Regionen des Körpers. Wissenschaftler haben heute mehr als 50 dieser chemischen Botschafter erforscht. Manche sind fettlös-

lich, so die Steroidhormone: komplizierte chemische Verbindungen, zu denen die Sexualhormone zählen. Andere lösen sich in Wasser und bestehen aus Eiweißen (**Proteinen**), kurzen Eiweißketten (Peptiden) oder stickstoffhaltigen Molekülen (Katecholaminen).

Einige wirken kurzfristig – neben den Stresshormonen zum Beispiel solche, die Ernährung und Stoffwechsel regulieren. So schüttet das „Inselorgan“ der Bauchspeicheldrüse nach jeder Mahlzeit Insulin aus. Dank dieses Peptidhormons können etwa Muskelzellen den im Blut zirkulierenden Traubenzucker aufnehmen, damit er als Treibstoff für Bewegungen genutzt werden kann. Der Dünndarm gibt zugleich Hormone ins Blut ab, die dem Gehirn Sättigkeit signalisieren. Bei einer Überfunktion der Schilddrüse erhöhen deren Hormone unter anderem Körpertemperatur und Herzfrequenz.

Andere Hormone und die sie herstellenden **Drüsen** dienen dazu, längerfristige physiologische Vorgänge im Körper zeitlich und räumlich zu synchronisieren. Sie sorgen

Hormondrüsen steuern unseren Organismus

Eine kleine Zahl spezialisierter Gewebe stellt die wichtigsten chemischen Botenstoffe im Körper her

Zirbeldrüse (vom Hypothalamus verdeckt)

Melatonin regelt den Tag-Nacht-Rhythmus, die Zirbeldrüse gilt daher auch als „biologische Uhr“. Neueren Forschungen zufolge soll Melatonin das Immunsystem stärken, Herz-Kreislauf-Problemen sowie Tumoren vorbeugen und den Alterungsprozess verzögern.

Hypothalamus

Oxytocin führt zur Kontraktion der glatten Muskulatur, regt bei Schwangeren die Geburtswen und den Milchfluss der Brustdrüse an. Außerdem spielt es als „Kuschelhormon“ zwischen Paaren sowie Mutter und Kind eine wichtige Rolle.

Vasopressin fördert die Wasserresorption in den Sammelrohren der Niere, erhöht dadurch Blutvolumen und Blutdruck. Beide Hormone werden im Hinterlappen der Hirnanhangdrüse gespeichert und von dort abgegeben.

Hirnanhangdrüse (Vorderlappen)

ACTH reguliert die Hormonproduktion der Nebennierenrinde.

Somatotropin stimuliert Wachstum und Entwicklung von Knochen und Muskeln, bei Kindern vor allem das Längenwachstum.

Prolaktin bewirkt bei Frauen das Wachstum der Brustdrüse, prägt die Milchgänge aus, regt Synthese und Abgabe der Milch an. Außerdem beeinflusst es den Ovulationszyklus.

FSH (Follikel stimulierendes Hormon) veranlasst bei der Frau etwa die Follikelreifung im Eierstock (siehe Seite 122) und beim Mann die Entwicklung der Spermien.

LH (luteinisierendes Hormon) löst bei Frauen den Eisprung aus und hilft, die Gebärmutter Schleimhaut für die Einnistung der befruchteten Eizelle vorzubereiten. Bei Männern steigert es die Testosteronproduktion im Hoden.

Inselorgan der Bauchspeicheldrüse

Insulin senkt den Blutzuckerspiegel und regt Leber- sowie Muskelzellen an, Zucker in seine Speicherform Glykogen umzuwandeln und einzulagern. Auch Eiweißbausteine und Fettsäuren werden vom Insulin aus dem Blut „herausgefischt“ und in die Zellen transportiert.

Glukagon, Gegenspieler von Insulin, veranlasst die Leber, ihren Speichersucker ins Blut auszuschütten. Bei Energiemangel kurbelt Glukagon die Verbrennung von Fettreserven an und veranlasst die Muskeln, Eiweiße in Zucker umzuwandeln.

Eierstöcke

Östrogene und **Gestagene** sind die wichtigsten Sexualhormone der Frau. Sie steuern das Wachstum von Brüsten, Schambehaarung und weiblichem Äußeren, die Reifung der Eizellen, den Menstruationszyklus, die Schwangerschaft, den Geburtsvorgang und die Stillzeit. Außerdem stimulieren Östrogene

die Knochenreifung, senken den Cholesterinspiegel und führen zu vermehrter Wassereinlagerung im Gewebe.

Schilddrüse

Trijodthyronin und **Thyroxin** kurbeln den Zellstoffwechsel an und regulieren den Grundumsatz. Zusammen mit Somatotropin fördern sie das Knochenwachstum, Reifung und Entwicklung des Nervensystems.

Kalzitinin ist wichtig für den Knochenaufbau, denn es fördert die Einlagerung von Kalzium und Phosphat in die Knochen.

Nebenschilddrüsen

Parathormon ist der Gegenspieler von Kalzitinin.

Nebennierenrinde

Androgene stimulieren Proteinstoffwechsel und Muskelaufbau, weshalb sie auch als Dopingmittel (Anabolika) verwendet werden.

Aldosteron ist das „Dursthormon“ des Körpers. Es wird bei Flüssigkeitsmangel verstärkt ausgeschüttet, wirkt auf die Niere ein und beeinflusst den Wasserhaushalt durch Kaliumausscheidung und Natriumrückgewinnung.

Kortisol beeinflusst den Kohlenhydrat-, Fett- und Eiweißstoffwechsel. Es wird vermehrt in Stresssituationen ausgeschüttet und mobilisiert dann die Energiereserven des Körpers; baut Aminosäuren in der Leber ab und erhöht den Blutzuckerspiegel. Das Hormon hemmt zudem die Immunabwehr und unterdrückt Entzündungen. Der Kortisolgehalt im Blut schwankt stark, am höchsten ist er morgens zwischen 6 und 9 Uhr.

Nebennierenmark

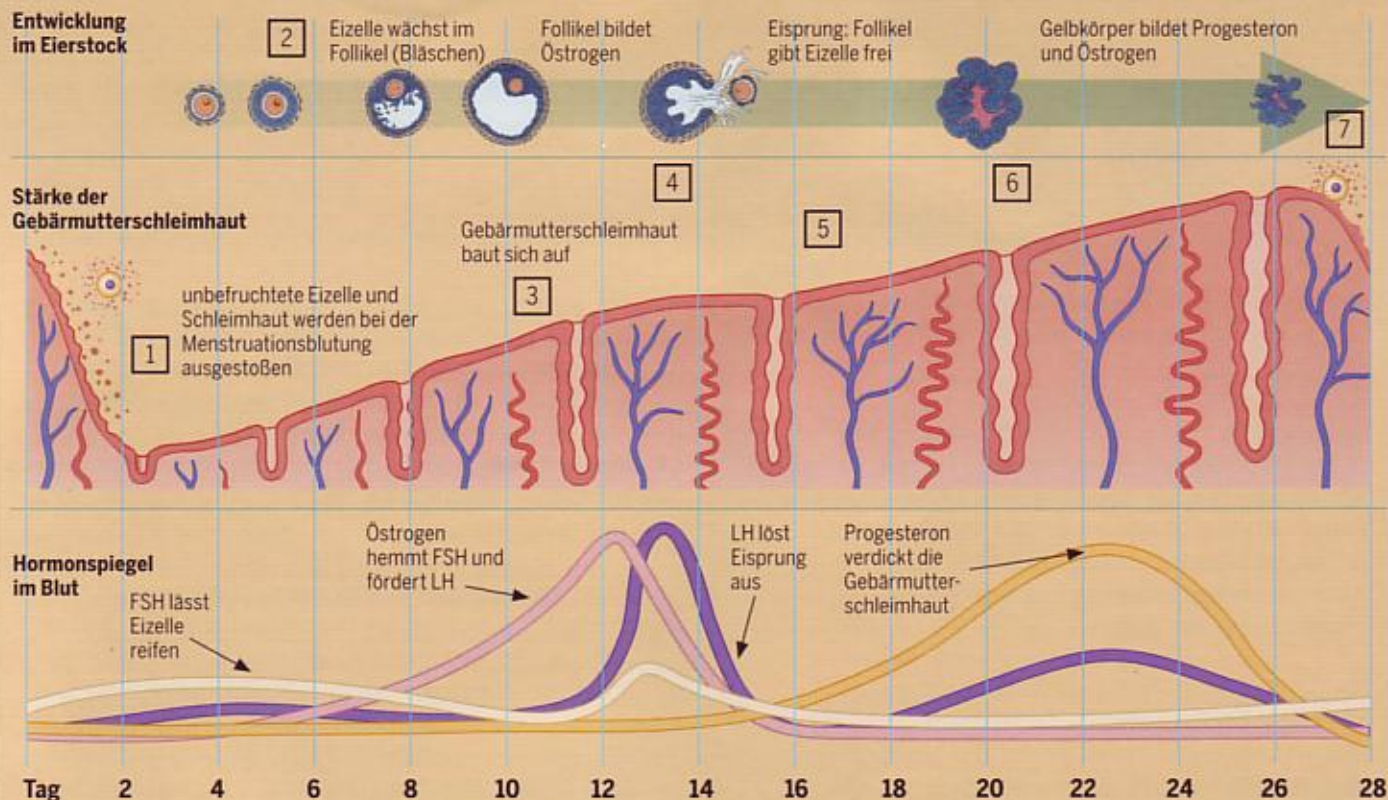
Adrenalin und **Noradrenalin** sind „Stresshormone“. Sie werden unter Stressbedingungen ausgeschüttet und wirken auf den gesamten Organismus, indem sie sofort Glukose freisetzen und den Abbau von Fetten zu Fettsäuren anregen – Energie für den Körper. Zudem steigern sie den Blutdruck, das Herz „pumpt“ und die Blutgefäße verengen sich in bestimmten Regionen.

Hoden

Testosteron ist das wichtigste männliche Sexualhormon. Dessen Produktion wird durch LH stimuliert. Testosteron steuert beim männlichen Embryo die Geschlechtsdifferenzierung und beim Fetus die Reifung der Genitalien. In der Pubertät regt Testosteron die Produktion der Spermien sowie die Ausbildung der sekundären Geschlechtsmerkmale an: Bartwuchs, kräftiger Körperbau, Kehlkopf-wachstum. Bei Erwachsenen beeinflusst es Geschlechtstrieb, Verhalten und Muskelaufbau.

Juliane von Mittelstaedt

Diese Übersicht beschreibt nur die wichtigsten Hormone und Wirkungen. Insgesamt sind rund 50 Hormone erforscht, jedoch sehr viel mehr bekannt. Auch die komplexen Wechselbeziehungen zwischen den Hormonen bleiben hier unberücksichtigt.



Wie präzise und komplex Hormone zusammenwirken, zeigt der Hormonzyklus der Frau besonders deutlich. Er beginnt mit der monatlichen Regelblutung, bei der ein Teil der Gebärmutter Schleimhaut abgestoßen wird [1]. Ausgelöst durch das von der Hirnanhangdrüse produzierte Hormon FSH, reift nun in einem Follikel (Bläschen) des Eierstocks eine neue Eizelle heran [2]. Der Follikel bildet Östrogen, das die Schleimhaut wieder wachsen lässt [3] und die Produktion von LH in der Hirnanhangdrüse fördert. LH löst etwa am 14. Tag den Eisprung aus [4], wobei sich das Ei aus dem Follikel löst und anschließend durch den Eileiter in die Gebärmutter wandert [5]. Der geplatzte Follikel wird zum Gelbkörper [6] und bildet Östrogene sowie Progesteron, die die Schleimhaut für die Einnistung des Eies vorbereiten. Wird das Ei nicht befruchtet, verkümmert der Gelbkörper, Progesteron- und Östrogenspiegel sinken, die Schleimhaut wird – mitsamt dem Ei – erneut abgestoßen [7].

beispielsweise dafür, dass während der Wachstumsphase alle Knochen zur gleichen Zeit länger, Herz und Nieren synchron größer werden.

Wieder andere chemische Botschafter werden in bestimmten Zyklen oder Lebensabschnitten wirksam. Zu ihnen gehören die Sexualhormone. Hierzulande beginnen bei Mädchen im Alter zwischen zehn und zwölf Jahren – aufgrund hormoneller Signale aus dem Gehirn – die Eierstöcke Hormone auszuschütten, die unter anderem Brüste wachsen, Achsel- und Schamhaare sprießen und Eizellen reifen lassen, das Becken verbreitern

und die Körperfettverteilung verändern. Bei Jungen setzt die Pubertät meist mit zwölf bis 14 Jahren ein, lässt Hoden und Penis wachsen und die Spermienproduktion beginnen. Sie prägt zudem typisch männliche sekundäre Geschlechtsmerkmale wie Bartwuchs, tiefere Stimme, muskulöseren Körperbau aus. Auch die Gefühlswelt der Jugendlichen wird durch diese hormonelle Umstellung beeinflusst. Und das männliche Sexualhormon Testosteron steigert die Aggressivität, wie manche Untersuchungen vermuten lassen.

Bei Frauen schüttet der Eierstock kurz vor dem monatlichen Eisprung mehr Östrogen aus, ein Hormon, das unter

anderem die Gebärmutter Schleimhaut für die Einnistung einer befruchteten Eizelle vorbereitet. Zugleich gelangt Östrogen mit dem Blut ins Gehirn. Dort signalisiert es über einen sich selbst verstärkenden Regelkreis, wann genau die Gebärmutter bereit ist für den monatlichen Eisprung. Die Monatsblutung (Menstruation) setzt schließlich ein, wenn die Bildung des Östrogens und eines zweiten Hormons im Eierstock, des Progesterons, aufhört (siehe Kasten oben).

Dieser Zyklus ebbt um das 50. Lebensjahr der Frauen ab. In der Lebensphase, die diese Wechseljahre einleiten, reifen immer weniger Eizellen zur Befruchtung heran, wird die

Gebärmutter Schleimhaut zunehmend dünner und bleibt die Monatsblutung aus. Nun wird Östrogen nur noch in sehr viel geringeren Mengen in der Nebenniere gebildet – übrigens auch beim Mann.

Östrogen spielt aber auch nicht zuletzt bei der Haut- und Knochenbildung von Frauen eine zentrale Rolle. Am Beispiel dieses Hormons wird deutlich, dass sich oft erst im jeweiligen Zielgewebe oder sogar erst in der Zielzelle entscheidet, welche Botschaften ein Hormon an welchen Ort im Körper überbringt und wie dieser darauf reagiert. Im Bild des Paketverteilungssystems könnte man sagen, dass stets nur die Häuser eines Ortes mit



Progesteron, ein Gelbkörperhormon, bereitet die Gebärmutter-schleimhaut auf die Einnistung einer befruchteten Eizelle vor

einem Päckchen bedacht werden, auf welche die Adresse passt. Doch selbst wenn die Päckchen das Gleiche enthalten, verwenden die Adressaten den Inhalt womöglich für ganz unterschiedliche Zwecke.

Zellen, in denen Hormone wirken sollen, tragen Erkennungsmoleküle (**Rezeptoren**), die selbst kleinste Hormonkonzentrationen im Blut registrieren. Zellen ohne passende Rezeptoren ignorieren einfach die hormonellen Signale. Erst wenn diese an der richtigen Adresse angekommen sind, kann ihre Botschaft gelesen werden.

Stresshormone etwa – als Beispiel für fettlösliche Hormone – dringen in die Zellen

und binden sich dort an passende Rezeptoren, die dann samt Hormon in den Zellkern wandern (siehe Seite 38). Dort lagert sich dieser Komplex an bestimmte Orte im Erbgut an und schaltet jene Gene an oder aus, die entsprechende Stoffwechselvorgänge in den Zielzellen regeln.

Eines der wichtigsten Prinzipien der Hormonwirkung ist die so genannte Rückkopplung: Hormone lösen im Zielgewebe Wirkungen aus, die zu einer Erhöhung oder Minderung ihrer eigenen Produktion führen können. So ist zum Beispiel das Gehirn eine bedeutende Drüse, deren Hormone dem Körper über den tief im Zwischenhirn liegen-

Manche Botenstoffe wirken in Sekunden, andere beeinflussen ganze Lebensphasen und lösen zum Beispiel die Wechseljahre aus

den Hypothalamus unablässig Befehle erteilen. In dieser „Postsammelstelle“ für Hormonpäckchen wird ständig eine Vielzahl davon geöffnet, damit das Gehirn zum Beispiel erfährt, ob dem Körper warm oder kalt, ob er hungrig ist oder schläfrig. Alle Nachrichten werden hier ausgewertet und im neuronalen Diskurs mit dem gesamten Gehirn in neue Steuerbefehle umgesetzt.

Die Lehre von den Hormonen hat sich seit ihren Anfängen im 20. Jahrhundert gewaltig erweitert. Seit die Molekularbiologie den Forschern hilft, Hormonwirkungen im Detail zu verstehen, ist der klassische Hormonbegriff – nämlich, dass sie von innersekretorischen (**endokrinen**) Drüsen gebildet werden und über den Blutkreislauf an ihren Wirkungsort gelangen – unscharf geworden.

So gibt es Hormone, die jene Zellen direkt beeinflussen, die sie herstellen. Bei dieser **autokrinen** Hormonwirkung verschickt der Absender quasi Pakete an sich selbst. Andere Hormonpakete dagegen sind nur an direkte Nachbarzellen des Absenders adressiert und erreichen diese durch Diffusion (**parakrine** Hormonwirkung).

Manchmal verwandeln sich sogar gewöhnliche Körperzellen in Paketversendestellen und produzieren Hormone. Ein Beispiel ist das Fettgewebe: Fettzellen schütten das Hormon Leptin aus, dessen Konzentration im Blut

dem Gehirn signalisiert, wie gefüllt die Fettspeicher des Körpers sind.

Nachdem Forscher die Rolle dieses Hormons entdeckt hatten, kamen sie auf die Idee, dicke Menschen durch Leptingaben dünner zu machen. Sie hofften, man könne dem Gehirn damit gut gefüllte Fettspeicher vorgaukeln und so den Appetit zügeln. Das aber hat nur selten funktioniert, schon weil nur sehr wenige Menschen unter Leptinmangel leiden.

In anderen Fällen dagegen hilft das Wissen um die Wirkung eines Hormons. Zuckerkrankte etwa überleben heute, weil sie Insulin, das ihr Körper nicht produziert, durch künstliches ersetzen können. Kleinwüchsige werden normal groß, wenn ihnen Wachstumshormone gespritzt werden.

Und auch im Fall der Stressreaktion ist die Kenntnis des hormonellen Kommunikationssystems von Nutzen. Steht ein Mensch dauernd unter Stress, scheint sich seine Gehirnstruktur auch durch die hormonelle Paketflut zu ändern. Dann schrumpft etwa der Hippocampus. Und diese als „Seepferdchen“ bezeichnete Hirnstruktur ist für Lernvorgänge entscheidend.

Fazit: Wer gut lernen will, sollte sich vor zu viel Stress hüten. □

Volker Stollorz, 41, ist Wissenschaftsjournalist in Köln.

Beratung: Prof. Dr. Andreas H. Guse, Institut für Biochemie und Molekularbiologie am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.

Das fabelhafte Dru



mherum

Sie umgrenzt unseren Körper und gibt ihm Fassung, sie schützt vor der Welt und lässt sie uns tastend erfahren. Sie verrät, was wir empfinden und wie es uns geht. Sie lockt mit Düften und wird zum Medium der Lust. Die Haut ist ein Multifunktionsorgan wie keines sonst

Text: Erwin Lausch

Möchten auch Sie nicht mitunter aus der Haut fahren? Lassen Sie das! Denn ohne die Haut sähe ein Mensch nicht nur ziemlich abschreckend aus, ohne sie könnte er überhaupt nicht leben.

Die Haut ist eben viel mehr als Verpackung. Schon als simple Hülle, die den Körper von der Umwelt trennt, wäre sie bedeutsam genug. Als sichtbare Kontaktfläche zur Umgebung ist die Haut aber auch eine Art körperlicher Visitenkarte, mit der sich ein Mensch seinen Mitmenschen präsentiert.

Mehr als manchem zuweilen lieb ist, verrät sie Gemütszustände, etwa wenn jemand blass vor Schreck wird oder Röte das Gesicht überzieht – aus Freude oder Wut, aus Verlegenheit oder Scham –, wenn Angstschweiß auf die Stirn tritt. Dann wird die Haut, durch Signale aus dem Ge-

hirn gesteuert, zum Spiegel der Seele.

Was unseren Körper umgibt, ist ein höchst kompliziertes Organ mit vielfältigen Funktionen. Die Haut bewahrt den Organismus vor dem Austrocknen und schützt ihn vor Kälte, Hitze und Sonnenstrahlung, vor Druck, Stoß und Reibung, vor Wasser und Schmutz, vor mancherlei chemischen Substanzen und vor Krankheitserregern.

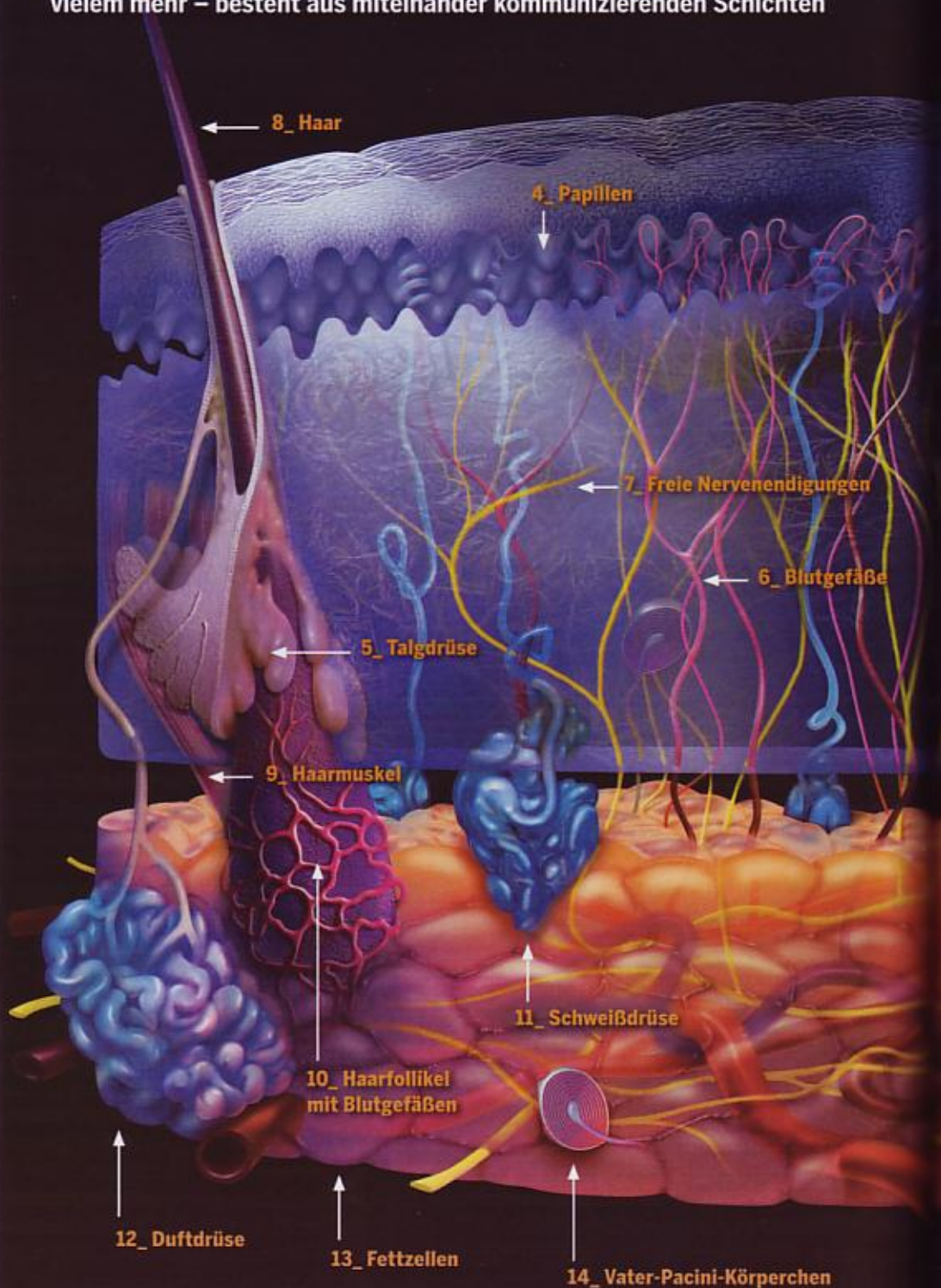
Als Sinnesorgan nimmt sie ständig Eindrücke aus der Umwelt auf, registriert Temperatur, Tastreize, Druck und Schmerz. Sie dient als Kühler für den Körper und als Chemiefabrik. Und sie produziert „Hautanhangsgebilde“ wie etwa Haare, Finger- und Fußnägel.

Mit einer Ausdehnung von 1,5 bis zwei Quadratmetern bei Erwachsenen ist die Haut das umfanglichste Organ des menschlichen Körpers. In grober Gliederung besteht sie aus zwei sehr unterschiedlichen, jedoch eng miteinander verbundenen Hauptschichten: aus Ober- und Lederhaut. Darunter befindet sich die Unterhaut, die von lockerem Bindegewebe gebildet wird. In diesem sind Klumpen von Fettzellen eingelagert, je nach Körperregion und Ernährungszustand in unterschiedlichem Ausmaß. Daher kann die Dicke der Unterhaut weniger als ein Millimeter bis einige Zentimeter betragen. Das Fett dient als Puffer gegen Stöße, als Kälteschutz und Energiespeicher.

