



2011
highlights der **physik**

Röntgen & Co.

Wissenschaftsmagazin

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium
für Bildung und Forschung
Deutsche Physikalische
Gesellschaft e. V. (DPG)

AUTOR

Roland Wengenmayr

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

INFORMATIONEN ZUM INHALT

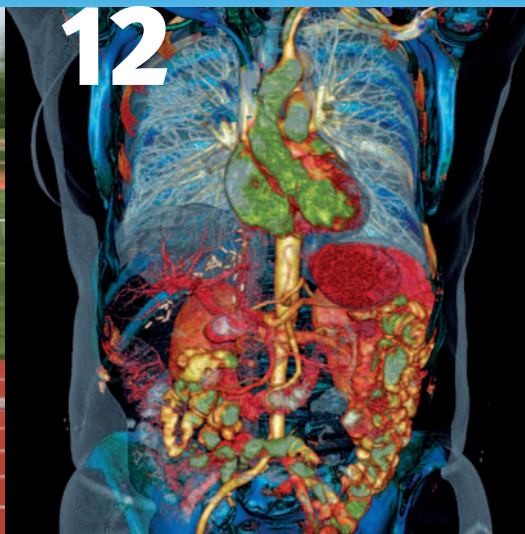
Medienbüro „Highlights der Physik“
c/o Iserundschmidt GmbH
Bonner Talweg 8
53113 Bonn
Tel. (0228) 55 525 - 18
Fax (0228) 55 525 - 19
ius.pr@dpg-physik.de

KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG Iserundschmidt

Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bonn – Berlin
(Verantwortlich: Timo Meyer,
Marleen Schwalm, Jana Koliotassis)

September 2011

Röntgen & Co.



INHALT

- 4 Analyse
 Physik des Menschen
- 12 Diagnose
 Physik am Menschen
- 22 Therapie
 Physik für Menschen



4

Analyse Physik des Menschen

Physik hat doch nichts mit dem Körper zu tun! Oder vielleicht doch? Immerhin sehen wir dank des Lichts, hören dank des Schalls. Tatsächlich nehmen drei der klassischen fünf Sinne die Umwelt über physikalische Prozesse wahr: Sehen, Hören und Tasten. Nerven leiten diese Informationen als elektrische Signale ins Gehirn. Und der Körper hat zudem viele Eigenschaften einer echten Maschine, wie das Zusammenspiel von Muskeln und Skelett beweist.

Unser Körper nutzt überraschend viel Physik, um erfolgreich durchs Leben zu kommen. Das fängt mit unseren Sinnesorganen an – also Sinneszellen des Tastsinns, Ohr und Auge. Antike Gelehrte glaubten, dass das Auge wie ein Radar die Umgebung mit Sehstrahlen abscannt. Heute wissen wir, dass es umgekehrt funktioniert: Wie eine Kamera sammelt unser Sehorgan Licht ein und versorgt das Gehirn mit Bildinformation. Die Hornhaut über der Pupille und die dahinter liegende bewegliche Linse bilden gemeinsam das Objektiv. Sie brechen das Licht und fokussieren es in das Auge hinein.

Wie ein Kameraobjektiv besitzt auch das Auge eine Blende. Die Iris schließt oder öffnet die Pupille und steuert so, wie viel Licht durch sie ins Augeninnere gelangt. So passt sie das Sehvermögen an die Lichtverhältnisse an. Mit dieser Optik entsteht – im gesunden Auge – auf der Netzhaut im Augenhintergrund ein scharf fokussiertes Bild. Diese kann man sich dabei wie den Sensor einer Digitalkamera vorstellen. Ihre „Pixel“ sind die etwa sechs Millionen Tagrezeptoren (Zapfen) zum Farbsehen plus rund 100 Millionen Nachtrezeptoren (Stäbchen) für das Schwarzweißsehen.

Die Rezeptoren sind trickreich miteinander verschaltet und bilden so gemeinsam einen biologischen Bildrechner. Er fasst die Bildinformation aus über hundert Millionen Rezeptoren zusammen, um sie über den Sehnerv ins Gehirn zu schicken. Vor allem aber verarbeitet er die Bildinformation vor. Damit unterstützt er das Gehirn, das permanent eine Vielzahl von Objekten erkennen und einordnen muss. Letztlich funktioniert das Sehen also doch ganz anders als die Bildverarbeitung einer digitalen Kamera.

Unsere Sinne aber nutzen nicht nur Licht, also elektromagnetische Wellen, sondern auch Schallwellen als Informationsträger. Diese wandern als Dichteschwankungen durch Luft und Flüssigkeiten; durch feste Körper auch als Scherwellen. Der Empfänger sind unsere Ohren. Diese sind für akustische Signale zwischen 16 und 20.000 Luftschwingungen pro Sekunde (Hertz) empfänglich. Noch tiefere Töne

◀ Der menschliche Körper in Aktion. Mit an Bord sind jede Menge physikalische Prozesse. (Bild: Mark Sadowski/Wikipedia/cc-by-sa)

► Der Mensch nimmt über seine Sinne nur einen kleinen Teil der Realität wahr – das zeigt ein Blick ins Tierreich. Um zu überleben, haben viele Lebewesen nicht nur „herkömmliche“ Sinne extrem geschärft, sondern auch ganz neue Wahrnehmungsfelder erschlossen. (Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis)



- 1 **Turmfalke:** Erkennt ultraviolettes Licht und damit die im UV-Bereich leuchtenden Urin- und Kotsuren seiner Beutetiere selbst aus großer Höhe.
- 2 **Grubenotter:** Kann auch infrarote Strahlung wahrnehmen, dabei Wellenlängendifferenzen von nur 10 Nanometern unterscheiden und deshalb Temperaturunterschiede von nur 0,003 °C registrieren.
- 3 **Hai:** Nimmt elektrische Felder wahr und kann elektrische Spannungen von nur fünf Milliardstel Volt erkennen.
- 4 