Die Lederhaut darüber, ein straffes faserreiches **Gewebe**, gibt der Haut Festigkeit und Elastizität. Ihre Fasern, die wie Haltebänder die Haut mit

Das Innere der Außenseite

Das größte Körperorgan – ein Kompositum aus Bindegewebe, elastischen Fasern, Fettzellen, Blutgefäßen, Nervenenden, Sinneszellen, Drüsen und vielem mehr – besteht aus miteinander kommunizierenden Schichten





1_ Hornsubstanz in den Zellen der Oberhaut schützt alles, was darunter liegt

2_ Dank miteinander vernetzter Fasern in der Lederhaut ist die Körperhülle dehnbar

3_ Das lockere Bindegewebe der Unterhaut macht möglich, dass die Haut sich hin und her schieben lässt

4_ Die Papillen verzahnen die Ober- mit der Lederhaut

5_ Talgdrüsensekret macht die Haut geschmeidig und lässt die Haare glänzen

6_ Feinste Blutgefäße versorgen die Haut und geben überschüssige Wärme nach außen ab

7_ Freie Nervenendigungen reagieren auf starke mechanische Reize, die zu Verletzungen führen können, sowie auf Druck und Temperaturänderungen

8_ Haare dienen als Tastfühler und der besseren Verteilung von Duftdrüsensekreten

9_ Haarmuskeln können Haare aufrichten – sodass sich „die Haare sträuben“

10_ In den Haarfollikeln wachsen die Haare (etwa 0,35 mm pro Tag); Nervenendigungen daran registrieren feinste Berührungen des Haares

11_ Schweißdrüsen sondern Wasser zur Kühlung und einen „Sauremantel“ zum Schutz gegen Bakterien ab

12_ Durch Sexualhormone gesteuerte Duftdrüsen tragen zum individuellen Körpergeruch bei

13_ Fettzellen isolieren vor Kälte, schützen besonders beanspruchte Stellen und speichern Energie

14_ Die „Vater-Pacini-Körperchen“ registrieren Berührungs- und Vibrationsreize

dem Gewebe darunter verbinden, bestehen entweder aus einem Protein, das sie zugfest macht – dem **Kollagen** –, oder einem, das für Elastizität sorgt, dem **Elastin**. Die Dicke der Lederhaut kann von 0,3 Millimeter – an den Augenlidern – bis 2,4 Millimeter an Handflächen und Fußsohlen reichen.

angeordnet, die sich als winzige Erhebungen durch die Oberhaut „pausen“. Dass sich diese Linien von Mensch zu Mensch unterscheiden, wussten offenbar schon die Assyrier. In den Ruinen von Ninive, deren Hauptstadt im 7. Jahrhundert v. Chr., fanden Archäologen auf Tontafeln Fingerabdrücke

Unablässig stirbt die Haut, um sich unablässig zu erneuern. Und noch in ihren toten Zellen bewahrt sie ihre Farbe

In dieses Netzwerk eingebettet sind Blutgefäße, Lymphgefäße und Nerven, die sich nach oben hin immer feiner verzweigen. Mit der Oberhaut ist die Lederhaut durch dicht an dicht liegende zapfenförmige Aufwölbungen, die Papillen, eng verzahnt. Diese wellenförmige Kontaktfläche macht die Haut reißfester und vergrößert die Grenzfläche zur Oberhaut, die von den Blutgefäßen der Lederhaut vollständig mit Nährstoffen versorgt wird.

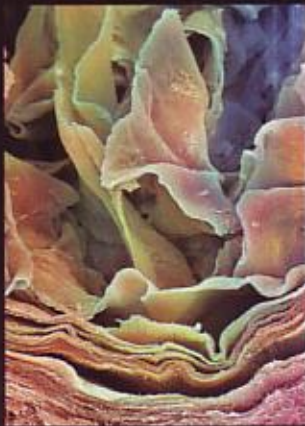
In den Papillen liegen die feinsten Blutgefäße, die Kapillaren. Dort enden auch Nerven mit Tastkörperchen und **freien Nervenendigungen**, die Wärme, Kälte und Schmerz registrieren. Das ist praktisch für die Regulation der Körpertemperatur: Bei Hitze erweitern sich die Kapillaren, deren Oberfläche vergrößert sich, und das Blut gibt mehr Wärme ab; bei Kälte ziehen sie sich zusammen und drosseln so den Blutstrom.

An Fingern und Zehen, Handflächen und Fußsohlen sind die Papillen in Mustern

als Bestätigung von Verträgen und Urkunden.

Die im Durchschnitt nur Bruchteile eines Millimeters dicke Oberhaut besteht weit überwiegend aus Zellen, denen ein schneller Tod bestimmt ist. Im unteren Teil der Oberhaut durch ständige Teilung produziert, werden sie von nachrückenden Zellen laufend nach oben geschoben. Während sie sich programmgemäß mit Hornsubstanz füllen, werden sie platter, sterben ab und bilden die Oberfläche der Haut – je nach Beanspruchung eine Schicht von einem bis mehreren Dutzend Lagen. Rund 30 Tage nach ihrer Bildung werden sie als meist winzige Schüppchen abgestoßen.

Einige der Oberhautzellen produzieren gelblich-rötliche bis braun-schwarze Farbstoffe, **Melanine**, die der Haut Farbe geben. Wie dunkel die Hautfarbe ausfällt, hängt weniger von der Anzahl der Farbzellen ab als von der Intensität der Melaninproduktion. Vorsichtig dosierte UV-Strah-



Oberhaut: Die obersten Zellen sterben, verhornen und lösen sich ab



Hautanhang Haare: Eine schuppige Keratinschicht umgibt verhornte tote Zellen



Hautanhang Fingernagel: Verhornte tote Zellschichten überlappen einander

Alle Fotos: Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop

lung regt die Melaninbildung an. Die Haut wird nach einigen Tagen braun und ist dann besser vor Schäden durch stärkere UV-Strahlung geschützt. Die Farbstoffe bleiben auch in den verhornten Zellen erhalten. Sommersprossen und Leberflecke sind punktuelle Pigmentkonzentrationen.

Fast die gesamte Haut ist mit Haaren besetzt, die meisten sind nur wenige Millimeter lang. Insgesamt besitzt der Mensch fünf bis sechs Millionen Haare, davon bis zu 150 000 auf dem Kopf.

Jedes Haar sprießt einzeln aus einem Haarfollikel, einer schmalen Einstülpung der Oberhaut und der obersten Lederhaut bis in die Unterhaut hinab (siehe Grafik Seite 126/127). Am Follikel sitzt jeweils eine Talgdrüse, die ein Gemisch aus Fetten, Fettsäuren und zerfallenen Zellen in den Raum zwischen Follikel und Haar abgibt.

Dabei hilft ein kleiner Muskel, der den meist etwas schräg in der Haut steckenden Haarbalg aufzurichten vermag, sodass sich das Haar sträubt. Er drückt, sobald er sich zusammenzieht, auf die Drüse. So wird jedes Mal, wenn sich ein Haar bewegt, etwas Fett herausgepresst, das sich auf Haut und Haar verteilt.

Wie auch die Finger- und Fußnägeln, die den Biologen zufolge den Krallen anderer Wirbeltiere entsprechen, bestehen Haare aus der Hornsubstanz (Keratin) der äußersten Hautzellen, und sie sind wie die Nägel spezielle Bildungen der

Die Follikel an den Kahlstellen produzieren dann nur noch dünne farblose Härchen.

Dabei spielt das männliche Geschlechtshormon Dihydrotestosteron (DHT) eine entscheidende Rolle. Es entsteht aus dem Geschlechtshormon

Mitunter werden die Kopfhaare mehr als zehn Jahre alt, bevor sie ausfallen und durch neue ersetzt werden

Hornzellen-Schicht. Schützt das spärliche Haarkleid des Menschen – Überrest aus einer behaarteren Vergangenheit – auch kaum vor Kälte, so leisten die Körperhaare doch gute Dienste als Barriere und Tastfühler. Ein krabbelndes Insekt etwa, das ein Haar bewegt, löst über **Nervenendigungen** am Follikel sofort Signale ans Gehirn aus.

Haare wachsen pro Tag im Schnitt 0,35 Millimeter. Die Zeit eines Körperhaars bemisst sich nach Wochen oder wenigen Monaten, Kopfhaare überdauern im allgemeinen zwei bis sechs, zuweilen mehr als zehn Jahre, bevor sie ausfallen und neue nachwachsen. Bei Männern bleibt freilich oft schon früh der Nachschub aus.

Testosteron und bildet sich in den Haarfollikeln – besonders stark bei entsprechender Veranlagung. Sind die Enzyme, die Testosteron in DHT wandeln, in den Kopfhaar-Follikeln stark konzentriert, fallen die Haare irgendwann aus.

Ebenso tief in der Menschenhaut versenkt wie die Haarfollikel sind die etwa zwei Millionen Schweißdrüsen. Besonders reich ausgestattet damit sind Stirn, Handteller und Fußsohlen, wo auf jeden Quadratzentimeter etwa 400 kommen. Aus den Drüsen leiten Kanäle den Schweiß – 99 Prozent Wasser – auf die Haut, das verdunstende Wasser kühlt sie und schützt so den Körper vor Überhitzung.

Außer Wasser enthält der Schweiß geringe Mengen an Salzen, Substanzen wie Harnstoff, **Aminosäuren** und **Milchsäure** sowie auch **Immunglobuline** als Abwehrstoffe. Damit bildet das Sekret einen Säureschutzmantel auf der Haut und hemmt das Bakterienwachstum.

Besondere Schweißdrüsen, die Duftdrüsen, werden mit der Pubertät stärker aktiv. Vor allem das von ihnen ausgeschiedene und von Bakterien zersetzte Sekret ruft den Körpergeruch hervor. Duftdrüsen konzentrieren sich auf die Achselhöhlen, den Scham- und Afterbereich, die Umgebung der Brustwarzen: Sie sind der Rest einer bei Säugetieren verbreiteten sozialen und sexuellen Kommunikation per Geruch.

In der Haut finden auch chemische Prozesse statt – etwa die Produktion des für eine gesunde Entwicklung der Knochen nötigen Vitamins D aus Vorstufen, die der Körper selbst erzeugt oder mit pflanzlichen Fetten aufnimmt. Die Umwandlung erfordert UV-Licht und erfolgt daher in der Oberhaut. Aktiviert wird das Vitamin dann in der Niere.

Vitamin D hat vermutlich indirekt auch die Verteilung der Hautfarben auf der Erde bewirkt. Denn ein Mangel daran führt oft zu Rachitis – und als sich die Menschen von Afrika her über die Erde ausbreiteten, hatten Individuen mit für UV-Strahlen stärker durchlässiger Haut in Regionen mit lichtarmen Wintern bessere Chancen, der Rachitis zu entgehen. Eben die hellhäutigen. □

Wissenschaftliche Beratung:
Dr. Holger Jastrow vom
Anatomischen Institut der Johannes-
Gutenberg-Universität Mainz.



Die Abwehrzellen finden fast jedes Bakterium

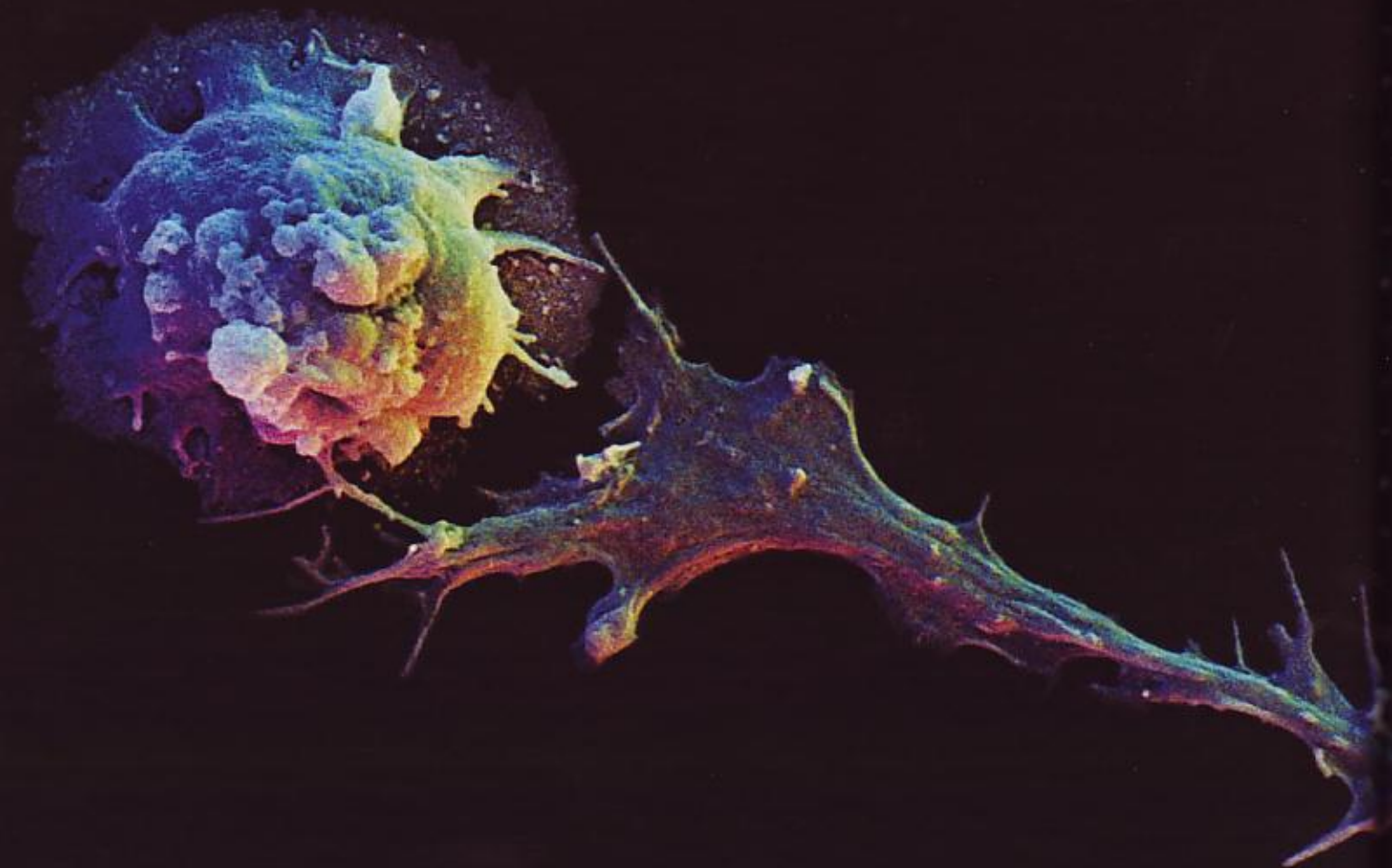
Große Fresszellen (Makrophagen) können Bakterien wie diese blaugrün gefärbten Borrelien quasi »riechen«, mit ihren Fortsätzen aufspüren und etwa anhand spezieller Eiweiß-Zucker-Strukturen auf deren Oberfläche identifizieren. Sie ziehen die Mikroben zu sich heran, nehmen sie in sich auf und töten sie ab. Makrophagen entstehen aus Vorläuferzellen in Kugelform, die zunächst im Blut kreisen. Sie dringen dann durch die Blutgefäßwände ins Gewebe, wo sie auf der Suche nach Erregern unterschiedlichste Formen annehmen



Das große Fressen

Sobald Krankheitserreger in unseren Körper eindringen, beginnt ein dramatischer Abwehrkampf. In diesem Geschehen, das über mehrere Stufen eskaliert, spielen unter anderem Fresszellen sowie »zelluläre Bomben«, Killerzellen und molekulare Werkzeuge eine Rolle. Und meistens behalten die Immunzellen die Oberhand – sogar gegenüber Krebs

Text: Henning Engeln, Infografiken: Hark Weidling



Auch Körpereigenes wird vertilgt

Makrophagen (blau) beseitigen Eindringlinge wie etwa Bakterien, aber auch körpereigenen »Abfall« wie Zelltrümmer und tote Zellen. Selbst auf das Sekret einer Talgdrüse (orangefarben) stürzen sie sich



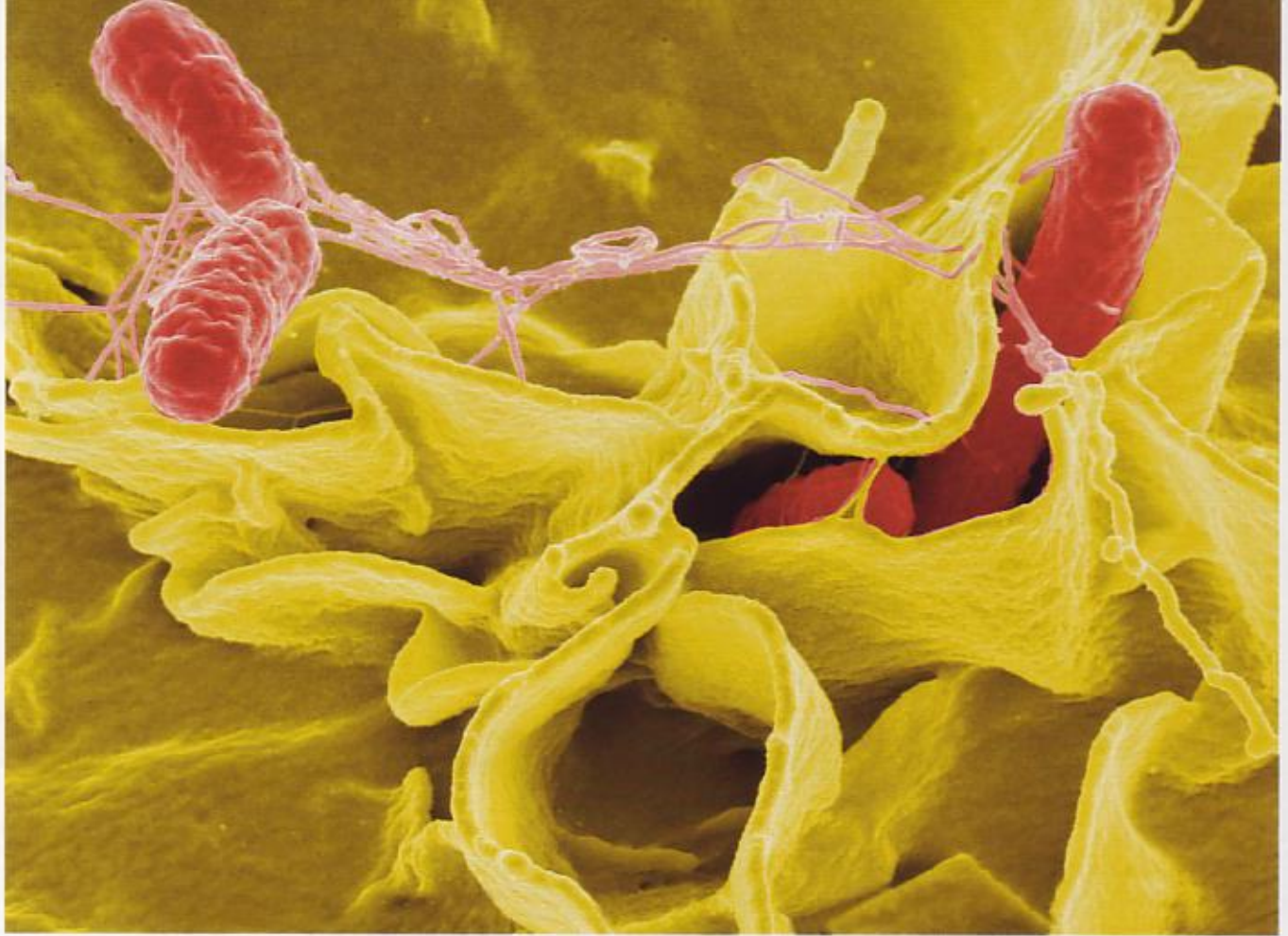
Bakterien in der Falle

Ein Makrophage (gelb) hat Tuberkulose-Erreger »verschlungen«. Die Fresszelle kann die meisten Bakterienarten unschädlich machen. Diesen Erregern gelingt es jedoch, sich in ihr zu vermehren



Immunzellen kommunizieren miteinander

Wenn Makrophagen mit Erregern in Kontakt kommen, senden sie Botenstoffe aus, die eine zweite Gruppe von Fresszellen, so genannte »dendritische Zellen«, in einen Alarmzustand versetzen (hier der Fortsatz einer solchen Zelle). Die dendritische Zelle holt nun weitere Hilfe herbei, indem sie Kontakt zu einem dritten Typ von Immunzellen, einem T-Lymphozyten (links oben), aufnimmt und diesen aktiviert. Der Lymphozyt teilt sich daraufhin fortlaufend und setzt so eine ganze Gruppe zusätzlicher Immunzellen in Bewegung, welche die Keime nun hoch effektiv bekämpfen



Erreger breiten sich aus

Wenn Salmonellen (rosafarben) sich zwischen menschlichen Zellen vermehren, droht Gefahr. Ohne Immunsystem würden sie sich alle 20 Minuten verdoppeln und letztlich die Organfunktionen blockieren

Am Abend des 22. November 2003 findet in Berlin eine Familienfeier statt. Der Gastgeber hat aus einem Restaurant die Speisen für sein Buffet geholt, darunter mit Frischkäse gefüllte Ravioli. 16 der 19 Gäste essen davon. Was sie nicht ahnen: In den Teigtaschen sitzen blinde Passagiere.

Es sind **Salmonellen**: Bakterien, die darauf programmiert sind, sich im nährstoffreichen Darm von Menschen millionenfach zu vermehren. Wie die Mikroben in die Teigtaschen gelangt sind, lässt sich später nicht mehr klären. Auf jeden Fall richten sie im Verdauungstrakt der 16 Betroffenen enormen Schaden an.

Weil offenbar die Gäste eine gehörige Menge an Salmonellen geschluckt haben, überleben viele Erreger das Säurebad in den Mägen und

werden in den Darm befördert, in dem bereits Billionen anderer **Bakterien** siedeln. Anders als diese nützlichen Bewohner des Körpers verfügen die Salmonellen über spezielle Molekülwerkzeuge, mit deren Hilfe sie sich an die **M-Zellen** der Darmschleimhaut heften und von diesen aufgenommen werden (siehe Seite 138).

Wie die meisten Bakterien teilen sich Salmonellen alle 20 Minuten. Theoretisch könnten sie sich mit dem Blutstrom und über das **Lymphsystem** in alle Organe ausbreiten und sich dort so lange vermehren, bis die Funktion eines lebenswichtigen Organs zusammenbräche. Der Tod wäre die sichere Folge – wenn der Körper sich nicht wehren würde.

Doch für solche Fälle verfügt der Organismus über ein Abwehrsystem, das in mehreren Stufen aktiv wird: Wann

immer Erreger eine der Verteidigungsstellungen überwunden haben, setzt ihnen der Körper die nächste Hürde entgegen. Grundsätzlich verfügt der menschliche Organismus über zwei Abwehrsysteme:

- ein älteres, einfacheres – die **angeborene Immunität**;
- und ein höher entwickeltes, das im Verlauf der Evolution dazugekommen ist – die **erworbene Immunität**.

Beide Systeme basieren zum einen auf der Aktivität bestimmter Zellen (**zelluläre Abwehr**), zum anderen auf der Wirksamkeit löslicher Substanzen (**humorale Abwehr**). Alle Abwehrzellen gehören zu den weißen Blutkörperchen.

Wann immer Krankheitserreger in den menschlichen Organismus eindringen, werden

sie als Erstes von den Akteuren des angeborenen Immunsystems angegriffen. Es handelt sich dabei um mehrere Gruppen von **Fresszellen**. Auffällig werden ihnen die Bakterien zum Beispiel durch bestimmte Eiweiß-Zucker-Strukturen auf ihrer Zelloberfläche. (Daneben attackieren, zerlegen und entsorgen diese Immunzellen auch losgelöste absterbende Körperzellen – während sie solche, die geordnet im Gewebe wachsen, in Ruhe lassen.)

Nachdem die Salmonellen in die M-Zellen eingedrungen sind, werden sie erst von großen Fresszellen (**Makrophagen**), dann von kleineren **Granulozyten** angegriffen und verschlungen. Dazu nähert sich eine Fresszelle der viel kleineren Mikrobe, stülpt ihre



Enzyme zerlegen Mikroben

Fresszellen (orange) überwinden Bakterien (blau). Dazu stülpen die Zellen Teile ihrer Membran über die Mikroben, nehmen sie in sich auf und zerlegen sie mit Verdauungsenzymen

flexible **Zellmembran** um sie und schnürt diese Blase in ihr Inneres ab. Dann rücken weitere Blasen mit Verdauungsenzymen an die Blase mit dem Bakterium heran, verschmelzen mit ihr, und die Enzyme zersetzen die Mikrobe in deren Bestandteile.

Doch Salmonellen sind tückische Gegner. Dank einer speziellen molekularen Ausrüstung können sie sich in den Fresszellen gegen die Zersetzung wehren – und sogar vermehren. Die Makrophagen und Granulozyten sondern deshalb nun Substan-

zen ab, die weitere Immunzellen herbeirufen.

Unterstützt werden sie durch eine Vielzahl im Blutplasma gelöster Eiweiße: das **Komplementsystem**. Wird es aktiviert, lagern sich diese Eiweißmoleküle an die Zelloberflächen der Mikroben an und locken so weitere Fresszellen herbei. Sie durchlöchern aber auch die Bakterienmembran, sodass die Erreger absterben.

All das geschieht bei den infizierten Gästen der Feier innerhalb weniger Stunden. Sie alle fühlen sich bald unbehaglich, so als zöge eine Grippe herauf. Zu diesem

Zeitpunkt ist auch schon eine dritte Gruppe von Fresszellen aktiv, die **dendritischen Zellen**. Auch sie verschlingen Bakterien, doch ihre wichtigste Aufgabe ist, die nächste Stufe des Abwehrsystems zu aktivieren, die erworbene Immunität, und damit weitere Immunzellen in Gang zu setzen.

Damit die dendritischen Zellen diese Eskalationsstufe nicht grundlos starten, bedürfen sie aktueller Signale, die ihnen vermitteln, dass etwas im Körper nicht in Ordnung ist. Solche Signale sind beispielsweise Inhaltsstoffe von Zellen, die in die Gewebsflüssigkeit gelangen, wenn große Massen von ihnen sterben und platzen – aber auch Stückchen von Erbsubstanz (**DNS**), die normaler-

weise nur in intakten Zellen vorkommt.

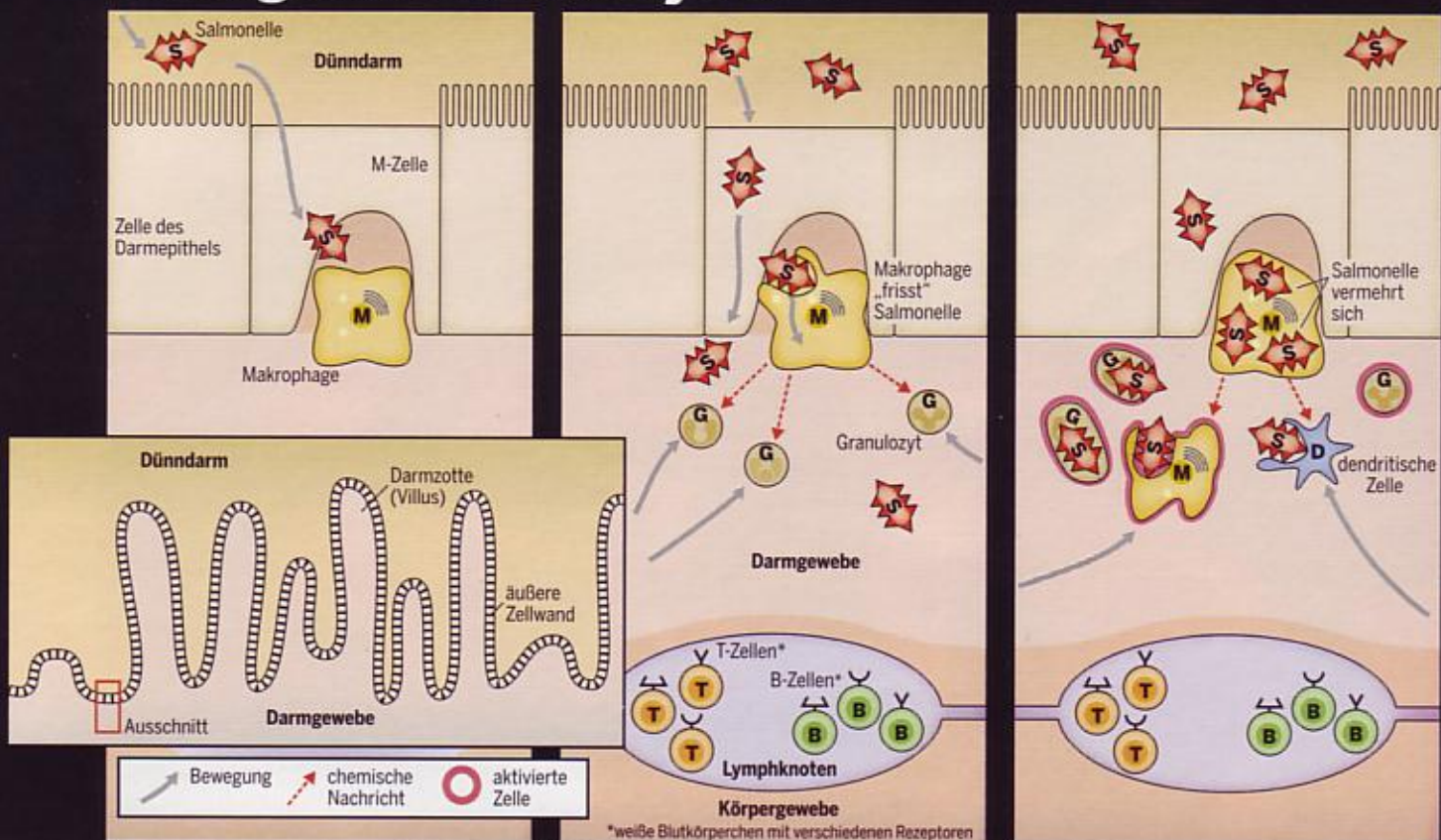
Derartige Signalstoffe sind bald reichlich in der Gewebsflüssigkeit der Darmschleimhaut vorhanden, da die Salmonellen sich immer weiter vermehren und ein heftiger Kampf entbrennt, bei dem sowohl Bakterien als auch Fresszellen absterben.

In diesem Stadium des Abwehrkampfes haben Makrophagen und Granulozyten bereits eine weitere Eskalationsstufe durchlaufen und sich quasi in lebende Bomben verwandelt.

Die aktivierten Zellen haben zahlreiche **Gene** angeschaltet, wodurch sie hochreaktive Sauerstoffderivate sowie Stickstoffmonoxid und antimikrobielle Peptide (kurze

Bei Gefahr verwandeln sich Fresszellen in »lebende Bomben«, die aggressive Moleküle produzieren und mitsamt den verschlungenen Erregern zugrunde gehen

Strategien des Immunsystems



Mikroben dringen ein

Durch den Magen ins Darminnere gelangte Salmonellen befallen so genannte »M-Zellen« in der Darmschleimhaut. Im Gewebe patrouillierende Makrophagen – besonders große Fresszellen – entdecken die Mikroben am »Geruch«: an von ihnen absonderten Molekülen

Die Fresszellen werden aktiv

Makrophagen verschlingen die Salmonellen. Doch in einigen Fresszellen überleben die Bakterien und vermehren sich nun in deren Innerem. Die Makrophagen senden daraufhin Signalsubstanzen aus, die unter anderem einen weiteren Typ von Fresszellen herbeiholen: Granulozyten

Alarm durch Botenstoffe

Weitere Makrophagen und Granulozyten werden durch Alarmsubstanzen »aktiviert«: Sie produzieren nun aggressive molekulare Waffen gegen die Salmonellen, werden quasi zu »lebenden Bomben«. Ein dritter Typ von Fresszellen, die dendritischen Zellen, stürzt sich ebenfalls auf die Erreger

Eiweißketten) bilden. Dank dieses molekularen Waffenarsenals werden Infizierte nun besser mit den Salmonellen fertig. Allerdings sind diese nunmehr eingesetzten Waffen derart giftig, dass sich die Makrophagen und Granulozyten selbst schädigen und einige Zeit später absterben.

So lange aber schicken die aktivierten Fresszellen weiterhin etliche andere Substanzen ins Abwehrgefecht. Manche

dieser Stoffe lockern das Gewebe auf und erhöhen die Durchlässigkeit der Blutgefäße, sodass Fresszellen leichter zu den Bakterien vordringen können.

Zudem fördern sie die Durchblutung – was die Zufuhr an Abwehrzellen und -stoffen über das Blut steigert. Ein etwa mit Bakterien infiziertes Organ schmerzt, schwillt an und erwärmt sich; der Betroffene spürt die Sym-

ptome einer Entzündung. In schweren Fällen lösen weitere Substanzen Fieber aus, erhöhen also die gesamte Körpertemperatur – mit der Folge, dass die Erreger sich schlechter vermehren.

Andere Eiweißmoleküle fischen zudem Eisen aus dem Blut und erschweren so den Bakterien auch durch Eisenmangel die Vermehrung.

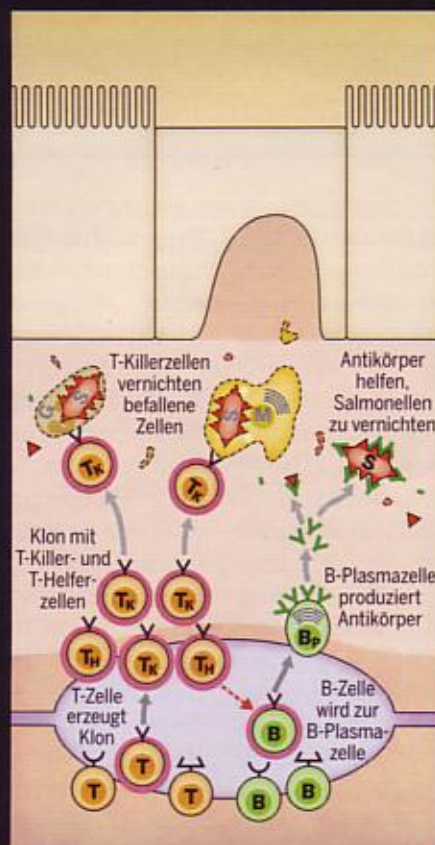
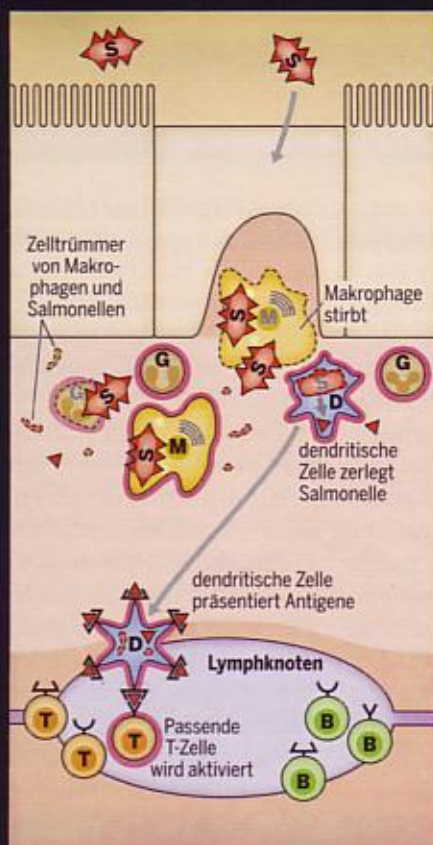
Und weil die Salmonelleninfektion ganz überwiegend

die Darmgewebe betrifft, erhöht sich dessen Durchlässigkeit für Wasser und Elektrolyte. Die Folge sind heftige Durchfälle. Bei allen 16 Berliner Erkrankten treten schon bald die typischen Symptome einer Salmonellen-Infektion auf: Durchfall, Bauchschmerzen, Fieber bis zu 41 Grad Celsius, Übelkeit, Erbrechen oder Kopfschmerzen.

Zwar sind Fresszellen der angeborenen Immunität bei

GEO-Grafik

Um Mikroben lokal zu bekämpfen, erhöht der Körper die Temperatur, lockert das Gewebe auf und verstärkt die Durchblutung – Symptome einer Entzündung



Weitere Hilfe wird geholt

Bewältigen die Fresszellen die Erreger noch immer nicht, holt eine dendritische Zelle – die Salmonellen aufgenommen und zerlegt hat und durch Alarmsubstanzen aktiviert wurde – weitere Hilfe. Sie wandert in den nächstgelegenen Lymphknoten und alarmiert eine bestimmte T-Zelle, indem sie ihr ein Antigen präsentiert: den »molekularen Fingerabdruck« der Salmonelle

Lymphozyten greifen ein

Die T-Zelle vermehrt sich zu Helfer- und Killerzellen. Sie alle können die Salmonellen an deren molekularem Fingerabdruck schnell erkennen. Die T-Killerzellen töten auch mit Salmonellen infizierte Fresszellen ab. Die T-Helferzellen aktivieren zudem B-Zellen. Diese bekämpfen die Mikroben mithilfe von speziellen molekularen Werkzeugen: den Antikörpern

Die Gefahr ist gebannt

Nachdem die Salmonellen beseitigt sind, bremsen T-Regulatorzellen das Immunsystem, indem sie die meisten anderen Immunzellen absterben lassen. B-Gedächtniszellen »merken« sich den molekularen Fingerabdruck der Salmonellen und greifen später rasch ein, wenn solche Erreger den Körper erneut befallen

der Attacke eines Erregers sofort einsatzbereit, doch können sie den Angreifer nur anhand relativ allgemeiner Eigenschaften erkennen – und deshalb nicht immer effektiv bekämpfen. Die Abwehrzellen der erworbenen Immunität dagegen sind hocheffizient, weil sie Krankheitserreger spezifisch identifizieren und gezielt attackieren.

Allerdings dauert es ein paar Tage, bis sie in Schwung kommen. Denn die beteiligten Zellen müssen erst »lernen«, die jeweiligen Krankheitskeime an

einem »Fingerabdruck« zu erkennen. Anschließend vermehren sie sich durch Teilung tausendfach.

Diese Zellen heißen Lymphozyten, und sie kommen vor allem in den Lymphknoten und im Lymphsystem vor. Das Lymphsystem besteht aus fein verzweigten Gefäßen, durch die Gewebsflüssigkeit, die zur Versorgung der Zellen mit Nährstoffen aus den Blutgefäßen austritt, zurück in den Blutkreislauf fließt. Es fungiert also wie eine Art »Entwässerungssystem«. Und die Lymphknoten sind so etwas wie zwischengeschaltete

Filterstationen, an denen Verunreinigungen, Zelltrümmer und körperfremde Stoffe herausgesondert werden.

Zu den Organen des lymphatischen Systems gehört die Milz, durch die das gesamte Blut des Körpers fließt. Sie überwacht das Blut immunologisch und ist zudem für den Abbau gealterter roter Blutkörperchen zuständig.

Einige der dendritischen Zellen, die im Verlauf des Abwehrkampfes Salmonellen in sich aufgenommen haben, beginnen nun, die Hilfe der Lymphozyten zu aktivieren. Dazu wandern sie über die

Lymphflüssigkeit in einen in der Nähe liegenden Lymphknoten, denn nur dort ist es ihnen möglich, mit speziellen Abwehrzellen in Kontakt zu treten: den **T-Lymphozyten**.

Dazu »präsentiert« die dendritische Zelle die zerlegte Salmonelle auf ihrer Oberfläche. Salmonellenbruchstücke (so genannte **Antigene**) sind so etwas wie ein Fingerabdruck des Bakteriums, den die T-Zellen mithilfe genau passender Rezeptoren auf ihrer Oberfläche erkennen können.

Im Körper gibt es rund 30 Millionen Typen von T-Zellen, von denen jeder mit einem an-

Wenn die Gefahr vorüber ist, bremsen regulatorische T-Zellen das Immunsystem, indem sie aktive Abwehrzellen zum »Selbstmord« veranlassen

deren Rezeptor ausgestattet ist. Daher ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass dendritische Zellen mit Salmonellen-Antigenen auf genau jene T-Zellen stoßen, deren Rezeptor zu diesem Antigen passt.

Sobald die richtigen T-Zellen gefunden sind, kommt es zur nächsten Eskalationsstufe des Abwehrkampfes. Die T-Zellen beginnen sich nun fortwährend zu teilen und bilden neue Zell-Generationen, die alle über genau den gleichen Rezeptor verfügen.

Zu diesen neuen Generationen gehören auch die **T-Killerzellen**. Wenn sie mit ihrem Rezeptor das Antigen eines Erregers auf der Oberfläche einer infizierten Zelle entdecken, greifen sie an – selbst jene Salmonellen, die sich in Makrophagen verborgen haben. Aus diesem Grund sind die T-Killerzellen hoch effektive Waffen bei Virus-Infektionen. Denn Viren vermehren sich anders als Bakterien ausschließlich in körpereigenen Zellen und müssen daher in ihnen aufgespürt werden.

T-Helferzellen mobilisieren weitere Immunzellen – etwa die **B-Lymphozyten**. Sie produzieren spezielle molekulare Waffen, die **Antikörper**, und geben sie ins Blut ab. Auch von den B-Zellen gibt es viele Millionen Varianten mit ebenso vielen unterschiedlichen Antikörpern. Und wie bei den T-Zellen vermehren sich nur jene massenhaft durch Teilung, deren Antikörper zufällig zu den Antigenen der Salmonelle passen.

Jene Antikörper „kleben“ sich nun an die Bakterien und markieren sie: Fresszellen

können die Mikroben leichter finden und zersetzen. So auch im Falle der Salmonellen-Infektion: Bald sind die Erreger dezimiert.

Die erworbene Immunität bietet neben der Fähigkeit, sich auf einen bestimmten Gegner spezialisieren zu können, einen weiteren Vorteil: Sie verfügt über eine Art Erinnerungsvermögen. Dringt ein gleichartiger Krankheitserreger erneut in den Organismus ein, erkennen ihn bestimmte, zu Gedächtniszellen umgewandelte Lymphozyten, die ihn schon einmal bekämpft haben, wieder und attackieren ihn gezielt. Deshalb sind wir gegen manche Krankheiten gefeit, die wir schon einmal überstanden haben.

Dieses Erinnerungsvermögen des Immunsystems wird auch bei Schutzimpfungen genutzt. Wenn Ärzte dem Organismus einen Impfstoff aus abgetöteten oder künstlich geschwächten Keimen injizieren, „lernen“ die Zellen des Immunsystems daran gefahrlos den

Fingerabdruck des Erregers kennen und können später mit echten, „virulenten“ Erregern schnell fertig werden.

Doch Erregern gelingt es, das Immunsystem auszutricksen, indem sie ihre „Fingerabdrücke“ durch Veränderung ihrer genetischen Ausstattung modifizieren. Alljährlich müssen deshalb gegen neu entstandene Typen von Grippeviren auch neue Impfstoffe entwickelt werden. Der menschliche Organismus befindet sich also in einem beständigen evolutionären Wettlauf mit den Erregern.

Nicht selten geht es dabei um Tod oder Leben. Eine Infektion mit Salmonellen verläuft indes bei erwachsenen Menschen meist glimpflich. Nur wenn es den Mikroben gelingt, in die Blutbahn der Opfer zu gelangen und sich im ganzen Körper zu verbreiten, kann es gefährlich werden.

Doch die Abwehrkräfte der meisten Gäste jener Familienfeier in Berlin sind stark genug, um mit den Erregern ohne ärztliche Hilfe fertig zu werden. Lediglich drei von ih-

nen müssen wegen sehr starker Durchfälle im Krankenhaus behandelt werden, doch bei keinem breiten sich die Erreger über den Verdauungstrakt hinaus aus.

Eines allerdings müssen die Abwehrkräfte der 16 Infizierten in jedem einzelnen Fall erledigen: die aufgepeitschte Alarmsituation des Körpers nun wieder herunterfahren. Denn die aktivierten Fresszellen, die sich vermehrenden Lymphozyten und die vielen ausgeschütteten Botenstoffe, die zu Fieber und Entzündungsreaktionen geführt haben, sind für den Körper enorm belastend – wenn die Zellen nicht gebremst werden.

Das erledigt dann eine spezielle Gruppe weißer Blutkörperchen, die **T-Regulatorzellen**. Sobald die Gefahr vorüber ist, schütten sie Eiweißstoffe aus, welche die Immunreaktion beenden – zum Beispiel, indem sie in den T-Killer- und T-Helferzellen, welche die Bakterien bekämpft haben, ein Selbstmordprogramm auslösen, die Apoptose (siehe Seite 40).

Und regulatorische T-Zellen haben noch weitere wichtige Funktionen: Sie halten das Abwehrsystem stets so weit in Schach, dass es sich nicht gegen den eigenen Körper richtet. Denn im Extremfall, etwa bei Autoimmunkrankheiten, können jene Zellen, die einen Menschen eigentlich schützen, ihn sogar umbringen. □



Die Abwehr verhindert sogar Krebs

Killerzellen (gelb) entdecken eine entartete körpereigene Zelle (rot), die zu Krebs wuchern könnte, und machen sie unschädlich

Wissenschaftliche Beratung:

Dr. Thomas Jacobs, Abteilung für Immunologie am Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, Hamburg.

Prof. Dr. Helmut Tschäpe, Leiter des Fachbereichs Bakterielle Infektionen, Robert Koch Institut, Wernigerode.

Wie sich das Gewebe selbst repariert

Eiweiße und Blutplättchen stoppen bei einer Verletzung den Blutfluss und lösen einen Prozess aus, der den Schaden in kurzer Zeit behebt

Vor etwa 15 Jahren stellten Forscher erstaunt fest, dass Mäuse, deren Fetten sie im Mutterleib operiert hatten, nach der Geburt keinerlei Narben aufwiesen. Das gleiche Phänomen beobachtete man später bei Menschen.

Dass Wunden im Mutterleib derart narbenlos verheilen, könnte, so die Vermutung der Mediziner, damit zu tun haben, dass der Organismus dort gut geschützt ist, während sich ein bereits geborenes Individuum gegen Krankheitserreger wehren und möglichst schnell wieder „funktionieren“ muss. Eine effektive, sichere Reparatur ist dann eine Frage des Überlebens – wenn auch um den Preis der Narbe.

Wird etwa die Haut eines Menschen so tief verletzt, dass kleine Blutgefäße zerreißen, strömt sofort reichlich Blut in die Wunde und spült eingedrungenen Schmutz sowie Keime davon. Doch schon nach wenigen Sekunden verengen sich die Blutgefäße und verringern die Blutung. Dadurch werden Blutplättchen (Thrombozyten) aktiviert, die ihre Form ändern und innerhalb von zwei bis vier Minuten zu einem Pfropf zusammenkleben und kleine Löcher verschließen. Die Blutung stoppt.

Gleichzeitig kommt die Gerinnung in Gang. An ihr ist eine Kaskade von 13 Gerinnungsfaktoren beteiligt, die das im Blutplasma gelöste Eiweiß Fibrinogen in Fibrinmoleküle verwandelt. Diese verkleben zu einem faserigen Netzwerk und verdichten sich samt den Blutzellen zu einem festen, unlöslichen Filz, einem Blutgerinnsel. Nach acht bis zehn Minuten ist das bei kleineren Verletzungen geschehen.

Damit ist das Loch provisorisch „gestopft“. Doch nun muss der Körper die Verletzung reparieren. Der Bereich um die Wunde wird wieder stärker durchblutet, das Gewebe lockert sich auf und schwillt durch Flüssigkeitseinlagerung an. Zellen des Immunsystems, vor allem Fresszellen, wandern ein. Sie verschlingen eingedrungene Erreger, abgestorbene Körperzellen oder Zelltrümmer. Manche Fresszellen – vor allem die Granulozyten – sterben nach Aufnahme von Erregern ab und bilden zusammen mit anderen Zelltrümmern Eiter. Andere Zellen, zum Beispiel Makrophagen,

bauen aufgenommene Zellbruchstücke ab. Der Verletzte spürt all das als schmerzende Entzündung.

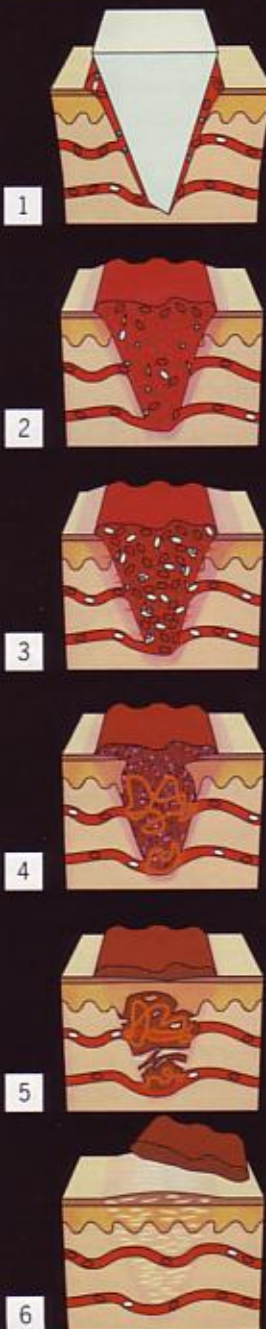
Nach einigen Tagen wandern weitere Zellen in den Wundpfropf ein, benutzen das Fibrin des Pfropfes als Klettergerüst und teilen sich. Nach und nach lösen sie das Fibrin auf und bilden, sich weiter vermehrend, allmählich neues Gewebe. Gleichzeitig sprießen Blutgefäße in die sich regenerierende Struktur hinein, um die neuen Zellen zu versorgen. So genannte Fibroblasten zum Beispiel bilden Fasern aus dem Eiweiß Kollagen und verleihen damit dem neuen Gewebe Zugfestigkeit. Weil diese Fasern – im Gegensatz zu dem effizienten Maschenwerk des gesunden Gewebes – parallel und dicht gebildet werden, um die Wunde rasch zu verschließen, bildet sich relativ steifes Narbengewebe.

Ein weiterer Zelltyp – die Keratinozyten – vermehrt sich an den Wundrändern und beginnt von dort aus das Loch zu bedecken. Dabei helfen Fibroblasten und Kollagenfasern, welche die Wunde zusammenziehen und die Ränder annähern. Nach gut einer Woche kann eine kleinere Verletzung der Haut vollständig geschlossen sein.

Eine ungeheure Fülle von Signalstoffen koordiniert diesen Heilvorgang. Zwei dieser Stoffe – sie gehören zur Gruppe der Wachstumsfaktoren – entstehen bei Fetten in anderen Mengen als bei Geborenen, was offenbar zu dem unterschiedlichen Verlauf der Heilung führt. Wahrscheinlich spielt das Immunsystem dabei eine Rolle, das beim Ungeborenen noch nicht auf eine Verletzung reagiert.

Diese Erkenntnis eröffnet Mediziner völlig neue Chancen: Sie könnten womöglich schon in wenigen Jahren Verbände mit Wirkstoffgemischen entwickeln, die Wunden auch beim erwachsenen Menschen ohne Narben heilen lassen. Erste Tests an Freiwilligen mit einem Wachstumsfaktor, der die Narbenbildung hemmt, haben sich bereits als erfolgreich erwiesen – zumindest bei kleinen Verletzungen.

Henning Engeln



Eine Narbe bleibt zurück

Das bei einer Verletzung [1] austretende Blut gerinnt und verschließt die Wunde [2]. In den Tagen darauf beseitigen Immunzellen eingedrungene Erreger, Zelltrümmer und tote Zellen [3]. Blutgefäße sprießen [4], weitere Zellen wandern ein [5], lösen den Pfropf auf und bilden Narbengewebe [6]

Der Mann, der die Pocken besiegt

Im Jahre 1796 infiziert der britische Landarzt Edward Jenner ein Kind mit einer harmlosen Form von Pocken – und rettet damit Millionen Menschen das Leben. Denn wie von dem Mediziner erwartet, ist das Kind nun gegen die echten Pocken geschützt. Jenner wird so zum Initiator der modernen Immunologie

Text: Antje Helms

Es ist die schlimmste Seuche des 18. Jahrhunderts: In Europa befällt sie schätzungsweise 40 Millionen Menschen, etwa jeder dritte Infizierte stirbt an ihr – mehr als durch alle Kriege und Naturkatastrophen dieses Jahrhunderts zusammen. Vor allem Kinder sind betroffen, jedes siebte erkrankt an ihr. Die Seuche verbreitet Schrecken, wo immer sie erscheint. „Von der Liebe und den Pocken bleibt keiner verschont“, heißt es im Volksmund.

Die Pocken, die Blattern. Sie beginnen mit Fieber und Schüttelfrost, dann bilden sich Bläschen am ganzen Körper, die sich nach wenigen Tagen in stinkende, eitrig-pustulöse Pusteln verwandeln. Ob arm oder reich – aus allen Schichten holt die Krankheit sich ihre Opfer. Mozart erkrankt ebenso wie Goethe oder die Kaiserin Maria Theresia.

Die von ihr genesen, behalten zumeist ein Leben lang Narben zurück, viele erblinden oder werden taub. Frauen tragen Schleier, um ihre zerstörte Haut zu verbergen. Und keine Arznei schützt vor dem Wüten des *speckled monster*, des gefleckten Ungeheuers, wie auch der englische Landarzt Edward Jenner die gefürchtete Krankheit nennt.

Der hat in seiner Praxis jeden Tag mit der Seuche zu tun. Von seinem Heimatdorf Berkeley aus, in das der Pfarrerssohn nach seiner medizinischen Ausbildung 1773 zurückgekehrt ist, reitet er fast täglich zu Patientenbesuchen in entlegene Ortschaften zwischen Gloucester im Norden und Bristol im Süden.

Immer wieder macht er dabei eine sonderbare Beobachtung: Er trifft auf Menschen, die trotz enger Kontakte mit Pockenkranken vor der Krankheit gefeit zu sein scheinen. Vor allem Kuhmägde bleiben von den Blattern verschont. Gemeinsam ist allen, dass sie sich beim Melken mit Kuhpocken infiziert haben, einer Virusvariante, die bei Menschen nur eine harmlose fiebrige Hauterkrankung auslöst.

Bei Jenner keimt eine Vermutung: Sollte, wer einmal an Kuhpocken erkrankt war, womöglich vor den Blattern geschützt sein? Der Landarzt beginnt über die Kuhpocken-Fälle in seiner Praxis Buch zu führen. Und je mehr Beobachtungen er zusammenträgt, desto stärker wird aus seiner Vermutung Gewissheit. 1796 glaubt er genug Krankheitsverläufe beobachtet zu haben, um ein Experiment zu wagen: einen Menschenversuch mit Pockenviren. Gelingt er, wird Jenner womöglich über eine entscheidende Waffe gegen das „gefleckte Ungeheuer“ verfügen.

Am 14. Mai des Jahres 1796 ritzt Edward Jenner den Arm des achtjährigen James Phipps mit einer Elfenbeinklinge ein, die mit Eiter aus einer Pustel an der Hand einer Melkerin benetzt ist. Auch diese Kuhmagd hatte sich mit Kuhpocken angesteckt. Der Junge – der Sohn von Jenners Gärtner – erkrankt ebenfalls leicht daran. Jenner notiert: „Am siebten Tag klagte er über ein unbehagliches Gefühl in der Achselgegend, am neunten Tag befiel ihn ein leichter Frost, er verlor den Appetit und hatte leichte Kopfschmerzen.“ Doch schon am zehnten Tag ist James wieder wohlauf.

Sechs Wochen später folgt das eigentliche Wagnis: Jenner infiziert den Kleinen mit Eiter aus echten Pockenbläschen. Für einige Tage bangt die Familie. Wird das Kind ernsthaft erkranken? Sogar sterben? Doch der Gärtner Phipps vertraut Jenner, der in der ganzen Gegend als gewissenhafter Arzt und als Menschenfreund bekannt ist. Vermutlich sieht der Vater darin eine Ehre, dass Jenner gerade seinen Sohn für den Versuch, die schreckliche Seuche zu besiegen, ausgewählt hat.

Zur Erleichterung aller bleibt der Junge gesund. Um ganz sicher zu gehen, ritzt ihm der Arzt zwei Monate später ein weiteres Mal die lebensgefährlichen Viren in den Arm. Und auch diesmal brechen die Pocken nicht aus. „Vakzination“ nennt Jenner sein Verfahren, nach *Variolae vaccinae*, dem lateinischen Fachbegriff für die Kuhpocken.



Der Unterschied

zwischen echten Pocken (links) und Kuhpocken – jeweils 14 Tage nach einer Impfung am Oberarm. Bis sich die harmlose Kuhpocken-„Vakzination“ Edward Jenners durchsetzt, lassen sich viele vorbeugend mit Pocken infizieren – in der Hoffnung, dass die Krankheit dann nicht ganz so schrecklich ausbricht

Dr. Edward Jenner
(1749–1823) bei
der ersten Etappe
seines berühm-
ten Experiments:
Er impft James
Phipps mit Kuhpo-
cken, damit der
Achtjährige daran
erkrankt – um
ihn sechs Wochen
später mit echten
Pocken zu infizieren



Als Edward Jenner knapp zwei Jahre darauf seine „Untersuchung über die Ursachen und Wirkungen der Kuhpocken“ veröffentlicht, sind seine Kollegen trotz des offensichtlichen Erfolgs geteilter Meinungen – die Kritiker vermissen eine wissenschaftliche Erklärung.

Tatsächlich ist der Erfolg des Experiments Jenners einziger Beweis für die Wirksamkeit seiner Vakzination. Die Erklärung dafür liefert erst mehr als 100 Jahre später Emil Behring in Berlin mit dem Nachweis der Immunreaktion: Ein Körper, der zunächst mit einem harmlosen Erreger konfrontiert wird, entwickelt Antikörper, die den Eindringling unschädlich machen. Kommt es später zum Kontakt mit einem gefährlichen Verwandten des Erregers, „erinnert“ sich das Immunsystem an den früheren Kontakt und lässt die passenden Antikörper sofort wieder herstellen (siehe Seite 132).

1798 aber versucht man in London, Jenner lächerlich zu machen: Ausgerechnet ein Landarzt, der sich sonst mit Aderlass und Amputationen abgibt, will ein Mittel gegen die Pocken gefunden haben? Ausgerechnet eine Rinderkrankheit soll die Menschheit retten? Karikaturisten zeichnen Menschen, auf deren Haut Rinderköpfe wachsen.

Doch die Kritik an Jenner verstummt bald. Seine Fallstudien überzeugen schließlich die Naturforscher der ehrwürdigen Royal Society. Zumal die Erfolge der Vakzination nicht zu übersehen sind. Die Kuhpocken-Viren können gefahrlos selbst Kindern verabreicht werden – anders als die damals zuweilen vorgenommene Impfung mit aktiven Pockenviren, die statt der erhofften milderer Form der Krankheit nicht selten deren bösartigen Ausbruch bewirkt.

Jenner verzichtet darauf, sich seine Entdeckung patentieren zu lassen. Denn er will, dass sich das Verfahren schnell verbreitet und seine Schutzimpfung für jeden erschwinglich ist. Er selbst impft Arme kostenlos und gibt einen großen Teil seines Vermögens für die

Erforschung und Verbesserung seiner Methode aus. So trocknet er etwa mit Kuhpocken infizierten Eiter auf Glas, um ihn für längeren, später sogar weltweiten Transport zu präparieren.

Aus vielen Ländern schreiben ihm Forscher und Mediziner und bitten um nähere Auskünfte. „Es wird wohl mein Schicksal sein“, sagt Jenner bei einer Unterredung mit Premierminister Henry Addington, „für die ganze Welt der Impfstoff-Beauftragte zu sein.“ Seine „Untersuchung“ erscheint in mehreren Sprachen, und bald werden zur Impfstoff-Herstellung in vielen Ländern Europas Kuhpocken-Viren auf Kalbshaut gezüchtet. Sechs Jahre nach Jenners Experiment mit James Phipps sind allein in England schon 470 000 Menschen gegen Pocken geimpft.

Edward Jenner wird noch zu Lebzeiten hoch geehrt. Seine Arbeit sei eine „der größten und weitreichendsten Erfindungen, die seit der Gründung der menschlichen Gesellschaft gemacht wurden“, erklärt Addington 1802 vor dem Parlament. Und die Regierung belohnt Jenner mit 30 000 Pfund, einer damals enormen Summe.

Heute gilt der Landarzt aus Berkeley, der 1823 gestorben ist, in der Wissenschaft als Begründer der Immunologie und als Vorreiter der inzwischen ganz selbstverständlichen Massenschutzimpfungen. Trotzdem dauerte es noch ziemlich lange, bis das *speckled monster* endgültig besiegt ist. Erst 1977 wird in Somalia der letzte Pocken-Ausbruch registriert. Damit hat sich die große Hoffnung Edward Jenners erfüllt: „Die Ausrottung der Pocken, der schrecklichsten Geißel der Menschheit, muss das Ergebnis der Vakzination sein.“

Am 8. Mai 1980 verkündet die Weltgesundheitsorganisation offiziell: Die Pocken sind tot. □

Antje Helms, 30, arbeitet als freie Journalistin in Hamburg.



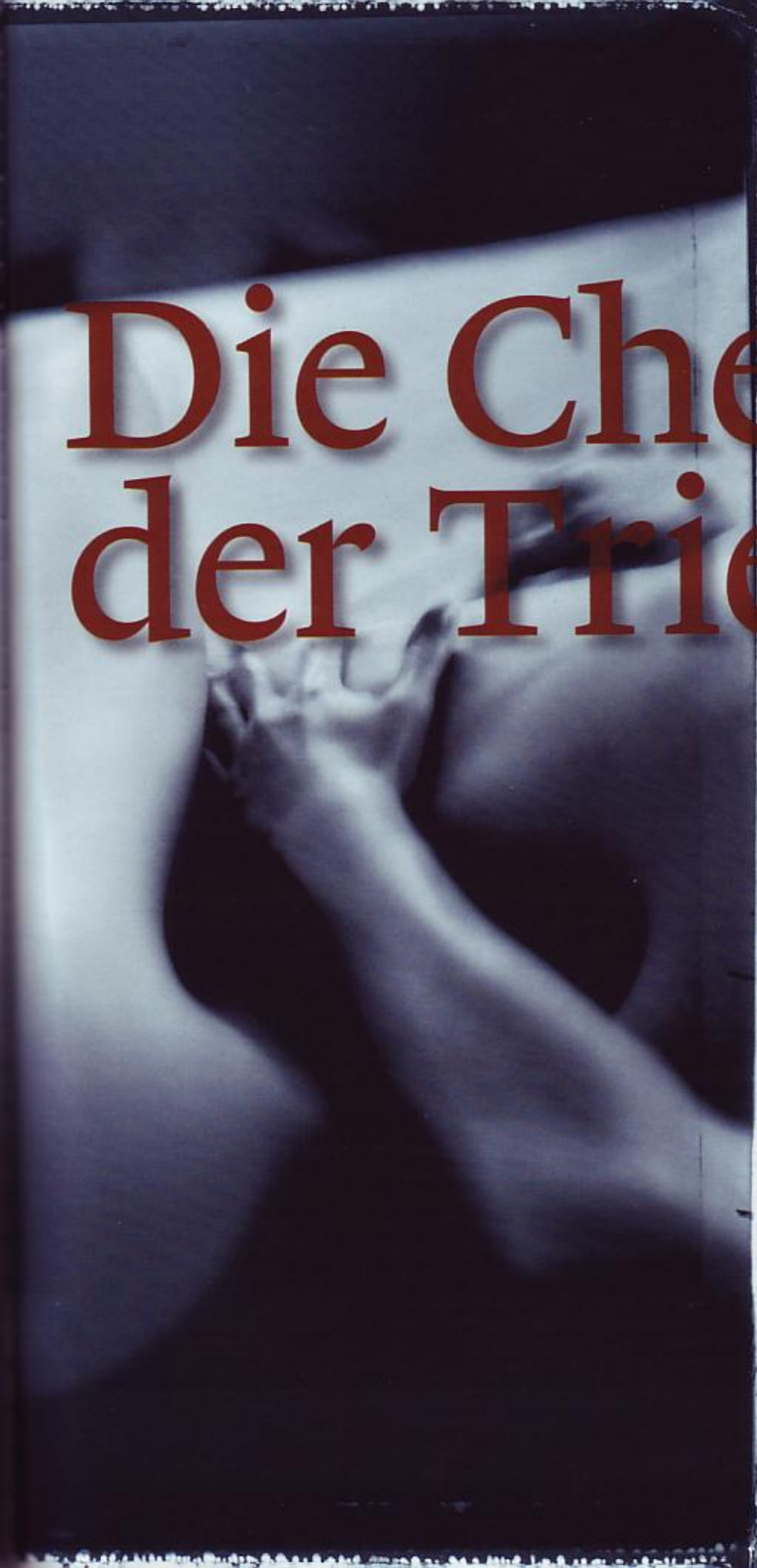
Impfbesteck: Diese klappbaren Skalpell samt Etui nutzt Jenner bei seinem Experiment



Karikaturisten machen sich zunächst über Jenner lustig: Ein Arzt inspiziert Kuhpockenbläschen auf der Hand einer Melkerin. Deren beleibter Dienstherr drängt einem anderen bereits das Skalpell auf, damit er die Bläschen aufschneide

Was sich beim Sex im Körper abspielt, was einen anderen Menschen für uns anziehend macht und welche Strategien die Geschlechter dabei verfolgen, ist für die Wissenschaft noch immer ein Forschungsgebiet voller Geheimnisse. Eines ist sicher: Eine ausgeklügelte Qualitätskontrolle steuert dabei unser Handeln





Die Chemie der Triebe

Text: Jens Schröder

Die Lust müsste dem jungen Mann eigentlich längst vergangen sein: Der Proband liegt in einem Labor der Universitätsklinik Essen auf dem Rücken, sein Kopf ist eingezwängt zwischen zwei weichen Stützen. Über ihm wölbt sich eine lärmende Röhre aus Metall und Kunststoff, und sein Körper ist umgeben von einem Magnetfeld, das 30 000-mal stärker ist als das der Erde. Er darf sich nicht rühren.

Über einen Spiegel direkt vor seinen Augen spielen ihm die Forscher kurze Filmsequenzen vor: Ein Mann und eine Frau im Freizeitdress sitzen auf einer Gartenmauer und begutachten einen gelben Rasensprenger. Schnitt. Ein Mann streichelt einer sich räkelnden Frau über die eregierten Brustwarzen. Schnitt. Ein Mann lässt sich von seiner Frau beim Zusammenbauen einer hölzernen Schublade helfen. Schnitt. Eine halbnah Aufnahme wippender Geschlechts-

Schon vor dem ersten Sex verraten Pheromone viel über den Partner: Die Botenstoffe, mit dem Schweiß ausgeschieden, nehmen wir über die Nase auf, entschlüsseln sie unbewusst – und gewinnen dabei wichtige Informationen über das Immunsystem des anderen

teile beim Sex, die Frau liegt oben. Schnitt.

„On-off-Stimulus“ nennt die Neuroradiologin Elke Gizewski diesen Wechsel von Pornofilm und Heimwerker-video in ihrem Experiment.

Erotische und neutrale Bilder sollen die für sexuelle Erregung zuständigen Areale im Gehirn der Probanden mehrmals nacheinander ein- und ausschalten. Der Magnetresonanztomograph (MRT) erkennt, dass bestimmte Gehirnregionen verstärkt durchblutet sind. Daraus schließen Forscher, welche Nervenzellen aktiviert werden, um eine Lustempfindung einzuleiten. Die neuronale Basis der Begierde leuchtet auf dem Bildschirm farbig auf – und zwar bei Frauen anders als bei Männern.

„Bei erregten Frauen fanden wir etwa eine erhöhte Aktivität im Schläfenhirn und anderen Bereichen der Hirnrinde, die für die rationale Verarbeitung von Erlebnissen zuständig sind“, erklärt Elke Gizewski. Bei Männern stellten die Forscher dagegen eine stark erhöhte Durchblutung in einigen entwicklungsgeschichtlich sehr alten Hirnregionen fest, etwa in der **Amygdala** (dem Mandelkern) im **limbischen System** oder im **insularen Kortex**.

„Diese Strukturen sind schon im Gehirn von Amphibien angelegt. Es scheint tatsächlich so, als habe die Lust bei Männern archaischere

Wurzeln und laufe mit einem stärkeren Automatismus ab als bei Frauen“, so Elke Gizewski. Ein weiterer Mosaikstein des Wissens in einem Forschungsfeld voller Rätsel.

Rund 100 Millionen Mal pro Tag, so schätzt die Weltgesundheitsorganisation, verbinden sich Paare der Gattung Homo zum Geschlechtsverkehr und zeugen dabei alle 24 Stunden etwa eine Million Kinder. Doch trotz modernster Technik sind einige der neuronalen, biochemischen und evolutionsbiologischen Hintergründe jenes Triebes, der uns unwiderstehlich zur Erhaltung unserer Art verführt, bis heute nicht abschließend geklärt.

Warum zum Beispiel halten wir manche Menschen für besonders sexy, während uns andere kalt lassen? Durch welche biochemischen Prozesse

setzt das Gehirn die visuellen und taktilen Reize um in ein Gefühl, das wir als Erregung empfinden? Warum küssen Menschen? Und warum haben sie keine Paarungssaison – anders als die meisten Tiere? Was ist ein Orgasmus, warum erleben ihn Männer schneller? Und warum gibt es ihn bei Frauen überhaupt?

Forscher streiten sogar noch darüber, weshalb sich die Menschen (wie 99,9 Prozent aller Tierarten) überhaupt geschlechtlich fortpflanzen – statt sich einfach wie einige Insekten- und Amphibienarten durch Parthenogenese, Jungfernzeugung, zu vermehren.

Der geläufigsten These zufolge dient die Sexualität seit ihrer evolutionären „Erfindung“ durch primitive Organismen vor rund 1,5 Milliarden Jahren vor allem der Anpassung an unterschiedliche Lebensräume und dem Schutz vor Krankheiten (siehe GEO kompakt Nr. 1). Denn mit

jeder geschlechtlichen Zeugung von Nachkommen wird das Erbmateriale der beiden Elternteile neu gemischt.

Dabei entsteht eine genetische Vielfalt, durch die eine Population besser gegen Angriffe von Krankheitserregern und Parasiten gewappnet ist – ein Vorteil, der offenbar sogar die schlimmste Mühsal der geschlechtlichen Vermehrung aufgewogen hat: die Suche nach einem Sexpartner.

Gerade diese Suche ist zu einem entscheidenden Ansatzpunkt für die evolutionäre Entwicklung geworden: Wer sein Erbgut nicht nur weitergeben will, sondern seinen Kindern auch das genetische Rüstzeug für eine erfolgreiche Zukunft sichern möchte, muss Partner mit besonders „guten“ Genen zielsicher identifizieren können. Und wer selbst gute Erbanlagen hat, muss diesen Vorteil einem potenziellen Sexpartner unmissverständlich mitteilen.



Forscher streiten noch darüber, weshalb der Mensch sich überhaupt geschlechtlich vermehrt

Bereits Charles Darwin hat dieses Zusammenspiel von Wahl und Werbung im Tierreich beobachtet – und dafür den Begriff der „sexuellen Selektion“ geprägt. Demzufolge setzen sich in der Evolution langfristig vor allem auch solche Eigenschaften durch, die einem Individuum Vorteile im Wettbewerb um Paarungsmöglichkeiten verschaffen.

Heute geht man in der Forschung davon aus, dass dabei die Wahl vor allem Sache der Weibchen ist, während die Männchen eher sich selbst anpreisen. Männer aller Arten haben die Fähigkeit, mit geringem Aufwand Millionen von Spermienzellen herzustellen. Die Evolution – so eine gängige Theorie – habe sie damit zum Casanova-Verhalten verdammt, weil Promiskuität ihre Chancen auf Fortpflanzung maximiere.

Die Frauen dagegen sind nur in Abständen fruchtbar und investieren viel Zeit und Energie in Schwangerschaft, Geburt und Nachwuchspflege. Sie sind daher auf eine besonders gründliche Prüfung des Sexpartners angewiesen, wenn sie diese Investition absichern wollen.

So wählen Menschenfrauen empirischen Untersuchungen zufolge heutzutage besonders häufig finanziell abgesicherte, hochgewachsene Männer mit hohem sozialen Status, die oft ein wenig älter sind als sie selbst – und somit Versorgerqualitäten haben.

Eine weitere Theorie geht davon aus, dass Weibchen aller Arten potenzielle Partner außerdem nach dem so genannten Handicap-Prinzip bewerten: Attraktiv ist, wer sich mit extravagantem körperlichen Merkmalen oder Verhaltensweisen selbst schadet oder in Gefahr bringt.

So gefällt den weiblichen See-Elefanten vor allem der Rüssel der Männchen: Je stärker dieser Nasenfortsatz ausgeprägt ist, desto mehr beschränkt er bei Kämpfen das Blickfeld des Bullen. Wer trotz großer Nase seine Rivalen besiegt, der beeindruckt das Weibchen ganz besonders.

Guppy-Männchen verhalten sich im Beisein von Weibchen geradezu draufgängerisch, schwimmen gefährlich

nah an einen Raubfisch heran, um ihr Vertrauen in die eigene Fluchtreaktion zu demonstrieren. Auch die Gegenprobe ist aufschlussreich: Ohne weibliche Zuschauer ergreifen die eben noch kühnen Guppy-Männchen sogleich die Flucht vor dem Fressfeind.

Selbst bei Menschen finden die Anhänger des Handicap-Prinzips Belege für ihre Theorie: Teure Autos etwa signalisieren überschüssige Ressourcen, extreme Sportarten betonen Belastbarkeit und Selbstvertrauen.

Der Evolutionsbiologe Geoffrey Miller behauptet gar, dass sämtliche Hervorbringungen unseres Geistes, von der Kunst über die Wissenschaft bis hin zur Moral, nichts anderes seien als evolutionäre „Abfallprodukte“ menschlichen Balzverhaltens.

Unser Gehirn, so Millers kontroverse These, ist ebenso wie das Gefieder des Pfauenhahns ein Instrument der Werbung, seine heutige Komplexität ein Produkt der sexuellen Selektion. Wer seinen Intellekt kreativ einsetze, beweise damit, dass er es sich leisten kann, zu malen, zu philosophieren oder einfach seine Eloquenz zu pflegen.

Eine gute Investition in die eigenen Nachwuchschancen: Denn auch bei häufigem Verkehr dauerte es im Durchschnitt drei Monate, bis die Frau schwanger wird. Bis dahin, so hat Miller berechnet, hat ein Paar rund zwei Millionen

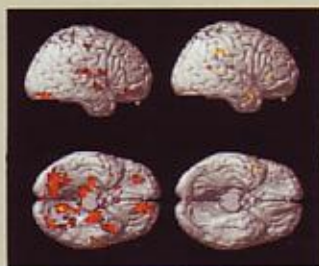
Wörter gewechselt – was für einen sorgfältigen Partnertest reichen sollte.

Auf einen weit subtileren Mechanismus der Partnerwahl lassen die Forschungen über **Pheromone** schließen – chemische Botenstoffe, die ständig über den Schweiß ausgedient werden. Unsere Artgenossen nehmen diese molekularen Signale über die Nase auf und entschlüsseln sie.

Manche Forscher glauben, dass dabei das „vomeronasale Organ“ in der Nasenscheidewand eine Rolle spielt, das unabhängig vom Geruchssinn direkt über Nervenbahnen auf den **Hypothalamus** einwirken kann, einen Teil des Gefühlszentrums im Zwischenhirn.

Studien an der Universität Chicago lassen darauf schließen, dass potenzielle Sexpartner schon anhand von ein paar winzigen Tropfen Blut, Schweiß oder Tränen die genetische Beschaffenheit des Immunsystems bei ihrem Gegenüber unbewusst erschnüffeln. Und dass Frauen sich besonders zu solchen Männern hingezogen fühlen, deren Immungene den eigenen nicht allzu sehr ähneln, aber auch nicht gänzlich unterschiedlich sind.

Aus evolutionärer Sicht erscheint das sinnvoll: Wenn sich die Krankheitsabwehr von Vater und Mutter unterscheidet, erben die Nachkommen Immunkompetenz von beiden und sind gegen mehr Erreger geschützt. Sind aber die Ge-



Der Anblick pornografischer Filme stimuliert die Geschlechter unterschiedlich. Männer (links) sind insgesamt stärker erregt als Frauen (rechts) und zeigen vor allem in entwicklungsgeschichtlich alten, triebsteuernden Gehirnregionen wie Mandelkern und insularem Kortex erhöhte Aktivität (MRT-Aufnahme)

ne der Eltern zu verschieden, besteht die Gefahr, dass gute Abwehranlagen eines Partners in der radikal neuen Mischung verloren gehen.

„Natürlich darf man sich die Wirkung der menschlichen Pheromone nicht als einfachen Auslösemechanismus vorstellen“, sagt die Biologin Martha McClintock von der Universität Chicago. „Pheromone können aber unsere Stimmung modulieren, einen emotionalen Grundton setzen und dazu beitragen, dass das Eis zwischen zwei Menschen schneller schmilzt.“

Auch scheinbar reine äußerlichkeiten haben für die Partnerstrategie Bedeutung. So haben beim Menschen beide Geschlechter eine Vorliebe für gleichmäßigen Körperbau – da Symmetrie als Zeichen eines mischerbigen Genoms gedeutet werden kann und somit als Signal für gute Gesundheit.

Überall auf der Erde finden Männer zudem weibliche Körper dann besonders attraktiv, wenn der Taillenumfang rund 70 Prozent des Hüftumfangs beträgt – eine Proportion, die Studien zufolge tatsächlich mit höheren Geburtenraten einhergeht.

Signale der Fruchtbarkeit erkennen Männer auch in den weiblichen Gesichtszügen: An der schottischen University of St. Andrews bevorzugten Probanden in einem Test etwa schmale Kiefer und volle Lippen – Merkmale, die vom weib-

lichen Sexualhormon Östrogen beeinflusst werden, einem Produkt gesunder Eierstöcke.

Frauen ziehen manchmal sogar im Rhythmus ihres eigenen Zyklus Schlüsse aus der Physis der Bewerber: Untersuchungen zufolge finden sie während ihres Eisprungs Männer mit kantigen Gesichtszügen besonders attraktiv – vermutlich, weil eine robuste Physis des Partners genetische Gesundheit für die Früchte einer jetzt möglichen Zeugung verheißt.

Wenn aber eine Empfängnis unwahrscheinlich ist, schätzen die Probandinnen eher Gesichter mit weichem Mienenspiel, in denen sie wohl unbewusst



Die drei Schwellkörper des Penis – im unteren ist die Harnröhre eingebettet – füllen sich bei Erregung unwillkürlich mit Blut (gefärbter Dünnschnitt)

Anzeichen für Fürsorge und Familiensinn erkennen.

Die Wissenschaftler deuten dieses Ergebnis als Zeichen einer evolutionär verwurzelten Doppelstrategie, durch die Frauen die Vorteile polygamer Beziehungen zugunsten ihrer Kinder optimal nutzen können: starke Gene und väterliche Fürsorge – im Zwei-

fel sogar von verschiedenen Partnern.

Ähnlich interpretieren Evolutionsbiologen eine physische Besonderheit, durch die sich menschliche Frauen von fast allen anderen weiblichen Säugetieren unterscheiden: Sie haben keinen Östrus, also keine klar definierte Paarungszeit, in der besondere körperliche Signale und Verhaltensweisen seitens der Weibchen die Männchen sexuell erregen.

Der Eisprung der Menschenfrauen verläuft weitgehend im Verborgenen. Ihre Brüste und Hüften sind unabhängig vom Stand ihres Zyklus vergrößert und weich gerundet, was eine permanente sexuelle Bereitschaft signalisiert – unter Säugetieren einzigartig.

Warum die Ur-Frauen diese so genannte Dauerrezeptivität entwickelt haben, ist umstritten. Diskutiert wird etwa die These, der versteckte Eisprung habe ihnen geholfen, rivalisierende Sexualpartner im Falle einer Geburt über die Vaterschaft im Unklaren zu lassen. Das habe der im Tierreich verbreiteten Neigung der Männchen entgegengewirkt, die Brut ihrer Vorgänger zu töten, um dem eigenen Nachwuchs bessere Entfaltungsmöglichkeiten zu verschaffen.

Eine andere These geht davon aus, dass die ständige Sexbereitschaft zwischen Menschenpaaren die emotionale Bindung der Partner zueinander festigt – und damit die Entwicklung von Familien-

strukturen mit einem Mann als Versorger fördert.

Eine solche Bindungsfunktion wird auch einer weiteren, vor allem menschlichen Besonderheit zugeschrieben: dem häufigen Geschlechtsakt von Angesicht zu Angesicht, der durch einen bei Menschenfrauen (im Gegensatz zu fast allen anderen Säugetierweibchen) nach vorn gebogenen Vaginalkanal begünstigt wird. In dieser Position ist auch das den Menschen eigene Küssen während des Geschlechtsverkehrs möglich: ein Verhalten, bei dem die Nasenlöcher des einen Partners die Nasenflügel des anderen berühren – eine Region, über die besonders viele Pheromone abgegeben werden.

Spätestens dann, beim Schmusen, übernimmt das wichtigste Sexualorgan vollends die Regie: das Gehirn, das die Reize und Signale von Augen, Nase, Zunge, Lippen, Haut, Penis und Klitoris über bioelektrische und biochemische Prozesse in ein Gefühl der sexuellen Erregung übersetzt. In der **Großhirnrinde** werden die eintreffenden Stimuli bewertet und an den Hypothalamus im Zwischenhirn weitergeleitet.

Dieser kirschgroße Verwalter der Triebe und Gefühle gibt binnen Millisekunden den Befehl, die chemischen Zutaten der Begierde bereitzustellen. Das im Mark der Nebennie-

Innerhalb von Millisekunden werden die chemischen Zutaten der Begierde freigesetzt



ren produzierte Adrenalin – eigentlich ein Botenstoff für Stress- und Angstsituationen – lässt nun das Herz rasen, mobilisiert die Körperkräfte, senkt die Reizschwelle und versetzt den Organismus in Alarmbereitschaft. Das Gehirn schüttet Dopamin und das Nebennierenmark Noradrenalin aus – Substanzen, die euphorisch stimmen und das Schmerzempfinden dämpfen.

Über das **unwillkürliche Nervensystem** werden die Gefäße erweitert, um die Zellen mit mehr Sauerstoff zu versorgen. In den Schwellkörpern von Penis und Klitoris staut sich das Blut. Bei den Frauen vergrößern sich Vagina und Schamlippen, die weiblichen Brustwarzen erigieren.

Die Hypophyse entsendet das „luteinisierende Hormon“ (LH) in die Blutbahn, das in den Keimdrüsen der Hoden und Eierstöcke die Bildung von Geschlechtshormonen fördert – insbesondere des Testosterons,

das sowohl bei Männern als auch bei Frauen triebsteigernd wirkt. Vermutlich treten seine Moleküle mit dem Hypothalamus im Zwischenhirn in Wechselwirkung und stimulieren ihn. Über das Rückenmark erhält das Gehirn von den Tastrezeptoren der Haut und der Genitalien weitere Berührungssignale, die die Gefühlskaskade immer weiter in Gang halten.

Im limbischen System des Gehirns, das Sinneseindrücke emotional verarbeitet, werden verschiedene Gruppen von Neuronen aktiv. Nach den Ergebnissen der Essener Erregungsstudie geschieht dies ganz besonders bei Männern. Und zwar in Regionen der Gehirnrinde, die man oft in Zusammenhang mit zielgerichtetem (oder gar obsessivem) Verhalten bringt.

Aktiviert werden auch bei beiden Geschlechtern (aber bei Männern deutlich stärker) die Nervenzellen des Mandel-

kerns, dessen Funktion offenbar auch mit der vorfreudigen Erwartung positiver Gefühle zu tun hat.

Einige Untersuchungen deuten darauf hin, dass es sich dabei um den Teil eines dopaminsteuerten „Systems der Gier“ handeln könnte, das dafür sorgt, dass das erreichte Niveau der Erregung bis zum Höhepunkt noch nicht als befriedigend angesehen wird.

Ein unwiderstehlicher Antrieb zum Weitermachen also, vergleichbar mit dem Suchtverhalten eines Drogenabhängigen – mit dem Unterschied, dass im fortgeschrittenen Stadium der Drogensucht der Gier oft keine Befriedigung mehr folgen kann. Ganz im Gegensatz zum Sex, den im Idealfall der Orgasmus krönt.

In diesem höchsten der Gefühle finden sich die zuvor offenbar auf unterschiedliche

Spätestens beim Schmusen übernimmt unser wichtigstes Sexualorgan das Kommando: das Gehirn. Es veranlasst unter anderem die Ausschüttung von Adrenalin – eines Botenstoffes, der den Körper in Alarmbereitschaft versetzt

Weise erregten Geschlechter wieder vereint. Das bioelektrische Muster des Höhepunkts scheint bei Mann und Frau weitgehend identisch zu sein – und ist zum Großteil in der rechten Hirnhälfte zu verorten: Untersuchungen des Gehirns während eines Orgasmus mit einem Positronenemissionstomographen (PET) haben gezeigt, dass sich die Aktivität im Hypothalamus wie in weiten Teilen der Großhirnrinde schlagartig verringert – Letzteres ist ein Effekt, den alle euphorisierenden Drogen von Alkohol bis Heroin auslösen.

Stattdessen feuern die Nervenzellen in Teilen des so genannten Belohnungssystems des Gehirns, aber auch im **Kleinhirn** ihre Signale ab. Die aktivierten Areale steuern während des Orgasmus unter anderem die Ausschüttung eines Cocktails körpereigener Drogen des Wohlfühls (etwa Dopamin), aber auch die Reflexe ganz bestimmter Muskelgruppen, vor allem des *Musculus pubococcygeus* im Beckenboden.

Atemfrequenz und Puls erhöhen sich weiter. Die bewusste Kontrolle über die Motorik geht während des Höhepunktes teilweise verloren. Bei Frauen kontrahieren Gebärmutter, Scheide und die umliegende Muskulatur meist drei- bis 15-mal und im Rhythmus von 0,8 Sekunden.

Beim Mann ziehen sich (mit derselben Frequenz) Sa-

menleiter, Samenblase und Prostata zusammen und führen so die Ejakulation herbei. Deren durchschnittliches Ergebnis haben Wissenschaftler ebenfalls ermittelt: Mit einer Geschwindigkeit von bis zu 18 km/h strömen bis zu acht Milliliter Sperma aus der Eichel. Die Flüssigkeit füllt nicht einmal ein Schnapsglas zur Hälfte, doch mit den enthaltenen Samenzellen könnten theoretisch alle Frauen Europas befruchtet werden. Bei beiden Geschlechtern zuckt beim Orgasmus auch die After-schließmuskulatur mit.

Die Kontraktionen dauern bei Männern durchschnittlich zwölf, bei Frauen bis zu 51 Sekunden, wobei der „gefühlte Orgasmus“ bei Frauen unter Umständen mehr als doppelt so lang andauern kann.

Eine Grundfrage der Sexualforschung haben die Wissenschaftler aber auch mit der genauesten Bestandsaufnahme des Orgasmus nicht klären können: Weshalb erleben Frauen überhaupt einen Höhepunkt?

Nach der Logik der Evolution ist ein orgiastischer Abschluss des Verkehrs beim weiblichen Sexpartner für die Zeugung von Nachwuchs gar nicht nötig. Unter Forschern ist bis heute umstritten, ob etwa Säugetierweibchen ein unserem Orgasmus ähnliches Gefühl beim Sex entwickeln können (wohingegen das für männliche Säugetiere inzwischen außer Frage steht, auch wenn sie den Höhepunkt nicht, wie Menschen, planen oder herbeisehnen können).

Die Indizien aus der weiblichen Physis sind widersprüchlich: Einerseits verfügen Frauen mit der Klitoris im

Gegensatz zu Männern über ein Organ, das ausschließlich der Wollust dient und dessen Schwellkörper unter der Haut bis zu neun Zentimeter lang sein und 8000 Nervenfasern enthalten kann – vergleichbar dem männlichen Penis.

Andererseits liegt die Klitoris so ungünstig, dass sie bei der Penetration vom Penis kaum stimuliert wird – je nach Studie kommen nur 50 bis 90 Prozent der Frauen beim Sex regelmäßig zum Höhepunkt. „Wenn die Natur gewollt hätte, dass Frauen beim Sex einen Orgasmus bekommen, dann läge die Klitoris in der Vagina“, kommentiert der Wissenschaftsautor Rolf Degen dieses Paradoxon.

Forscher haben deshalb die unterschiedlichsten Theorien entwickelt, um den weiblichen Orgasmus als evolutionär sinnvoll verstehen zu können. Gerade dessen Unzuverlässigkeit, so eine These, steigere den Sexualtrieb der Frau – wie bei einem Glücksspieler, der vor dem Spiel nicht wissen kann, ob er gewinnt.

Auch als Mittel der Paarbindung ist der weibliche Orgasmus schon beschrieben worden. Als Befruchtungshelfer, der mit seinen Kontraktionen die Spermien in die Gebärmutter sauge. Und als Instrument der Partnerbewertung, mit dessen Hilfe Frauen die Qualität eines Partners an dessen Fähigkeit messen können, sie liebevoll und geduldig zum Orgasmus zu bringen.

Der Anthropologe Donald Symons hält den Orgasmus der Frau dagegen für nichts weiter als ein Nebenprodukt, physiologisch nutzlos „wie die Brustwarzen des Mannes“. Denn die organischen und neuronalen Strukturen, die den aus evolutionärer Sicht unerlässlichen männlichen



Nach dem Höhepunkt: Der weibliche Orgasmus bleibt ein Rätsel – aus evolutionärer Sicht ist das orgiastische Finale bei Frauen für die Zeugung von Nachwuchs überflüssig

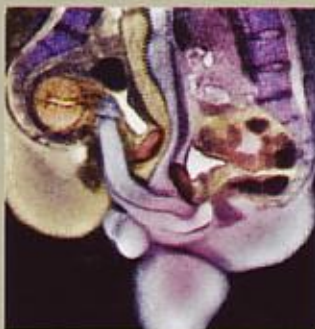
Höhepunkt auslösen, werden ja bereits in einer frühen Entwicklungsphase des Embryos ausgebildet – zu einem Zeitpunkt, an dem sich die Anlagen für Klitoris oder Penis, Schamlippe oder Hodensack noch gar nicht differenziert haben. Frauen, so Symons kontrovers diskutierte These, hätten ihren Orgasmus nur dieser entwicklungsgeschichtlich frühen biologischen Gemeinsamkeit mit dem anderen Geschlecht zu verdanken.

Kaum umstritten ist immerhin, was nach dem Orgasmus geschieht: Sowohl bei Männern als auch bei Frauen erhöht sich die Konzentration

des Milchbildungshormons Prolaktin im Blut deutlich. Bei Männern gilt es als Auslöser der postkoitalen Lustlosigkeit, bei Frauen hat es diese Wirkung – aus bislang ungeklärten Gründen – nicht.

Langfristig, so vermuten manche Forscher, diene der Sex nicht nur der Erhaltung der Art, sondern auch der Gesundheit des Individuums – selbst wenn dieser Zusammenhang noch nicht genau verstanden ist. Statistische Hinweise lieferte etwa eine Langzeitstudie der Universität Bristol bei Männern mittleren Alters, die einem Gesundheitscheck unterzogen worden waren. Nach zehn Jahren lag die Sterberate bei Teilnehmern, die nach eigenen Angaben nur selten zum Orgasmus kamen, um rund 50 Prozent höher als bei den Männern mit hoher Orgasmusfrequenz.

In anderen Untersuchungen wurden noch konkretere Indizien gefunden – etwa dass ein aktives Sexualleben das Risiko von Gefäßerkrankungen und verschiedenen Krebsarten vermindert. Die Mechanismen dieser Zusammenhänge sind allerdings noch unbekannt.



Der nach vorn gebogene Vaginalkanal erleichtert den Akt von Angesicht zu Angesicht – eine Stellung, die vor allem den Menschen vorbehalten ist

Sex sichert nicht nur die eigene Art – sondern dient auch der Gesundheit

Vermutet wird eine gesundheitsfördernde Wirkung des rätselhaften „Kuschelhormons“ Oxytocin oder des Sexualhormons Testosteron, dessen Spiegel im Blut sich mit häufigem Sex erhöht. Auch wird berichtet, dass häufiger Sex die Menge des Abwehrstoffes Immunglobulin A im Blut vergrößere. Und nicht zuletzt wird behauptet, dass schon die regelmäßige Bewegung beim Geschlechtsverkehr und die stimmungsaufhellende Wirkung der Lust nachhaltig gesund seien.

Einer weiteren Studie zufolge erkrankten Männer, die häufig zum Orgasmus kommen, etwa durch Onanie, seltener an Prostatakrebs. Möglicherweise spülen die Ergüsse krebserregende Substanzen aus der Prostata, die sich sonst eher hätten anreichern können. Wäre das tatsächlich der Fall, so könnte man von einer Art „Gesundheitsprämie“ der Evolution für die Masturba-

tion sprechen – für eine Form von Eigenliebe, die zudem den Vorteil hat, dass bei Verkehr mit einer Partnerin stets frischer Samen in die Vagina gelangt. Der womöglich bessere Chancen hat, zur Eizelle durchzudringen.

Der Sex ist vorbei. Was bleibt? Möglicherweise eine dauerhafte Beziehung – und ein noch komplizierteres Problem für die naturwissenschaftliche Forschung: Die biochemischen Wechselwirkungen zwischen Lust, Liebe und Zuneigung sind extrem schwer zu fassen. Die Rolle des Oxytocins etwa, das zumindest manchmal beim Sex (aber auch während der Geburt) ausgeschüttet werden soll, ist tatsächlich weitgehend ungeklärt.

Die amerikanische Anthropologin Helen Fisher hat mit einem Magnetresonanztom-

mographen die Gehirne frisch Verliebter gescannt, während die Probanden ein Foto des Partners anschauten.

Ergebnis: Auch das Gefühl der Verliebtheit scheint mit Aktivität im Belohnungssystem des Gehirns und der Ausscheidung höherer Mengen der körpereigenen Drogen Dopamin und Noradrenalin einherzugehen. Fisher bezeichnet das Bedürfnis nach romantischer Liebe deshalb, wie Hunger oder die Lust auf Sex, als einen menschlichen Trieb – wenn auch einen, dessen Auftreten nachhaltig von Emotionen geprägt wird.

Dass sich Verliebtheit oft in beinahe zwanghaftem Verhalten und obsessiven Gedanken äußert, glaubt die Psychiaterin Donatella Maraziti von der Universität Pisa ebenfalls mithilfe von Untersuchungen frisch Verliebter geklärt zu haben: Die Teilnehmer wiesen eine fast krankhaft verminderte Konzentration des Neuro-

transmitters Serotonin auf – eine Diagnose, die auch bei vielen Patienten mit Zwangsnerven gestellt wird.

Nach einigen Monaten, so vermuten Wissenschaftler, stumpfe allerdings der biochemische Mechanismus der Liebe ab: Die Rezeptorstellen im *Nucleus accumbens* – einem Teil des Belohnungssystems im Gehirn, das den Drogencocktail der Begierde verarbeitet – verringern sich. Bekannt ist auch, dass sich etwa im vierten Jahr einer Liebesbeziehung besonders viele Paare trennen. Weitere Forschungen sollen ergründen, ob es da einen Zusammenhang gibt.

Aber vielleicht will man es so genau am Ende auch gar nicht wissen. □

Jens Schröder, 31, ist GEO-Redakteur. Wissenschaftliche Beratung: Dr. Elke Gizewski, Abt. Neuroradiologie, Universitätsklinik Essen; Prof. Dr. Andreas H. Guse, Institut für Biochemie und Molekularbiologie am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.



Die Lurche, der Sex und die Stradivari

Die menschliche Erotik ist ein Rätsel, das zu 1000 Theorien anregt. Selbst die Wissenschaftler wissen eigentlich nicht, wovon sie reden

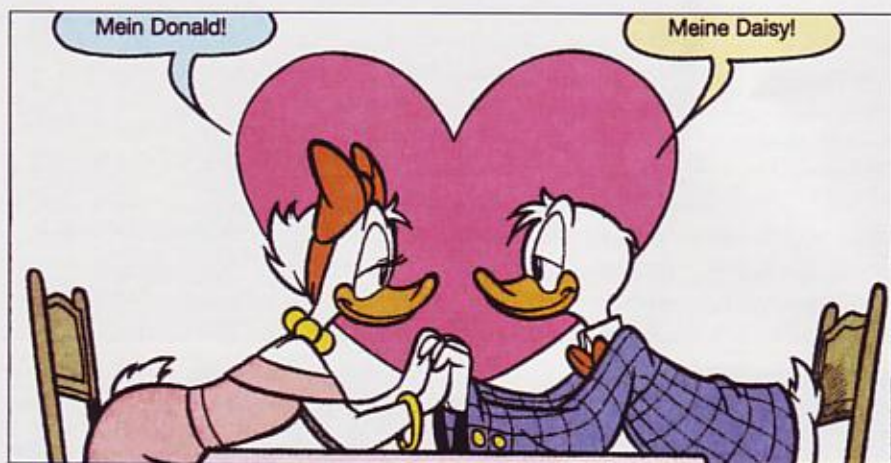
Die Sexualität des Mannes wird also von einer Hirnregion gesteuert, die es auch bei Lurchen gibt und die extrem primitiv ist. Der männliche Sex funktioniert so simpel – zack, zack –, dass man für eine Therapie eventueller Probleme eigentlich gar keine akademisch gebildeten Ärzte bräuchte, man könnte es als Nebenjob den Kfz-Mechanikern zuschlagen: Drei Monate Zusatzausbildung – und männliche Sexprobleme ließen sich in Zukunft in der Autowerkstatt behandeln.

Die Sexualität der Frau dagegen ist so kompliziert, dass sogar die Wissenschaft sie nicht versteht. Möglicherweise ist die Frau das einzige unter allen weiblichen Lebewesen, das einen Orgasmus haben kann. Gleichzeitig aber wurde die Klitoris

ähnlich wie die Statuen auf der Osterinsel oder die Schwarzen Löcher im Weltall.

Zu dem Körperthema Nummer eins, der Sexualität, habe ich nur diese einzige Bemerkung zu machen: Sexualität bedeutet, dass ein Lurch versucht, Geige zu spielen.

Mein Fazit nach der Lektüre aller Beiträge in diesem Heft: Unser Körper ist einerseits etwas wahnsinnig Kompliziertes. Ein Ferrari ist simpel dagegen. Andererseits können nur ganz wenige, zum Beispiel Michael Schumacher, einen Ferrari in voller Fahrt perfekt um einen Laternenpfahl herumsteuern. Beim Körper dagegen, der doch so schwierig gebaut ist, schaffen das sogar ich und du. Darauf, so meine ich, dürfen wir ruhig ein wenig stolz sein.



als wichtiger Orgasmusbeschaffer von der Natur an einer zur Erlangung sexueller Freuden recht ungünstigen Stelle befestigt, das heißt, ihr zum Orgasmus zu verhelfen ist so schwierig wie das Spielen auf einer Stradivari, und es liegt hier ein Rätsel vor, das zu 1000 Theorien anregt,

Sowohl beim Ferrari als auch beim Körper kommt es auf die Nerven an. Die muss man immer behalten. Die Nerven sind nämlich die Grundlage bei der ganzen Körpersteuerung. Überraschend wirkt die Tatsache, dass eine einzelne Nervenzelle manchmal ganz autonom Entscheidungen treffen darf.

Ein Impuls kommt an, ein hemmender oder auch ein erregender, und die einzelne Nervenzelle, die sozusagen nur ein

ganz kleines Licht im Körper ist, darf entscheiden, ob dieser Impuls weitergeleitet wird oder nicht. Ist das nicht vorbildlich demokratisch von uns? Bei Ferrari haben die Reifenwechsler nicht annähernd so viele Rechte.

Das Gehirn, habe ich außerdem gelernt, funktioniert ähnlich wie das Finanzamt. Wir haben da oben eine Bürokratie, und die schickt immer Mappen oder Kopien zum Abzeichnen umher. Wenn wir zum Beispiel den Fußzeh bewegen oder die Stirn runzeln, schickt unsere Großhirnrinde eine Kopie der gerade getroffenen Bewegungsentscheidung an das Kleinhirn. Reine Routinesache. Es muss ja alles koordiniert werden. In jeder Sekunde werden bei uns da oben eine Wahnsinnsmenge an Entscheidungen getroffen. Diese ganzen Entscheidungen müssen ununterbrochen miteinander abgeglichen werden, damit keine peinlichen oder gefährlichen Widersprüche herauskommen.

Einerseits also sendet das Ohr das Signal: „Es juckt! Sofort am Ohr kratzen!“, normalerweise läuft das automatisch. Andererseits sitzt im Hirn eine Instanz, die sagt: „Juckreiz unterdrücken. Du bist Michael Schumacher und fährst gerade um die gefürchtete Satanskurve herum. Kratzen kommt nicht infrage. Diese Information nicht an die bewusste Ebene weiterleiten! Denn die bewusste Ebene muss sich ganz auf die Satanskurve konzentrieren.“

Und noch etwas ist mir klar geworden: dass wir der Chemie mit dem Satz „Ich lass doch keine Chemie in meinen Körper!“ bitter Unrecht tun. Denn die Chemie ist eh schon in uns drin. Hormone sind Chemie pur – chemische Boten, die wie antike Herolde oder wie Ausrufer ununterbrochen durch den Körper rennen und allen, die es angeht, die neuesten Nachrichten überbringen. Ohne Chemie würde das Leben nicht richtig gut funktionieren.

Überschätzt dagegen werden die Sinne. Die Sinne tun immer so arrogant. Sie behaupten, sie seien hochdifferenziert und wahnsinnig informativ. In Wirklichkeit ist das Bluff. Auf unserer Netzhaut

haben wir tatsächlich nur mickrige drei Sorten Farbrezeptoren: blau, rot, grün. Jeder Eisverkäufer müsste zumachen mit nur drei Sorten. Und dass wir nur fünf Geschmäcker wirklich unterscheiden können, nämlich salzig, sauer, süß, bitter und „fleischig“, bedeutet schon das nächste Armutszeugnis und eine Ohrfeige für die zeitgenössische Restaurantkritik.

Der einzige Sinn, der in meinen Augen an Respekt gewonnen hat, ist der Geruch. Drei Prozent unseres Erbgutes besteht aus Riechgenen, 10 000 verschiedene Gerüche können wir im Kopf speichern, sogar auf der Haut gibt es Riechzellen, und die Spermien haben Riechrezeptoren, gehen also ganz der Nase nach.

All dies sind Fakten, die uns unsere Nase mit neuen Augen sehen lassen. Obwohl wir ja im Grunde nur blaue, rote und grüne Nasen mit unseren Rezeptoren eindeutig erfassen können. Nein, Moment, es wird ja alles pausenlos gemischt, es gibt ja Tausende Farben, weil das Grundprinzip des Körpers aus Kommunikation besteht, mit anderen Worten: Ohne Klatsch und Tratsch läuft gar nichts.

Auf der Hirnrinde erstrecken sich wogende Assoziationsfelder, die dauernd Informationen austauschen, da summt es wie mittags in der Kantine. Aber am faszinierendsten von allem ist wahrscheinlich die Region „präfrontaler Kortex“, wo wir unsere langfristigen Pläne abspeichern, die Folgen einer Tat bedenken, wo Meinungen und Moralbegriffe sitzen. Dort sitzt sozusagen das spirituelle Zentrum unseres Ichs.

Insgesamt gibt es allerdings ein halbes Dutzend Regionen, die bei der Entstehung von Gefühlen und bei der Intuition mitwirken. In diesen Gegenden werden vor einer wichtigen Entscheidung alle möglichen früheren Erfahrungen aus dem Gedächtnisspeicher hervorgekramt und ausgewählte Kantinengespräche zum Abwägen frisch zur Verfügung gestellt.

Zum Beispiel, wenn eine Person vor der Wahlkabine oder auch an der Theke

steht und sich in letzter Minute überlegt, was sie wählen soll, oder trinken. Da glühen dann die Drähte im limbischen System, große Mengen an Erfahrungen, Meinungen und Intuitionseinflüsterungen werden ausgestoßen, bis unsereins sagt: „Guavensaft, bitte. Meine Freundin Monika trinkt den auch immer gern.“

Zweites Fazit: Von allen Organen des Körpers steht einem das Gehirn emotional eindeutig am nächsten. Mit dem Gehirn kann man sich einfach am besten identifizieren. Auf das Gehirn würde man, wenn man sich zwischen verschiedenen Organen entscheiden müsste, besonders

**»Die Natur, so, wie sie
sich heute darstellt,
könnte eine Spur perfekter sein, aber im
Grunde ist sie okay«**

ungern verzichten. Andererseits: Vielleicht ist ausgerechnet dieses wunderbare, liebenswerte Gehirn wissenschaftlich längst überholt!

Denn der Bio-Computer im Büro wird kommen. Das sagen viele Experten. Es ist nur noch eine Frage der Zeit. Der Bio-Computer wird nicht mehr mit Nullen und Einsen rechnen, sondern mithilfe organischer Basen sowie mithilfe der DNS. Auf diese Weise könnten noch viel größere Datenmengen als heute gespeichert werden. Aber das ist nicht die Hauptsache. Die Hauptsache besteht darin, dass sich so ein Bio-Computer mit dem menschlichen Organismus bio-vernetzen ließe.

Das wird eine Revolution. Es fängt damit an, dass wir uns Wissensimplantate in den Kopf setzen lassen, die uns von einem Tag auf den anderen in die Lage versetzen, zu jonglieren, Mathe zu können oder Chinesisch zu reden. Der Satz: „Da hast du dir etwas völlig Verrücktes in den Kopf gesetzt!“ wird eine völlig neue Bedeutung bekommen.

Die Vernetzung unserer Gehirne untereinander sowie mit den Computern wird etwas Ähnliches wie Gedankenübertragung möglich machen. Natürlich muss man aufpassen, dass einem kein fremder Hacker ins Hirn schlüpft, oder ein Bio-Computer-Virus, dann redet man am Ende nur noch Chinesisch, und zwar rückwärts, das will man nun auch wieder nicht.

Wir sind dann keine Individuen mehr, sondern ein Netzwerk. Weil wir direkt von Gehirn zu Gehirn miteinander kommunizieren können, brauchen wir auch keine Sprache mehr. Nur noch Traditionalisten werden darauf bestehen, dass echt geredet wird, zum Beispiel die katholische Kirche bei der Messe am Sonntag. Wir müssen nicht reden, wir senden nur Reize und Impulse, die jeweils bestimmte Hirnregionen stimulieren, Botschaften, die jenseits der sprachlichen Ebene funktionieren. Der Chinese versteht es auch.

Radio und Fernsehen können ebenfalls direkt in die Gehirne eingespeist werden. Alles geht übrigens viel schneller. Konferenzen sind nach Sekunden vorbei. Das, was der Chef will, muss er gar nicht erklären – man fühlt es. Ist das wirklich ein Fortschritt?

Der mit den Hirnen vernetzte Bio-Computer wird neue, geradezu gigantische Möglichkeiten der Manipulation eröffnen, fürchte ich. Man muss sich nur einmal eine Sekunde lang vorstellen, dass Werbespots direkt ins Hirn eingespeist werden können – eine Horrorgeschichte.

Ich spinne ein wenig herum, aber wirklich nur ein wenig. Ausgeschlossen ist das alles nicht. Es ist nicht einmal unwahrscheinlich. Unsere Kinder und Enkel werden sich, was den Körper betrifft, vermutlich mit ethischen Grundsatzfragen herumschlagen müssen, gegen die unsere heutigen Gen-Debatten wie Kinderlitzchen wirken.

Drittes Fazit also: Die Natur, so, wie sie sich heute darstellt, könnte vielleicht eine Spur perfekter sein, aber im Grunde ist sie okay.

Kurz und knapp

Wichtige Fachbegriffe – präzise erklärt. Die Zahlen geben an, auf welchen Seiten sie vorkommen und wo sie (blau hervorgehoben) zum Verständnis eines Textes besonders wichtig sind

Abwehr, humorale

Antwort des Organismus auf eingedrungene Krankheitserreger oder Fremdstoffe durch die Abgabe von Eiweißkörpern wie zum Beispiel **Antikörpern** in Blut, **Lymph** und **Gewebe**. (136)

Abwehr, zelluläre

Abwehr von Krankheitserregern oder Fremdstoffen durch direkte Einwirkung von den verschiedenen **weißen Blutkörperchen**. (136)

Adhäsionsmoleküle

Moleküle in den **Zellmembranen**, die gleichartige Zellen in **Geweben** zusammenhalten. Dabei handelt es sich um Verbindungen von **Proteinen** mit **Zucker**-Arten (Glykoproteine). (39)

Aktionspotenzial (Nervenimpuls)

Von einem Reiz ausgelöst, schlagartige Veränderung der elektrischen Spannung an der **Zellmembran** einer **Nervenzelle**. Diese Spannungsänderung pflanzt sich entlang der Membran fort und dient dazu, Informationen als elektrisches Signal weiterzuleiten. (101, 103)

Alveolen (Lungenbläschen)

Feine Bläschen in der Lunge, in denen **Bronchiolen** enden und der Gasaustausch stattfindet: Beim Einatmen wird Sauerstoff aus der Luft aufgenommen, beim Ausatmen verlässt mit Kohlendioxid angereicherte Luft durch **Bronchiolen**, **Bronchien** und Luftröhre den Körper. (82, 83)

Aminosäuren

Organische Verbindungen, die eine Aminogruppe (-NH₂) und eine Carboxylgruppe (-COOH) enthalten. Aufgrund dieser Endgruppen verbinden sie sich miteinander leicht zu Ketten. Aminosäuren sind die Bausteine der **Proteine** sowie der Peptide (weniger als 100 Aminosäuren). (30, 31, 38, 65, 66, 67, 73, 94, 121, 128)

Amygdala (Mandelkern)

Struktur im **Großhirn**, die tief im Schläfenlappen liegt und zum **limbischen System** gehört. Der Mandelkern spielt eine wichtige Rolle für das Gefühlserleben. (111, 112, 146)

Antigen

Substanz, die im Körper eine Immunreaktion hervorruft. Als Antigene wirken oft Substanzen an der Oberfläche von Krankheitserregern oder von anderem biologischen Material, etwa von transplantiertem **Gewebe**. Die Reaktion des Organismus besteht in der Aktivierung bestimmter Zellen, die sich direkt gegen den Träger des Antigens wenden, sowie häufig in der Bildung von **Antikörpern** gegen das Antigen. (72, 139, 140, 166)

Antikörper

Bestimmte **Proteine**, so genannte **Immunglobuline**, die jeweils spezi-

fisch mit einem **Antigen** reagieren und von einem bestimmten Typ von **B-Lymphozyten** gebildet werden. (66, 72, 73, 140, 143)

Apoptose

Programmierter Zelltod. Bei der Entwicklung und Erhaltung vielzelliger Organismen gehen zahlreiche Zellen kontrolliert zugrunde. Planmäßig werden **Enzyme** aktiviert, die die Zelle in Bruchstücke zerlegen. Apoptose findet schon in der **Embryonalentwicklung** statt. (40, 140)

Arterien (Schlagadern)

Blutgefäße, die das Blut vom Herzen weg in alle Teile des Körpers leiten. Die größte Arterie, die Aorta oder Hauptschlagader, ist beim Menschen etwa zwei Zentimeter weit. Sie verzweigt sich bis in kleinste Arteriolen und schließlich in die noch viel engeren **Kapillaren**. (71, 77, 78)

Assoziationsareale

Bereiche der **Großhirnrinde**, die nicht in direkter Verbindung zu **Sinnesorganen** oder **Muskeln** stehen, sondern von benachbarten **primären Sinnesfeldern** empfangene Daten verarbeiten und zu einem Gesamtbild verknüpfen. (111)

ATP

Die wichtigste energiereiche Verbindung im Zellstoffwechsel. In Form von ATP (Adenosintriphosphat) wird chemische Energie, die beim Abbau etwa von **Zucker** freigesetzt wird und dann zum Aufbau anderer Moleküle dient, vorübergehend gespeichert. (38, 54, 55, 56)

Autokrine Hormonwirkung

Sekretion, bei der Signalfstoffe (**Hormone**) auf die Zellen wirken, von denen sie gebildet wurden. (123)

Axon

Fortsatz des Zellkörpers von **Nervenzellen**, der Signale weiterleitet. Neuronen besitzen in der Regel nur ein Axon, das beim Menschen mehr als ein Meter lang werden kann. (94, 101)

Bakterien

Einzellige Organismen, die keinen echten **Zellkern** besitzen. Bakterien gedeihen in ungeheurer Vielfalt und nutzen die verschiedenartigsten chemischen Prozesse, um sich mit der notwendigen Energie zu versorgen. Im Verdauungstrakt des Menschen zersetzen sie zu Billionen Nahrungsbestandteile. Manche Arten, wie etwa **Salmonellen**, verursachen Krankheiten, wenn sie in den Körper eindringen. (47, 67, 128, 136, 137, 138, 140)

Ballaststoffe

Für den Menschen größtenteils unverdauliche Bestandteile pflanzlicher Nahrungsmittel. Ballaststoffe wie etwa **Zellulose** besitzen zwar keinen Nährwert, sind aber wichtig, weil sie die Darmtätigkeit anregen und die

Absonderung von Verdauungssäften fördern. Besonders reich an Ballaststoffen sind Vollkornprodukte, Gemüse und Obst. (61, 67)

Basalganglien

Ansammlungen von **Nervenzellkörpern**, die tief im **Großhirn** unterhalb der **Großhirnrinde** liegen. Basalganglien sind unter anderem an der Steuerung der Gliedmaßen und der Augen sowie an der Verarbeitung und Wertung sensorischer Informationen beteiligt. (109)

Blinder Fleck

Stelle auf der **Netzhaut** ohne **Lichtrezeptoren**, die entsteht, weil dort der Sehnerv und Blutgefäße nach hinten aus dem Auge treten. (90)

Blutdruck

Der Druck, den das Blut durch die Pumpaktivität des Herzens auf die Wände der Blutgefäße ausübt. Er wird in mm Hg (Millimeter Quecksilbersäule) angegeben. Bei einer Blutdruckmessung wird der **systolische** und der **diastolische Blutdruck** gemessen. (78, 79)

Blutdruck, diastolischer

Niedrigster **Blutdruck** in der Phase, in welcher das Herz erschlafft und sich mit Blut füllt. Der diastolische Blutdruck ist der zweite, niedrigere der beiden Werte, die bei Blutdruckmessungen angezeigt werden. Er beträgt bei einem gesunden Erwachsenen im Ruhezustand etwa 60 bis 85 mm Hg.

Blutdruck, systolischer

Höchster **Blutdruck** beim Zusammenziehen des Herzens und beim Auspressen des Blutes in die Gefäße. Der systolische Blutdruck ist der erste, höhere der beiden bei Blutdruckmessungen angezeigten Werte. Er liegt bei einem gesunden Erwachsenen im Ruhezustand etwa zwischen 100 und 130 mm Hg.

Blutgruppen

Bluttypen, die sich durch erbliche Merkmale der Erythrozyten unterscheiden. Wird Blut zweier unverträglicher Gruppen miteinander vermischt, können die Erythrozyten im jeweils anderen Blut eine Reaktion auslösen, die zum gegenseitigen Verklumpen führt. (72, 79)

Blutkörperchen

Zellen im Blut. Sie bestehen zu etwa 95 Prozent aus **roten Blutkörperchen** (Erythrozyten). Daneben enthält das Blut **weiße Blutkörperchen** (Leukozyten) und **Blutplättchen** (Thrombozyten). (71, 72, 82, 83)

Blutkörperchen, rote (Erythrozyten)

Erythrozyten besorgen den lebensnotwendigen Gasaustausch: In der Lunge aufgenommenen Sauerstoff transportieren sie in das weit verzweig-

te System von **Kapillaren**, wo sie den Sauerstoff abgeben und dafür Kohlendioxid mit in die Lunge nehmen. (29, 39, 46, 72, 73, 139, 140)

Blutkörperchen, weiße (Leukozyten)

Farblose Zellen im Blut. Im Gegensatz zu den roten Erythrozyten bilden die Leukozyten keine einheitliche Gruppe. Die Zellen differieren in ihrer Größe und Form und üben unterschiedliche Funktionen innerhalb des Immunsystems aus. Unterschieden werden **Granulozyten**, **Lymphozyten**, **dendritische Zellen** und Monozyten. Letztere wandeln sich nach dem Abwandern in verschiedene **Gewebe** zu **Makrophagen** um. (39, 46, 73, 136, 140)

Blutkreislauf

Der Umlauf des Blutes im Körper des Menschen, der dazu dient, die **Gewebe** mit Sauerstoff und Nährstoffen zu versorgen sowie Stoffwechselprodukte abzutransportieren. Das vom Herzen angetriebene Blut zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf von Gefäßen, die den ganzen Körper durchziehen. Innerhalb des Blutkreislaufes wird zwischen **Körperkreislauf** und **Lungenkreislauf** unterschieden, die beide im Herzen beginnen und enden. (37, 38, 50, 51, 65, 67, 71, 73, 77, 78, 120, 123, 139)

Blutplättchen (Thrombozyten)

Sehr kleine farblose Plättchen bzw. Körperchen im Blut, die bei der Blutgerinnung eine wichtige Rolle spielen. (73, 141)

Blutplasma

Der flüssige Anteil des Blutes, also Blut ohne **Blutkörperchen**. Der Anteil des Plasmas am gesamten Blut beträgt etwa 55 Prozent. Blutplasma enthält neben rund 90 Prozent Wasser Mineralsalze, Eiweißstoffe (**Proteine**), Nahrungsstoffe und Abbauprodukte des Stoffwechsels, **Vitamine**, **Hormone** und andere Substanzen. (71, 72, 73, 82)

Blutserum

Die helle Flüssigkeit in geronnenem Blut. Im Gegensatz zum **Blutplasma** enthält das Serum kein Fibrinogen mehr – ein **Protein**, das maßgeblich an der Blutgerinnung beteiligt ist. (71)

B-Lymphozyten (B-Zellen)

Lymphozyten mit der Fähigkeit, sich nach der Aktivierung durch **T-Lymphozyten** zu Plasmazellen zu entwickeln und **Antikörper** zu produzieren. Ein Teil der B-Lymphozyten wird zu langlebigen B-Gedächtniszellen, die bei erneutem Kontakt mit dem entsprechenden **Antigen** besonders schnell reagieren können. (140)

Bronchien

Die beiden jeweils in einen Lungenflügel führenden Äste der sich abwärts gabelnden Luftröhre einschließlich ihrer größeren Verzweigungen. (82)

Bronchiolen

Feinste Verzweigungen der **Bronchien** mit einem Durchmesser von weniger als 1 Millimeter. (82)

Chromosomen

Stäbchenförmige, oft gekrümmte Gebilde im Zellinneren, in denen die Erbsubstanz (**DNS**) gespeichert ist. Alle Zellen von Lebewesen mit Ausnahme der **Bakterien** und **Blaualg**en enthalten in ihrem **Zellkern** eine für jede Art typische Anzahl von Chromosomen. Diese Träger der Erbsubstanz bilden im Zellkern normalerweise ein wirres Netzwerk, treten jedoch bei jeder Zellteilung in gedrungener Form klar hervor. (24, 29, 30)

Dendriten

Wenige Millimeter lange, baumartig verzweigte Fortsätze des Zellkörpers von **Nervenzellen**. Eine Nervenzelle kann Tausende Dendriten haben, über die sie mit zahlreichen anderen Nervenzellen verbunden ist und Signale empfängt. (101)

Dendritische Zellen

Weißer Blutkörperchen mit tentakelartigen Auswüchsen. Sie kommen vor allem in der Haut und in den Schleimhäuten vor. Sie nehmen als **Fresszellen** Krankheitserreger auf und stimulieren das **erworbene Immunsystem**, indem sie **Antigene** der zerlegten Eindringlinge an ihrer Oberfläche präsentieren und dadurch **T- und B-Lymphozyten** mobilisieren. (137, 139, 140)

Diastole

Phase der Herzrhythmickeit, bei der die Herzmuskulatur nach einer Kontraktion (**Systole**) wieder erschlafft und sich die Herzkammern mit Blut füllen. (77, 78)

Diffusion

Physikalischer Prozess, in dessen Verlauf Teilchen, etwa Atome oder Moleküle, von Orten höherer Konzentration zu benachbarten Orten geringerer Konzentration gelangen, sodass ein Ausgleich stattfindet. (82, 120, 123)

DNS

In allen Lebewesen – mit Ausnahme einiger Viren – vorhandener Träger der genetischen Information. **DNS** (Abkürzung für Desoxyribonukleinsäure) besteht aus zwei Molekülketten, die strickleiterartig über jeweils zwei sich gegenseitig ergänzende **Nukleinsäurebasen** miteinander verbunden sind und eine Wendel bilden, die so genannte Doppelhelix. Die Reihenfolge, in der die Paare der Nukleinsäurebasen in den beiden Strängen aufeinander folgen, bestimmt den genetischen Code. (29, 30, 31, 38, 137)

Drüsen

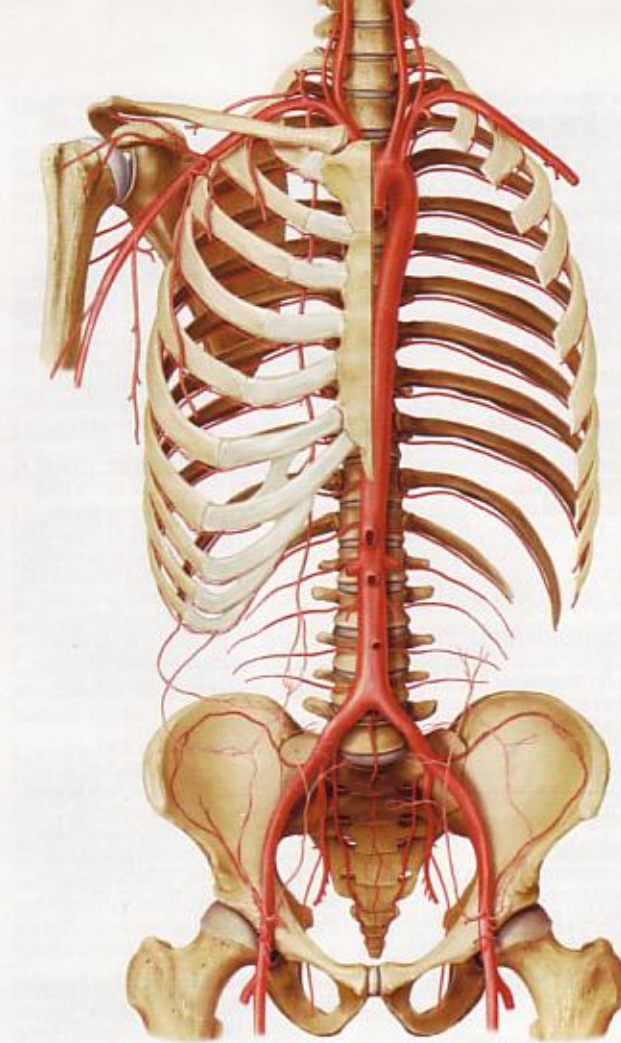
Zellkomplexe (**Organe**) oder Einzelzellen, die vor allem flüssige, selten feste oder gasförmige Stoffe (Sekret) bilden und sie nach außen beziehungsweise in Körperhöhlen (exokrine Drüsen) oder in Gefäßsysteme abgeben (**endokrine Drüsen**). (61, 101, 120, 123, 128)

Ektoderm

Äußeres **Keimblatt**. Aus ihm entstehen die Haut mit Haaren und Nägeln, die **Sinnesorgane** und das **Nervensystem**. (24, 25, 26)

Elastin

Protein, das neben dem **Kollagen** in Bindegewebe, Wandungen von



Die Aorta versorgt den Körper mit Blut, indem sie sich in die Hals-, Achsel- und Oberschenkel Schlagader sowie in viele kleinere Arterien verzweigt, etwa die Interkostalararterien an jeder Rippe

Blutgefäßen und in Bändern enthalten ist und vor allem auch in elastischen Fasern etwa der Haut vorkommt. (127)

Embryo

In der Humanmedizin die Frucht in der Gebärmutter bis zum Ende der achten Woche. Danach wird die Frucht **Fetus** genannt. (24, 25, 26, 27, 30, 39, 121)

Embryoblast

Im sehr frühen Entwicklungsstadium des Menschen (Blastozyste) ein Zellhäufchen, aus dem der eigentliche **Embryo** entsteht. (24)

Embryonale Stammzellen

Zellen im frühen Embryonalstadium, deren Entwicklung noch nicht auf bestimmte **Organe** festgelegt ist. Aus ihnen können sämtliche der über 200 unterschiedlichen Zelltypen des menschlichen Körpers hervorgehen. Die Alleskönner lassen sich unbegrenzt in Kultur halten und können gentechnisch gezielt verändert werden. Die Forschung mit menschlichen embryonalen Stammzellen ist daher umstritten. (24, 25)

Endknöpfchen

Knopfartig verdickter Endabschnitt eines **Axons**. Das Endknöpfchen

bildet den sendenden Teil einer **Synapse**. Es enthält Bläschen mit **Neurotransmittern**. (101)

Endokrine Hormonabgabe

Abgabe von Signal- und Botenstoffen (**Hormonen**) durch **Drüsen** oder spezialisierte Zellen, die in den Blutstrom erfolgt. (123)

Endolymph

Flüssigkeit im **häutigen Labyrinth**, einem Teil des Innenohrs. (92, 93)

Endoplasmatisches Retikulum

System feinsten, aus dünnen **Membranen** gebildeter Kanälchen im **Zytoplasma** aller Lebewesen außer **Bakterien**. Das Endoplasmatische Retikulum produziert vor allem **Proteine** und **Lipide** (Fette), auch zerlegt es Zellgifte, dient dem Stofftransport und der Signalumwandlung. (38)

Entoderm

Inneres **Keimblatt**. Aus ihm entstehen neben dem Magen-Darm-Trakt, der Leber und der Lunge unter anderem auch die Bauchspeicheldrüse, die Schilddrüse und die Nebenschilddrüsen, die Harnblase, der Harnleiter und der **Thymus**. (24, 25)

Enzyme

Fast ausschließlich **Proteine**, die als Biokatalysatoren biochemische Vorgänge beschleunigen oder überhaupt erst ermöglichen, ohne selbst dabei verbraucht zu werden. Sämtliche in Lebewesen ablaufenden Stoffwechselvorgänge kommen durch das Wirken von Enzymen zustande. (24, 25, 30, 31, 38, 40, 61, 63, 65, 66, 69, 128, 137)

Erbfaktor

siehe **Gen**. (45)

Fette

Verbindungen von jeweils einem Molekül Glycerin mit ein bis drei Molekülen Fettsäure. Als kalorienreichste Grundnahrungsstoffe sind Fette von großer Bedeutung für die menschliche Ernährung. Die Fettspeicher des Körpers sind seine wichtigsten Energiepots. (25, 38, 61, 63, 65, 66, 72, 121, 126, 128)

Fetus (Fötus)

Bezeichnung der menschlichen Frucht nach Abschluss der **Embryonalzeit** bis zur Geburt. (27, 72, 88, 121, 141)

Freie Nervenendigungen

Stark verzweigte Fortsätze (**Dendriten**) von Sinnesnervenzellen in der Haut, die Reize aus der Umwelt aufnehmen. Da sie keine speziellen **Rezeptoren** besitzen, werden sie als „frei“ bezeichnet. (96, 127, 128)

Freie Radikale

Atome oder Moleküle, die ein oder mehrere „ungepaarte“ Elektronen besitzen und deshalb überwiegend instabil und hochreaktiv sind. Freie Radikale entstehen bei der Spaltung von Molekülen – vor allem unter der Einwirkung von Stoffen aus dem Tabakrauch, UV- und radioaktiver Strahlung sowie Umweltgiften, aber auch bei biochemischen Reaktionen in der Zelle. In Körperzellen können sie zu Schäden an der **DNS**, an **Enzymen** und den Proteinen der **Membranen** führen. (40)

Fresszellen

Zellen des Immunsystems, die Mikroorganismen, Fremdkörper und abgestorbene Gewebsteile in sich aufnehmen, zerlegen und dadurch unschädlich machen. (47, 65, 73, 136, 137–141)

Gallenflüssigkeit (Gallensäure)

Von der Leber gebildetes Sekret. Die Galle gelangt entweder direkt durch den Lebergallengang oder nach Zwischenlagerung und Eindickung in der Gallenblase in den Zwölffingerdarm. Sie ermöglicht die Verdauung der Nahrungs**fette** und regt die Bewegungen des Dünndarms (Peristaltik) zur Weiterbeförderung seines Inhalts an. (50, 65, 66, 67, 73, 78)

Gedächtnis

Die Fähigkeit des **Gehirns**, Informationen kurz- oder langfristig zu speichern und nach Bedarf abzurufen. Es wird zwischen dem **Verhaltensgedächtnis** und dem **Wissensgedächtnis** unterschieden. An der Gedächtnisbildung sind verschiedene Hirnbereiche beteiligt. Für die langfristige Speicherung ist der Hippocampus, eine Struktur unterhalb der

Großhirnrinde im Schläfenlappen, unerlässlich. (94, 105, 108, 113, 111)

Gehirn

Jener Teil des **zentralen Nervensystems**, der im Schädel sitzt. In ihm liegen die wichtigsten Schalt- und Steuerungszentren des Organismus. (24, 26, 27, 38, 44, 46, 47, 56, 62, 63, 83, 88, 90–95, 100–106, 108–113, 120, 122, 123, 128, 146–149, 151)

Gelber Fleck

Stelle auf der **Netzhaut** mit der höchsten Konzentration an **Lichtrezeptoren**, und zwar hauptsächlich farbempfindlichen **Zapfen**. Der gelbe Fleck ist somit die Zone der besten Auflösung, Farbunterscheidung und der größten Sehschärfe. (90)

Gelenk

In der Anatomie eine bewegliche Verbindung zwischen Knochen. Die Knochenenden sind im Bereich des Gelenks speziell aneinander angepasst und mit **Knorpel** überzogen. Ein verbleibender Spalt wird außen von der Gelenkkapsel umhüllt, deren innere Schicht Gelenkschmiere in den Spalt absondert. Hinzu kommen Bänder verschiedener Art, Zwischenschichten, Schleimbeutel. (47, 92, 101)

Gen

Erbanlage, Einheit der Erbinformation. Ein oder mehrere Gene bestimmen, zusammen mit Umwelteinflüssen, die Ausbildung eines Merkmals eines Lebewesens. Gene bestehen aus bestimmten Abschnitten des **DNS-Moleküls**. (29, 30, 31, 39, 94, 95, 123, 137, 146–148)

Genom

Die Gesamtheit aller **Gene** eines Organismus. (29, 30, 148)

Geruchsrezeptoren

Spezielle Moleküle auf der Oberfläche von **Riechzellen**. Diese Moleküle verbinden sich jeweils mit bestimmten Geruchsstoffen, die dadurch von den Riechzellen „wahrgenommen“ werden. (95)

Geschmacksknospen

Enthalten Gruppen von **Geschmacksnervenzellen**. Sie liegen in den **Papillen** der Zungenoberfläche. (62, 95)

Gewebe

Verband von Zellen gleichen Typs, die gemeinsam einen Aufgabenbereich erfüllen. Es werden vier Grundgewebe unterschieden: Epithel-, Nerven-, Muskel- sowie Binde- und Stützgewebe. (39, 40, 47, 67, 71–73, 82, 83, 126, 127, 136, 138, 141)

Glomeruli

Bestimmte Regionen im **Riechkolben**. In den Glomeruli enden die **Axone** von **Riechzellen**, und es findet eine erste Bearbeitung der von den Riechzellen angelieferten Signale statt. (94)

Golgi-Apparat

Von dem italienischen Mediziner und Nobelpreisträger Camillo Golgi (1844–1926) beschriebenes **Membransystem** im **Zellplasma**. Der Golgi-Apparat ist der Hauptschlagplatz für Makromoleküle wie etwa **Proteine**, die dort vervollständigt, abgeändert

oder zur Sekretion aktiviert werden. Im Golgi-Apparat von Bauchspeicheldrüsenzellen etwa entsteht aus inaktivem Proinsulin aktives Insulin dadurch, dass eine Serie von **Aminosäuren** entfernt wird. (38)

Granulozyten

Zu den Immunzellen zählende **Blutkörperchen**, die wie **Makrophagen** als **Fresszellen** wirken, aber kleiner sind. (136, 137, 138, 141)

Großhirn

Der größte Teil des **Gehirns**, der beim Menschen vier Fünftel der Hirnmasse ausmacht und die Grundlage für dessen geistig-seelische Leistungsfähigkeit bildet. Das Großhirn besteht aus zwei walnussartig gefurchten Hälften (Hemisphären), die durch einen dicken Nervenstrang, den „Balken“, miteinander verbunden sind. (92, 94, 108, 109–112)

Großhirnrinde (Kortex)

Äußere, gefurchte und stark gefaltete Schicht des **Großhirns**. Die beim Menschen etwa 1,3 bis 4,5 Millimeter dicke Großhirnrinde enthält einen Großteil der **Nervenzellen** und integriert als höchste Instanz die Tätigkeit des gesamten **zentralen Nervensystems**. (88, 109, 110, 113, 148, 149)

Hämoglobin

Roter Blutfarbstoff in den Erythrozyten. An Hämoglobin gebunden, wird über den **Blutkreislauf** Sauerstoff von der Lunge in den Körper und ein Teil des Kohlendioxids aus dem Körper zur Lunge transportiert. (39, 72, 73, 82, 83)

Hinterhauptslappen

Am Hinterkopf liegender Bereich der **Großhirnrinde**, der das Sehzentrum enthält. (92, 110)

Hirnstamm

Entwicklungsgeschichtlich ältester Teil des **Gehirns**, der zwischen **Rückenmark** und Zwischenhirn liegt. Der Hirnstamm überwacht vor allem

elementare Körperfunktionen. So werden hier Wärme-, Wasser- und Energiehaushalt gesteuert oder auch Atmung und Herzschlag reguliert. (83, 108, 109, 112)

Hormone

Von **Hormondrüsen** sowie besonderen Zellen und **Geweben** in geringen Mengen produzierte und ins Blut abgegebene Wirkstoffe. Sie beeinflussen vielerlei Vorgänge im Körper, indem sie etwa Entwicklung und Wachstum steuern und zahlreiche Stoffwechselprozesse regulieren. (25, 38, 63, 65, 66, 71, 72, 120, 121–123)

Hox-Gene (Homöobox-Gene)

Eine Gruppe von **Genen**, deren **DNS** etwa 180 Paare von **Nukleinsäurebasen** in fast identischer Reihenfolge enthält. Diese Folge von Nukleinsäurebasen, die so genannte Homöobox, wurde in Genen vieler Organismen entdeckt. Hox-Gene bestimmen, zu welchem Zeitpunkt in der Entwicklung des **Embryos** bestimmte Gruppen von Genen aktiv werden. (26)

Hypothalamus

Teil des Zwischenhirns. Der Hypothalamus ist das höchste Kontrollzentrum des **vegetativen Nervensystems**, in dem unter anderem Stoffwechselvorgänge, **Wasserhaushalt** und Körpertemperatur reguliert sowie elementare Verhaltensweisen gesteuert werden. (120, 121, 123, 147, 148, 149)

Immunglobuline

Von **B-Lymphozyten** gebildete **Proteine**, die als **Antikörper** auf jeweils spezifische **Antigene** reagieren. (128, 151)

Immunität, angeborene

Natürliche, unspezifische Widerstandsfähigkeit des Organismus gegen Krankheitserreger, die auf angeborenen Schutzmechanismen beruht und vor allem vom **Komplementsystem** und von **Fresszellen** wie zum Beispiel **Makrophagen** geleistet wird. (136)

Immunität, erworbene

Im Laufe des Lebens erworbene spezifische Widerstandsfähigkeit, die nach der Auseinandersetzung des Organismus mit einem bestimmten Krankheitserreger oder durch eine Schutzimpfung etwa mit abgeschwächten Erregern eintritt. Sie beruht vor allem auf der Aktivität von **Lymphozyten**. (136, 137, 139, 140)

Kapillaren (Haargefäße)

Feinste, nur mit dem Mikroskop erkennbare Blutgefäße. Engmaschige Netzwerke der nur etwa 0,007 bis 0,008 Millimeter weiten Kapillaren durchziehen alle Körpergewebe. Durch sie werden Nährstoffe und Sauerstoff im Blut transportiert und ins **Gewebe** abgegeben. Gleichzeitig werden Kohlendioxid und Abfallprodukte des Stoffwechsels aufgenommen. (71–73, 76, 78, 79, 83, 127)

Keimblätter

In der frühen Entwicklung des **Embryos** entstehende Zellschichten, aus denen jeweils bestimmte **Gewebe** und **Organe** hervorgehen. Beim Menschen werden drei Keimblätter unterschieden: **Ektoderm**, **Entoderm** und **Mesoderm**. (25)

Keimscheibe

Zu Beginn der **Embryonalentwicklung** des Menschen auftretendes **Gewebe**, das erst aus zwei, später aus drei **Keimblättern** besteht. (24, 25)

Kleinhirn

Im Hinterkopf gelegener Teil des **Gehirns**, der vor allem durch Koordination der **Muskeln** für den richtigen Ablauf der Körperbewegungen sorgt. So hält das Kleinhirn nach einer Lernphase Radfahrer in Balance, ohne dass diese sich noch bewusst um das Gleichgewicht kümmern müssen. (108, 109, 113, 149)

Knochenmark

Gewebe, das Hohlräume in den Knochen (Markhöhlen) ausfüllt. Das Knochenmark ist die Bildungsstätte der **roten Blutkörperchen** und der **Blutplättchen** sowie der **weißen Blutkörperchen**. (46, 72, 73)

Knorpel

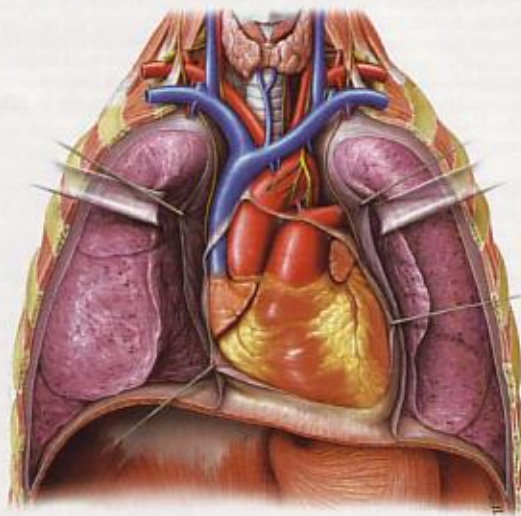
Elastisches Stützgewebe, das zusammen mit den Knochen das Skelett bildet. Knorpel besteht aus Knorpelzellen und einer sie umgebenden gallertigen Substanz, in die – mit Ausnahme des hyalinen Knorpels – **kollagene** beziehungsweise elastische Fasern eingelagert sind. (27, 47)

Kohlenhydrate

Große Gruppe von Naturstoffen, zu der verschiedene **Zuckerarten** sowie **Stärke** und **Zellulose** gehören. Kohlenhydrate bilden zusammen mit **Fetten** und **Proteinen** die für den Menschen wichtigsten Nährstoffgruppen und sind die bedeutendsten Energielieferanten. (38, 55, 61, 66)

Kollagen

Protein, das den Hauptbestandteil etwa der Sehnen, des **Knorpels** und der organischen Substanz der Knochen bildet sowie im **Bindegewebe** als Faser vorkommt. (127, 141)



Der Brustkorb enthält das Herz und die beiden Lungenflügel (hier mit chirurgischen Instrumenten angehoben, um das Herz zu zeigen), umgeben von Hüllen. Unten wird er vom Zwerchfell begrenzt, dessen Kontraktion den Brustraum vergrößert und Atemluft einströmen lässt

Komplementsystem

System von mindestens 20 **Proteinen**, das in Kooperation mit anderen Abwehrmechanismen in den Körper eindringende Krankheitserreger und Fremdstoffe bekämpft. Diese Proteine im **Blutplasma** markieren die Eindringlinge beispielsweise für **Fresszellen**, die dadurch verstärkt angelockt werden, aber sie greifen auch selbst an. (137)

Körperkreislauf

Jener Teil des **Blutkreislaufes**, durch den sauerstoffreiches Blut vom Herzen in den Körper befördert und sauerstoffarmes, mit Kohlendioxid angereichertes Blut zum Herzen zurücktransportiert wird. Der Körperkreislauf, auch großer Blutkreislauf genannt, führt von der linken Herzkammer in einem weit verzweigten System von **Arterien**, **Kapillaren** und **Venen** durch den ganzen Körper zur rechten Herzkammer zurück, wo der **Lungenkreislauf** beginnt. (77)

Kortex, insularer

Teil der **Großhirnrinde**. Der insulare Kortex liegt in einer Furche des Gehirns, verdeckt von Teilen des Stirn-, Scheitel- und Schläfenlappens. Er spielt eine Rolle beim Lustempfinden. (146)

Kortex, motorischer

Areal im Stirnlappen der **Großhirnrinde**, das willkürliche **Muskelbewegungen** steuert. (109, 110)

Kortex, präfrontaler

Vorderstes, im Stirnbereich liegendes Areal der **Großhirnrinde**, das an höheren geistigen Fähigkeiten beteiligt ist (Bewusstsein, Planung, Selbstkontrolle, **Gedächtnis**, Lernen). Im präfrontalen Kortex werden Entscheidungen getroffen, die – durch eine Verbindung mit dem **limbischen System** – auch von emotionalen Empfindungen beeinflusst werden. (111, 113)

Labyrinth

Teil des Innenohrs mit dem eigentlichen Gehör- und dem Gleichgewichtsorgan. Es wird in Schnecke (Sitz des Hörorgans), die Vorhöfe und Bogengänge (Sitz des Gleichgewichtsorgans) unterteilt. Es besteht aus dem **knöchernen Labyrinth** und dem darin enthaltenen **häutigen Labyrinth**, das den Strukturen des knöchernen Labyrinths folgt, aber durch eine Flüssigkeit, die **Perilymphe**, von ihm getrennt ist. (38, 96)

Labyrinth, häutiges

Aus **Membranen** bestehender Teil des **Labyrinths**. Das häutige Labyrinth verläuft innerhalb des **knöchernen Labyrinths**. Das häutige Labyrinth enthält das Gehör- sowie das Gleichgewichtsorgan. (92)

Labyrinth, knöchernes

Der harte, knöcherne Teil des **Labyrinths**. (92)

Limbisches System

Eine funktionelle Gruppe unterschiedlicher Strukturen an der Basis des **Großhirns**, die maßgeblich an der Entstehung von Emotionen, an der **Gedächtnisbildung**, an Orientierungs- und Aufmerksamkeitsreaktionen sowie Motivation und Antrieb beteiligt sind. (94, 111, 146, 149)

Linse

In der Anatomie der linsenförmige durchsichtige Körper, der dem Auge die Scharfeinstellung auf Nah- oder Fernsicht ermöglicht. Die aus Schichten unterschiedlicher Brechkraft bestehende Linse ist an Fasern aufgehängt, die mit dem **Ziliarmuskel** verbunden sind und dadurch mal mehr, mal weniger gestrafft werden. Bei angespannten Fasern wird die Linse flachgezogen und auf Fernsicht eingestellt, bei schlaffen Fasern wölbt sie sich und begünstigt die Nahsicht. (90, 91)

Lipide

Fette und fettähnliche Substanzen, die in Wasser unlöslich sind. (38, 66)

Lungenkreislauf

Jener Teil des **Blutkreislaufes**, der vor allem dazu dient, das Blut von Kohlendioxid zu befreien und wieder mit Sauerstoff zu beladen. Der **Lungenkreislauf**, auch kleiner Blutkreislauf genannt, führt von der rechten Herzkammer über die Lunge zur linken Herzkammer, wo der **Körperkreislauf** beginnt. (77, 78)

Lymph

Dem **Blutplasma** ähnliche Flüssigkeit in den **Körpergeweben**. Lymphe bildet sich aus **Blutplasma**, das durch die Wände der **Kapillaren** gedrungen ist. Sie versorgt die Zellen mit Nährstoffen und nimmt Abbauprodukte auf. Die in ihr enthaltenen **Lymphozyten** erfüllen wichtige Aufgaben zum Schutz des Organismus. (66, 73)

Lymphozyten

Gruppe **weißer Blutkörperchen**. Nach ihren unterschiedlichen Aufgaben bei der Abwehr von Mikroorganismen und Fremdstoffen werden **B-Lymphozyten** und verschiedene Typen von **T-Lymphozyten** unterschieden. Wenngleich zeitweise im Blut treibend, üben Lymphozyten ihre Abwehrfunktionen hauptsächlich im **Lymphsystem** aus. (139, 140)

Lymphsystem

System zur Ableitung der **Lymphe** aus den **Körpergeweben** in den **Blutkreislauf**, das auch der Immunabwehr dient. Das Lymphsystem besteht aus dem Lymphgefäßsystem und den „lymphatischen Organen“, die am Immungeschehen hauptsächlich beteiligt sind. Dazu gehören insbesondere die Lymphknoten, die Milz, der **Thymus** und die Mandeln. (73, 136, 139)

Lysosomen

Organellen, die beim Abbau organischer Substanzen innerhalb der Zellen eine wichtige Rolle spielen. Die von einer **Membran** umschlossenen Bläschen enthalten **Enzyme**, die nicht mehr benötigte oder in die Zelle eingedrungene unerwünschte Stoffe zersetzen. Nach dem Tod der Zelle tragen sie zu deren Selbstzerstörung bei. (38)

Makrophagen

Große **Fresszellen** in Körpergeweben. Makrophagen entstehen aus bestimmten **weißen Blutkörperchen** (Monozyten), die zunächst im Blut zirkulieren, dann aber in verschiedene **Gewebe** einwandern und sich dort zu Makrophagen differenzieren. (136, 137, 138, 140, 141)

Melanine

Gruppe von gelblich-rötlichen bis braun-schwarzen Farbstoffen, die beim Menschen vor allem in der Haut produziert werden. Melanine bestimmen die Farbe der Haut, der Haare und der **Regenbogenhaut** des Auges. Die Färbung von Sommersprossen, Leberflecken und der sehr bösartigen dunklen „Melanom“ genannten Tumoren beruht auf einer örtlichen Konzentration der Farbstoffe. (30, 90, 127)

Membran

Dünnes, feines Häutchen, das als Grenzfläche dient. (39, 47, 82, 83, 88, 92, 101)

Mesoderm

Mittleres **Keimblatt**. Aus ihm entsteht der überwiegende Teil der Körpermasse, so das Skelett, die **Muskeln** einschließlich des Herzens, das Bindegewebe, die Nieren, die Blutgefäße und die Geschlechtsorgane. (24, 25, 26)

Milchsäure

In Pflanzen, Tieren und Menschen weit verbreitete organische Säure. Im ohne Sauerstoff arbeitenden **Muskel** wird Milchsäure durch den Abbau von Traubenzucker gebildet. (55, 128)

Mineralstoffe

Anorganische Salze, die für Pflanzen, Tiere und Menschen eine wichtige Rolle spielen. Mineralstoffe sind am Aufbau von Knochen und Zähnen, aber auch vieler Biomoleküle wie **Hämoglobin** beteiligt, das Eisen enthält. (61, 66, 67, 71)

Mitochondrien

Organellen, die in den Zellen von Pflanzen, Tieren und Menschen als „Kraftwerke“ dienen. In den Mitochondrien wird aus Abbauprodukten von **Zuckern**, **Fetten** und **Proteinen** mittels Sauerstoff Energie freigesetzt und zur Nutzung, etwa in den **Muskeln**, in einem speziellen Energieträger (**ATP**) gespeichert. (38, 54, 55, 83)

Motorische Endplatte

Kontaktstelle zwischen einer **motorischen Nervenfasern** und einer **Muskelzelle** – eine spezielle Art der **Synapsen**. An den motorischen Endplatten erfolgt die Übertragung der Nervenimpulse auf die **Muskeln**. (56)

mRNS

Eine von drei in den Zellen aktiven **RNS**-Arten. mRNS ist die Abkürzung von Messenger-Ribonukleinsäure (messenger = engl. „Bote“). Die mRNS überträgt genetische Information aus dem **Zellkern** an die **Ribosomen**, die **Proteinfabriken** der Zellen. Die Moleküle dienen dort gewissermaßen als Matrizen für die Proteinproduktion. (31, 38)

Muskelfasern

Quergestreifte Muskelzellen. Die maßgebliche Eigenschaft der dünnen, langgestreckten Zellen ist ihre Fähigkeit, sich zusammenzuziehen. (52, 54, 55, 56, 82)

Muskeln

Gewebe aus Zellen, die sich zusammenziehen und wieder entspannen

können. Je nach Bau der **Muskelzellen** wird **quergestreifte** und **glatte Muskulatur** unterschieden. (25, 26, 44, 47, 51, 52, 54–55, 56, 62, 77, 79, 80, 83, 90, 92, 100, 101, 103, 109, 120, 121)

Muskulatur, glatte

Muskeln ohne feine Querstreifung. Glatte Muskeln finden sich vor allem in den Wandungen von Hohlorganen wie Blutgefäßen oder Darm und Gebärmutter und sind nicht dem Willen ihres Besitzers unterworfen. Sie arbeiten langsamer und können weniger Kraft entwickeln als **quergestreifte Muskeln**, sich jedoch ausdauernder zusammenziehen. (27, 52)

Muskulatur, quergestreifte

Muskeln mit feiner Querstreifung. Quergestreifte Muskeln sind über Sehnen mit den Knochen verbunden und ermöglichen alle Bewegungen des Körpers. Sie können nach Belieben betätigt werden. Eine Ausnahme ist der ebenfalls quergestreifte Herzmuskel. (26, 52, 54)

Mutation

Sprunghaft auftretende Veränderung des genetischen Materials. (30)

Myofibrillen

Bündel feiner Fäden in den **Muskel-fasern**, welche die Muskelkontraktion bewirken. (54)

M-Zellen

Spezielle Zellen in der Darmschleimhaut, die an vorderster Front der Immunabwehr stehen. M-Zellen nehmen **Antigene** und dabei sogar komplette Mikroorganismen auf und leiten sie an das unter der Schleimhaut liegende **Gewebe des Lymphsystems** weiter. (136)

Nervenfasern

Von einer isolierenden Hülle, der Markscheide, umschlossenes **Axon**. Mehrere gebündelte Nervenfasern bilden einen Nerv. (100, 101, 113, 120, 150)

Nervenfasern, motorische

Nervenfasern, die **Muskeln** innerviert und Kontraktionen auslöst. (101)

Nervenfasern, sensorische

Nervenfasern, die Informationen der **Sinnesorgane** an das **zentrale Nervensystem** leiten. (101, 103)

Nervensystem

Die Gesamtheit des **Nervengewebes** in einem Organismus als anatomische und funktionelle Einheit mit der Fähigkeit, Reize aufzunehmen, weiterzuleiten, zu verarbeiten, zu speichern und zu beantworten. Das Nervensystem enthält beim Menschen mehr als 100 Milliarden **Nervenzellen** und eine noch größere Anzahl von Stützzellen. Es wird zum einen anatomisch, zum anderen funktional unterteilt. Die anatomische Unterteilung unterscheidet zwischen dem **zentralen** und dem **peripheren Nervensystem**. Nach der Funktion eingeteilt, steht das **willkürliche (somatische) Nervensystem** dem **unwillkürlichen (vegetativen) Nervensystem** gegenüber. (25, 71, 100, 101, 103, 120, 121)

Nervensystem, peripheres

Der außerhalb von **Gehirn** und **Rückenmark** liegende Teil des Nervensystems. (100)

Nervensystem, unwillkürliches (vegetatives)

Der Anteil des **zentralen** und des **peripheren Nervensystems**, dessen Leistungen nicht dem Willen unterliegen. Das vegetative Nervensystem reguliert die grundlegenden Körperfunktionen wie **Blutkreislauf**, **Atmung** und **Stoffwechsel**. Es besteht aus zwei Untersystemen, dem **sympathischen** und dem **parasympathischen System**. (77, 100, 120, 149)

Nervensystem, willkürliches (somatisches)

Der Anteil des **zentralen** und des **peripheren Nervensystems**, durch den Sinnesreize bewusst wahrgenommen und Bewegungen willkürlich ausgeführt werden. (100)

Nervensystem, zentrales

Der aus **Gehirn** und **Rückenmark** bestehende Teil des Nervensystems. (100, 101)

Nervenzelle (Neuron)

Grundeinheit des Nervensystems. Neuronen sind in der Lage, elektrische Signale rasch weiterzuleiten. Jede Nervenzelle besitzt Zellfortsätze: bis zu Tausende **Dendriten** und meistens nur ein **Axon**. Durch diese Fortsätze ist jedes Neuron mit zahlreichen anderen verbunden. (39, 63, 65, 90, 92, 100, 103, 108, 109–113, 146, 149)

Netzhaut

Jener Teil des Auges, der die in den Augapfel einfallenden Lichtreize aufnimmt und die dadurch ausgelösten Nervenimpulse über den Sehnerv zum **Gehirn** leitet. Neben verschiedenen Arten von **Nervenzellen** enthält die Netzhaut **Stäbchen** und **Zapfen** als **Lichtrezeptoren**. (90, 91, 92, 95, 96)

Neuralplatte

Erste Anlage des **zentralen Nervensystems** in der **Embryonalentwicklung**. Die Neuralplatte bildet sich als Verdickung des äußeren **Keimblatts**, des **Ektoderms**. (26)

Neuralrinne

Aus den **Neuralwülsten** gebildete rinnenförmige Struktur in der **Embryonalentwicklung**. Aus der Neuralrinne geht das **Neuralrohr** hervor, der Vorläufer von **Gehirn** und **Rückenmark**. (26)

Neuralrohr

Struktur in der Entwicklung des **zentralen Nervensystems** beim **Embryo**. Das Neuralrohr bildet sich aus der **Neuralrinne**. (26)

Neuralwülste

Struktur in der Entwicklung des **zentralen Nervensystems** beim **Embryo**. Die Neuralwülste entstehen durch Aufwölbung der **Neuralplatte** und bilden die **Neuralrinne**. (25, 26)

Neurotransmitter

Substanzen, die an den Kontaktstellen (**Synapsen**) von **Nervenzellen** freigesetzt werden und Signale auf chemischem Wege von einem Neuron zum nächsten übertragen. Zu den

Neurotransmittern gehören etwa Azetylcholin, Adrenalin, Dopamin, Noradrenalin, Serotonin. (101, 113, 151)

Nukleinsäurebasen

Bestandteile der **DNS** und der **RNS**. Lediglich vier Nukleinsäurebasen – Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin – bilden in Zweierkombinationen die Sprossen der strickleiterartigen **DNS-Moleküle**, wobei immer nur Adenin mit Thymin und Cytosin mit Guanin verbunden ist. In der **RNS** wird die Base Thymin durch Uracil ersetzt. (31)

Nukleinsäuren

Langkettige organische Substanzen, die in den Zellen aller Lebewesen und in Viren als Träger der genetischen Information vorkommen. Nukleinsäuren werden aus Untereinheiten gebildet, die jeweils aus einer **Nukleinsäurebase**, einer bestimmten Art von **Zucker** und **Phosphorsäure** bestehen. Es werden zwei Nukleinsäuren unterschieden: die in der Regel als Doppelstrang vorliegende **DNS** und die meist einsträngige **RNS**. (29, 31)

Organ

Ein deutlich abgrenzbarer Teil des Körpers, der spezifische Aufgaben erfüllt, eine dementsprechend charakteristische äußere Gestalt und innere Struktur besitzt und aus verschiedenen **Geweben** besteht. Organe sind etwa Lunge, Niere, **Muskeln** und Augen. (25, 26, 27, 39, 40, 51, 63, 71, 76, 78, 82, 83, 100, 101, 108, 109, 120, 126, 136, 138, 139, 150)

Organellen

Organähnliche Gebilde in Zellen, etwa **Mitochondrien** und **Ribosomen**. (38)

Papillen

Warzenartige Erhebungen der Haut, der Schleimhaut oder von **Organen**, zum Beispiel auf der Zunge. Wissenschaftler unterscheiden auf der Zunge fadenförmige, blattförmige und pilzförmige Papillen sowie Wallpapillen. Die Letzteren besitzen besonders viele **Geschmacksknospen**. (95, 127)

Parakrine Hormonwirkung

Sekretion, bei der von Zellen abgesonderte Signal- und Botenstoffe auf direkt benachbarte Zellen wirken. (123)

Pauckenöhle

Teil des Mittelohrs mit den Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel. Durch die Gehörknöchelchen werden die durch Schallwellen ausgelösten Schwingungen des **Trommelfells** verstärkt. (92)

Perilymphe

Wässrige Flüssigkeit im Innenohr, die den Raum zwischen dem **knöchernen Labyrinth** und dem von ihm umschlossenen **häutigen Labyrinth** einnimmt. (92)

Pheromone

In kleinsten Mengen abgegebene leicht flüchtige Substanzen, die das Verhalten und den Stoffwechsel von Artgenossen beeinflussen. Pheromone sind im Tierreich weit verbreitet und auch bei Menschen als Träger einer unbewussten chemischen Kommunikation nachgewiesen. (147, 148)

Plazenta (Mutterkuchen)

Blutgefäßreiches **Gewebe**, das den **Embryo** und den daraus hervorgehenden **Fetus** mit dem Organismus der Mutter verbindet. Über die Plazenta wird der Embryo mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgt. Gleichzeitig werden Kohlendioxid und Abbauprodukte aus dem embryonalen Stoffwechsel über sie abtransportiert. (24)

Polkörperchen

In der Reifungsphase der weiblichen Keimzellen abgeschnürte plasmarme Zellen, die den nicht benötigten Teil des Erbgutes enthalten und degenerieren. (24)

Proteine (Eiweißstoffe)

Große komplexe Moleküle, die in allen Zellen eine Schlüsselrolle spielen. Die menschlichen Proteine bestehen vollständig oder überwiegend aus 21 verschiedenen **Aminosäuren**, die in unterschiedlicher Anzahl und Reihenfolge miteinander verbunden sind und eine unübersehbare Vielfalt von Eiweißstoffen bilden. (25, 26, 27, 30, 31, 38, 39, 61, 66, 71–73, 120, 127)

Pupille

Schöpfung in der **Regenbogenhaut**. Durch sie gelangt das Licht ins Augennere. (90, 91, 112)

Reflexbogen, monosynaptischer

Einfachste Form eines Reflexes, einer unbewussten automatischen Reaktion auf einen äußeren Reiz. Beim monosynaptischen Reflex, etwa dem Knieschnenreflex, löst ein Reiz einen Nervenimpuls aus, der über eine **sensorische Nervenfasern** ins **Rückenmark** geleitet wird. Dort wird er über lediglich eine **Synapse** auf eine **motorische Nervenfasern** umgeschaltet, die einen Impuls zu einem **Muskel** sendet und diesen kontrahieren lässt. (103)

Regenbogenhaut (Iris)

Pigmentierter ringförmiger Teil der mittleren Augenhaut im vorderen Auge, der die Schöpfung (**Pupille**) umschließt. Durch die Veränderung ihrer Größe reguliert sie die Lichtmenge, die auf die **Linse** und die dahinter liegende **Netzhaut** fällt. (90)

Rezeptoren

Zellen oder Moleküle, die Reize wahrnehmen. Solche Reize können sowohl physikalischer als auch chemischer Art sein und aus der Umwelt wie auch aus dem Körperinnern stammen. (88, 90, 92, 94, 96, 123, 139, 140)

Rhesusfaktor

Ein erbliches Merkmal des Blutes. Die meisten Menschen sind Rh-positiv. Der Rhesusfaktor kann bei Schwangerschaften zu Komplikationen führen, wenn das Kind Rh-positiv und die Mutter Rh-negativ reagiert. (72)

Ribosomen

Organellen, an denen die Produktion von **Proteinen** stattfindet. (30, 31, 38)

Riechepithel

Mit **Riechzellen** ausgestatteter Teil der Nasenschleimhaut. Es nimmt etwa 2 bis 3 Quadratzentimeter im oberen Teil der Nasenhöhle ein. (94)

Riechkolben

Abschnitt des Riechhirns, einer **Hirnregion**, die Signale von den **Riechzellen** verarbeitet. (94)

Riechzellen

Sinneszellen mit **Rezeptoren** für **Geruchsstoffe**. (94, 95, 96)

Rindenfelder

Areale der **Großhirnrinde**, denen zum Teil spezifische Leistungen des **Großhirns** zugeordnet werden können. (110)

RNS

Nukleinsäure, die in den Zellen aller Lebewesen enthalten ist. Drei Arten von **RNS** (Abkürzung für Ribonukleinsäure), darunter **mRNA**, erfüllen unterschiedliche Aufgaben bei der Produktion von **Proteinen**. Bei manchen Viren ist sie Träger der Erbinformation.

Rückenmark

Strang aus **Nervenzellen**, der die Wirbelsäule im Wirbelkanal durchzieht. (56, 83, 96, 100, 101, 103, 108, 109, 112, 149)

Salmonellen

Stäbchenförmige **Bakterien**, die mit schweren Durchfällen verbundene Krankheiten auslösen. Zu den Salmonellen zählen die Erreger von Typhus und Paratyphus sowie von zahlreichen infektiösen Lebensmittelvergiftungen. (136, 137–140)

Sarkomere

Kettenförmig aneinander gereihete Untereinheiten der **Myofibrillen**. (54, 55, 56)

Sinnesfelder, primäre

Areale der **Großhirnrinde** (**Rindenfelder**), die über **Nervenzellen** in direkter Verbindung mit **Sinnesorganen** stehen und von diesen Signale empfangen. (110)

Sinnesorgane

Organe, die dazu dienen, Informationen aus der Umwelt aufzunehmen. Sinnesorgane bestehen aus **Sinneszellen** sowie aus Hilfszellen oder Hilfsorganen, welche die Außenreize zu den Sinneszellen leiten, und sind mit Sinnesnerven verbunden. (25, 88, 92, 95, 96, 110, 126)

Sinneszellen, primäre

Zellen, die auf die Aufnahme von Sinnesreizen spezialisiert sind. Sinneszellen sind imstande, derartige Reize mittels so genannter **Rezeptoren** in elektrische Impulse umzuwandeln, die von **Nervenzellen** an das **zentrale Nervensystem** geleitet werden. (62, 88, 92, 94–96, 120)

Somiten

In einer Linie angeordnete Segmente, die sich während der **Embryonalentwicklung** aus dem **Mesoderm** bilden. Sie liefern das Zellmaterial, aus dem später unter anderem die Wirbelsäule und die Muskulatur des Rumpfes entstehen. (26)

Spinalnerven (Rückenmarksnerven)

Dem **Rückenmark** paarweise entspringende Nerven, die in jeweils einem bestimmten Körperabschnitt

Muskeln, Haut und innere Organe mit dem **zentralen Nervensystem** verbinden. Der Mensch besitzt 31 Paar Spinalnerven. (100)

Stäbchen

Helldunkel-empfindliche **Lichtrezeptoren** der **Netzhaut** im Auge. Sie begünstigen das Sehen auch noch bei schwachem Licht. (90, 91)

Stärke

Kohlenhydrat, das Pflanzen bei der Photosynthese erzeugen. Stärke wird von den Pflanzen als Reservestoff in Samen, Wurzeln oder Knollen gespeichert. (61, 65, 66, 69)

Synapse

Kontaktstelle zwischen zwei Neuronen – oder zwischen einem Neuron mit einer **Sinnes-, Muskel- oder Drüsenzelle**. Sie dient dazu, Signale von Zelle zu Zelle über den dazwischen liegenden Spalt zu übertragen. Dazu wird das elektrische Signal in ein chemisches umgewandelt: Vom eintreffenden Nervenimpuls ausgelöst, werden **Neurotransmitter** ausgeschüttet, die den Spalt durchqueren. Auf der anderen Seite wird das chemische in ein elektrisches Signal zurückverwandelt. (101, 103, 109, 113)

System, parasympathisches

Untersystem des **vegetativen Nervensystems**, Gegenspieler des **sympathischen Systems**. Das parasympathische System fördert Erhaltung und Regeneration der Körperenergien. Es verlangsamt etwa nach einer Alarmreaktion die Herzrhythmus, setzt den Blutdruck herab, beruhigt die Atmung, regt die Verdauungstätigkeit an und steigert die Durchblutung der Geschlechtsorgane. (101)

System, sympathisches

Untersystem des **vegetativen Nervensystems**, das den Körper in Alarmbereitschaft versetzt und bei Bedarf seine Leistung steigern kann. Es erhöht zum Beispiel die Herzrhythmus und mobilisiert Energiereserven. Gegenspieler des **parasympathischen Systems**. (101)

Systole

Phase der Herzrhythmus, bei der sich die Herzmuskulatur zusammenzieht und das Blut in die Lunge und den Körper pumpt. (77)

T-Helferzellen

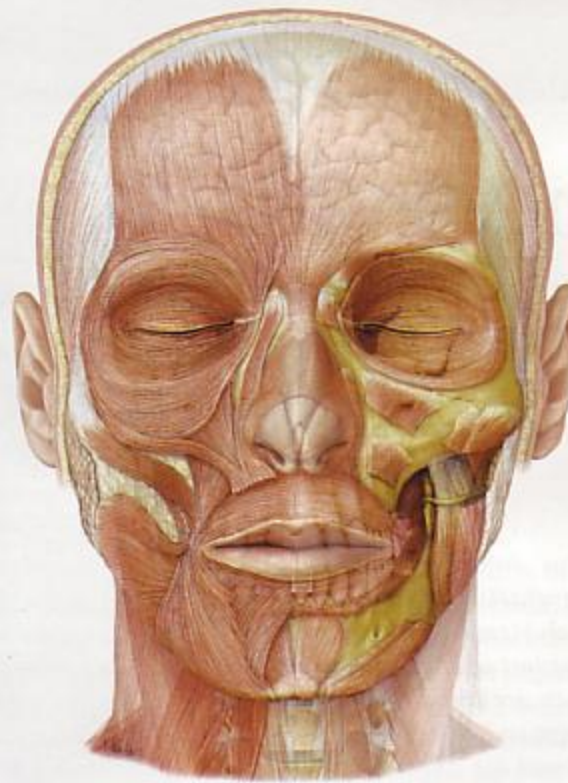
T-Lymphozyten, die auf verschiedene Weise die Abwehr fördern. Sie aktivieren etwa **Makrophagen** und **T-Killerzellen** und fördern die Vermehrung von **B-Lymphozyten** und deren Reifung zu **Antikörperproduzierenden Plasmazellen**. (140)

Thymus

Immunorgan, das besonders in der Jugend, während des Wachstums tätig ist. Im Thymus, der hinter dem Brustbein liegt, findet die Ausreifung und Differenzierung der für die **zelluläre Abwehr** bedeutsamen **T-Lymphozyten** statt. (73)

T-Killerzellen

T-Lymphozyten, die veränderte, etwa von Viren infizierte oder entartete



Die Gesichtsmuskeln prägen das Aussehen und drücken Gefühle aus – so etwa der Stirnmuskel und die Ringmuskeln um Augen und Mund sowie die Jochbeinmuskeln, die die Mundwinkel heben

Zellen durchlöchern und deren Zelltod auslösen können. (140)

T-Lymphozyten (T-Zellen)

Lymphozyten, die im Gegensatz zu **B-Lymphozyten** keine **Antikörper** produzieren, sondern im Rahmen der Immunabwehr andere Aufgaben haben. Unter ihnen gibt es **T-Killerzellen**, **T-Helferzellen**, **T-Regulatorzellen** und langlebige **T-Gedächtniszellen**, die bei erneutem Kontakt mit einem **Antigen** für eine sehr schnelle Immunantwort sorgen. (139, 140)

Transkriptionsfaktoren

Spezielle **Proteine**, die an der Transkription, dem ersten Schritt zur Umsetzung der Erbinformation, beteiligt sind. Bei der Transkription wird die Erbinformation eines **Gens** von der **DNS** auf eine **mRNA** übertragen, die dann als Vorlage zur Produktion von Proteinen dient. (39)

T-Regulatorzellen

T-Lymphozyten, die hemmend auf die Aktivität von **T-Helferzellen** und **T-Killerzellen** wirken und die Bildung von **B-Lymphozyten** drosseln. (140)

Trommelfell

Membran am inneren Ende des äußeren Gehörganges. Sie wird durch ankommende Schallwellen in Schwingungen versetzt und überträgt diese auf die drei Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel in der **Paukenhöhle**. (88, 92)

Trophoblast

Im frühen Entwicklungsstadium des Menschen (Blastozyste) die äußere Zellschicht, aus der sich Eihäute und **Plazenta** entwickeln: die **Organe** zum Schutz und zur Ernährung des **Embryos**. (24, 25)

Venen

Alle Blutgefäße, die Blut zum Herzen zurückführen. Das venöse Blut strömt durch anfangs kleine Gefäße, **Venolen**, die sich zu immer größeren Gefäßen vereinigen. (71, 77, 78, 79)

Verhaltensgedächtnis

Form des **Gedächtnisses**, das Bewegungsfolgen und Prozeduren des Verhaltens speichert. Es dient dazu, Verhaltensweisen zu automatisieren, und ermöglicht dem Körper, Tätigkeiten wie das Fahren eines Autos oder das Spielen eines Musikinstruments weitgehend unbewusst zu bewältigen. (113)

Vitamine

Chemisch sehr unterschiedliche, von Pflanzen und **Bakterien** hergestellte Stoffe, die von Menschen und Tieren nicht oder nur in unzureichender Menge aufgebaut werden können. Vitamine fungieren im Organismus größtenteils als Katalysatoren und wirken schon in geringen Mengen. (61, 65, 66, 71, 128)

Wasserhaushalt

Die Gesamtheit der Prozesse, bei denen Wasser vom Körper aufgenommen, verteilt und abgegeben wird und die den Wassergehalt eines Organismus bestimmen. Der menschliche Körper besteht zu ca. 60 Prozent aus Wasser. Wasser wird als Flüssigkeit und mit der festen Nahrung, die ebenfalls reichlich Wasser enthält, aufgenommen. Zudem entsteht Wasser beim Abbau der Nährstoffe mithilfe von Sauerstoff. Die Abgabe von Wasser erfolgt über die Nieren und den Darm, durch die Haut beim Schwitzen und durch die Lunge. (71)

Wissensgedächtnis

Form des **Gedächtnisses**, in dem Erlebtes und Erfahrenes, Daten und Fakten gespeichert werden: eigene Handlungen und die anderer Menschen, die Bedeutung von Objekten, von Sprache und Schriftzeichen. Seine Inhalte sind der bewussten Erinnerung zugänglich. Innerhalb des Wissensgedächtnisses wird ein Kurzzeit- von einem Langzeitgedächtnis abgegrenzt. (113)

Zapfen

Farbempfindliche **Lichtrezeptoren** der **Netzhaut**. Es gibt drei Zapfentypen zur Unterscheidung von Rot, Blau und Grün, deren Zusammenwirken das Farbsehen ermöglicht. (90, 91)

Zellkern

Größtes, meist kugeliges **Organell** der Zelle. Der Zellkern enthält fast das gesamte genetische Material eines Lebewesens und dient als Steuerzentrum der Zelle. (29, 31, 38, 39, 72, 73, 123)

Zellmembran

Hülle der Zellen, die das **Zellplasma** mit den **Organellen** umschließt. Als äußere Begrenzung vermittelt sie zwischen der einzelnen Zelle und ihrer Umwelt und erfüllt dabei vielfältige Funktionen, etwa beim Transport von Stoffen aus der Zelle heraus und in sie hinein. (30, 38, 39, 66, 72, 94, 137)

Zellplasma (Zytoplasma)

Der Inhalt einer Zelle ohne den **Zellkern**. Das Zytoplasma besteht aus dem wasserreichen Grundplasma mit zahlreichen Stoffen wie **Aminosäuren**, **Zucker**, **Fetten** und fettähnlichen Substanzen, Salzen, **Proteinen** und **Ribonukleinsäuren** sowie den im Zytoplasma eingebetteten **Organellen**. (38)

Zellulose

Kohlenhydrat, dessen Einzelmoleküle lange Ketten bilden. Als Hauptbestandteil der Zellwände von Pflanzen ist Zellulose der Menge nach der bedeutendste Naturstoff. Sie kann nur von wenigen Lebewesen, vor allem Mikroorganismen, abgebaut werden und ist auch für Menschen unverdaulich, gilt aber als erwünschter **Ballaststoff** in der Nahrung. (66)

Ziliarmuskel

Muskel, der im Auge Krümmungsänderungen der **Linse** bewirkt und diese dadurch auf Nah- oder Fernsicht einstellt. (90)

Zilien

Kurze, feine Zellfortsätze. Zilien werden vielfach auch als Haare bezeichnet, so die Flimmerhaare in vielen Teilen des Körpers oder die Riechhaare der **Riechzellen**. (94, 95)

Zucker

Meist süß schmeckende **Kohlenhydrate**. Trauben- und Fruchtzucker bestehen aus je einem ringförmigen Molekül, Milch- und Rohrzucker aus je zwei Molekülen. Zuckermoleküle können sich zu langen Ketten, so genannten Polysacchariden wie etwa **Stärke** oder **Zellulose**, verbinden. (25, 30, 31, 38, 39, 63, 65, 66, 121)

Evolution 2.0

Was vor einigen Jahren als Fiction galt, ist heute längst Science: der Einsatz von künstlichen Herzen, von Netzhaut-Chips und Hirn-Implantaten. Getrieben vom Wunsch nach Unsterblichkeit, erschafft sich der Mensch als Wesen, bei dem Körper und Technik verschmelzen

Text: Claus Peter Simon

So lange unser Körper klaglos „funktioniert“, registrieren wir ihn meist gar nicht. Doch dann und wann versagt ein System – ob Herz oder Kniegelenk – den Dienst, muss repariert oder gar ausgetauscht werden. Schlimmer noch, der Körper erinnert den Geist in solchen Momenten an die Endlichkeit des Daseins. Da die Hardware (Körper) und die Software (Bewusstsein) nicht getrennt voneinander funktionieren können, geht mit dem einen auch das andere zugrunde.

Der Glaube an die Unsterblichkeit hat bislang nur religiösen Menschen Trost gespendet. Doch seit der frühen Neuzeit und Francis Bacons Postulat „Wissen ist Macht“ (1620) träumen auch manche Wissenschaftsgläubige vom ewigen Leben. Zumindest aber sollen ihnen Forschung und Technik dazu dienen, das Unbehagen am Körper zu lindern und seine Unzulänglichkeiten vergessen zu machen. Folgerichtig wird der Körper seit einigen Jahrzehnten mittels Operationen „verschönert“ und technisch aufgerüstet. Am wohl weitesten ging dabei der australische Performance-Künstler Stelarc, der seinen Körper mit einem Exoskelett „erweiterte“, wie er es nennt. „Der Körper ist veraltet“, erklärte der Techno-Schamane und ließ sich und seine stählernen Gliedmaßen per Internet wie eine Marionette fernsteuern.

Heute ist vieles von dem, was vor einigen Jahren als Fiction galt, Science. Die Zahl der Schnittstellen zwischen Mensch und Technik wächst rapide. Die meisten dienen noch immer der Prothetik – dem Versuch, verloren gegangene Körperfunktionen zu ersetzen. Neben Menschen mit Arm- und Beinprothesen zählten Herzpatienten in den 1950er Jahren zu den Ersten, die eine Symbiose mit der Technik eingingen: Der Schrittmacher ersetzte wichtige Muskelzellen im Herzen. Später dann bekamen Gelähmte Stimulatoren für das Zwerchfell und Parkinson-Kranke Elektroden ins Zwischenhirn implantiert, um Zitteranfälle zu verhindern.

Die Kopplung von Implantaten an die Steuerzentrale Gehirn gilt als größter Triumph der Neuroforscher. Schon heute kann eine künstliche Netzhaut die Sehfähigkeit Erblindeter zumindest zum Teil wiederherstellen. Ein nur 0,1 Millimeter flacher Chip wird dafür – samt Photodioden und Elektroden – hinter die Netzhaut gepflanzt. Lichtinduzierte elektrische Impulse reizen die Nervenzellen der Netzhaut und werden vom Gehirn als Seheindrücke interpretiert. Weltweit schon mehr als 70 000 Menschen tragen eine Innenohrprothese für Taube, die in der Schädeldecke verankert ist. Und mussten Menschen

ihre Arm- und Beinprothesen bislang durch Bewegungen des Rumpfes in Gang setzen, so sollen sie künstliche Gliedmaßen künftig allein durch die Kraft der Gedanken steuern und sie entsprechend filigran bewegen können.

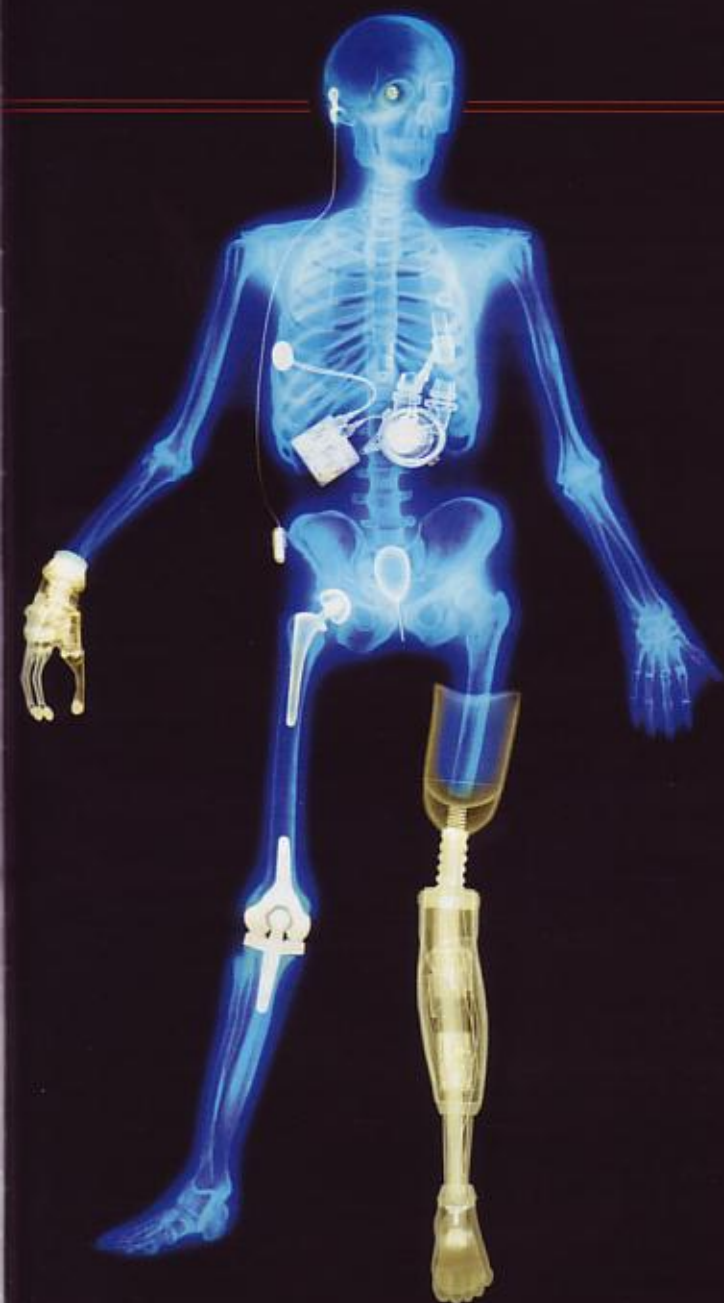
Heute und künftig geht es jedoch nicht nur um die Wiederherstellung von Körperfunktionen, sondern vor allem um die Erweiterung der menschlichen Fähigkeiten. „Die Evolution ist zu langsam für das 21. Jahrhundert“, verkündete der Brite Kevin Warwick, Professor für Cybernetics (Mensch-Maschine-Forschung): „Ohne technische Bauteile im Körper kann sich die Menschheit nicht weiterentwickeln.“ Warwick ließ sich einen Chip in den Unterarm einpflanzen – die Elektronik diente als Bewegungsmelder und aktivierte einen Computer, der die Bürotür öffnete und das Licht einschaltete.

Das US-Militär finanziert noch weiter gehende Experimente: Per Elektronik lassen sich Ratten nun wie Spielzeugautos steuern, ist ein Affe mittels Hirnelektroden in der Lage, allein mit der Kraft seiner Gedanken einen Roboterarm zu bewegen. Dahinter steht das Ziel, Soldaten mit Hirn-Chips komplizierte Waffensysteme bedienen zu lassen, etwa gedankengesteuert Kampfflugzeuge durch schwieriges Gelände zu fliegen.

Die US-Gesundheitsbehörde FDA genehmigte zudem kürzlich erste Versuche, bei denen Querschnittsgelähmten ein Chip ins Gehirn gepflanzt wird. Der Amerikaner Matthew Nagle lebt seit einiger Zeit als erster Mensch mit einem solchen Implantat. Der Chip „liest“ seine Gedanken und steuert per Mauszeiger Computer, Fernseher und Heizung. Rund 100 haarfeine Messfühler ragen dabei ins Zellgewebe der Hirnrinde und nehmen Signale der Neuronen aus dem Steuerzentrum für Arme und Beine auf.

Selbst ohne Verankerung im Gehirn ermöglicht die Miniaturisierung von Chips so erstaunliche wie befremdliche Dinge. Vor kurzem hat die US-Regierung einen implantierbaren Ausweis zugelassen, den reiskorngroßen VeriChip. Rund 900 Bürger haben sich das Bauteil einpflanzen lassen. Es dient als Personal-, Krankenkassen- und Notfallausweis. Künftig soll diese Technik auch bei kranken, nicht ansprechbaren Menschen eingesetzt werden, die dann per GPS geortet und deren Körperfunktionen überwacht werden können, wie etwa Blutdruck und Puls.

Ein Beach-Club in Barcelona bietet seinen Gästen bereits einen unter die Haut implantierbaren Chip als Eintrittsausweis an, das Geld für Drinks kann damit direkt vom Konto



Noch *Homo sapiens* oder schon Roboter?
Diese Illustration zeigt, welche Körperteile schon
heute technisch ersetzt werden können

abgebucht werden. In Mexiko nutzt sogar die Regierung eine solche Chip-Technik: Generalstaatsanwalt Rafael Macedo de la Concha und 160 Mitarbeiter des Justizministeriums ließen sich Miniatursender implantieren, um sicherzustellen, dass nur sie Zugang zu einer neuen Kriminaldatenbank haben.

Noch weit über solch konkrete Anwendungen hinaus denken die „Transhumanisten“, die sich vor allem aus der kalifornischen Informationselite rekrutieren. Als grenzenlose Fortschritts-optimisten halten Transhumanisten den Menschen für eine Gattung, die entwicklungsgeschichtlich abgewirtschaftet hat. Biotechnik, Nanotechnik und künstliche Intelligenz werden – so ihr Credo – *Homo sapiens* so weit verändern, dass eine ganz neue Spezies entsteht: die Posthumanen. Die Verknüpfung des Gehirns mit Computern soll die Intelligenz exponentiell steigern, schließlich das gesamte Bewusstsein außerhalb des Körpers gespeichert werden. Die Software hätte sich von der Hardware gelöst – das Tor zur Unsterblichkeit stünde offen.

Für den US-Kognitionswissenschaftler Andy Clark ist es indes längst nicht mehr die Frage, wann sich der Mensch zu einem Cyborg wandelt, einem Mischwesen aus biologischem Organismus und Maschine. Bereits heute, so Clark, seien wir Kreaturen, bei denen Körper und Technik verschmelzen. Unser Cyborg-Dasein sei jedoch nicht an Implantate und Strippen gebunden. Schon seit der Entwicklung der Sprache vor Jahrzehntausenden erweitere der Mensch seinen Geist – und zwar mithilfe simpler Bleistifte, Papier, Uhren oder des Internet.

Wer heute etwa einen Airbus fliege, könne das nur in einem von der Technik definierten Rahmen: Pilot und Flugzeug gingen insofern eine temporäre Cyborg-Existenz ein. Und das Mobiltelefon sei längst eine Art zusätzliches Organ, das es einem Menschen ermögliche, an zwei Orten gleichzeitig präsent zu sein – und damit den Geist ein Stück weit aus dem Körper befreie.

Für Andy Clark ist der Mensch zu einem „natural born cyborg“ geworden, für den die biologische Innen- und die anorganische Außenwelt mehr und mehr miteinander verschmelzen. Seine Thesen will Clark aber nicht als menschenfeindlichen Posthumanismus verstanden wissen. Denn wer begreife, dass es zutiefst menschlich ist, sich die Materie untertan zu machen, der brauche keine Angst vor Maschinen-Menschen zu haben.

Insofern wäre der Cyborg letztlich die gelungene Versöhnung von Natur und Kultur. □

Claus Peter Simon, 43, ist Geschäftsführender Redakteur der GEO-Wissen-Reihe.

Die Technik, die unser Leben bestimmt

Bits flitzen durch Rechner, elektrische Spannungen rasen durch Kupferdrähte, Zylinder stampfen in Motoren, Gase entladen sich in Lampen. Wie genau funktioniert eigentlich die Welt der Geräte und Maschinen?

Man drückt auf den Schalter, und das Licht geht an. Wer fragt sich, warum? Man rast über Autobahnen und reist durch die Luft. Wen wundert das noch? Bilder jagen ins Weltall und von da auf den Fernsehschirm. Wer überlegt sich, wieso?

Spiegelgiganten bündeln Sonnenstrahlen, damit daraus Strom wird. Computertomographen zeigen das schlagende Herz. Teppiche lösen Alarm aus, wenn Einbrecher darauftreten. Bagger fördern Tag für Tag Hunderttausende von Tonnen Erdreich. Nanomaschinen bewegen Propeller, die kaum größer

sind als ein Virus. Computerfestplatten verlieren Daten nicht einmal dann, wenn sie monatelang auf dem Meeresgrund liegen. Züge passieren Tunnels trotz der gewaltigen Druckwellen bei Tempo 300.

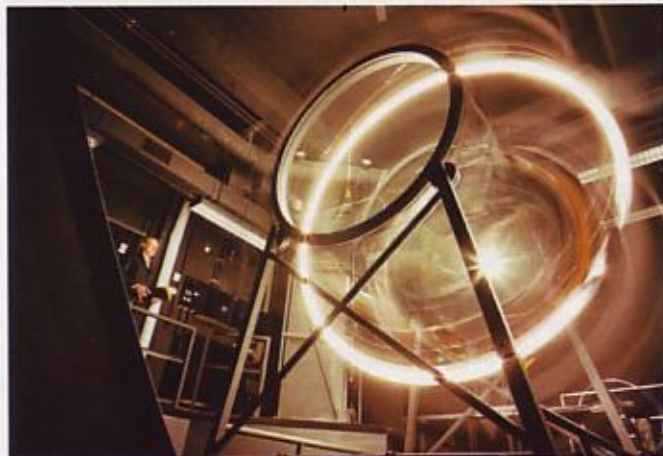
Wie ist das möglich, was steckt dahinter? Die nächste Ausgabe von GEOkompakt taucht ein in den komplexen Kosmos der Technik, in eine Welt voll fabelhafter Erfindungen und Leistungen. Die Redaktion durchleuchtet das Innenleben erstaunlicher Apparate und beschreibt, was ihre Faszination ausmacht, wie sie unser Leben erleichtern – und es beherrschen.



Roboter sind in Automobilfabriken längst allgegenwärtig



Per Container werden heute die meisten Güter transportiert



Lichtmessungen helfen bei der Optimierung von Glühlampen



Kernfusion soll irgendwann alle Energieprobleme lösen



Bereits erschienen:
Die Geburt der Erde

Die folgenden Ausgaben:

Die Evolution des Menschen: Vom Affen zum *Homo sapiens*
(erscheint am 14. September 2005)

Wie die Natur funktioniert: Die Welt der Tiere und Pflanzen
(erscheint am 7. Dezember 2005)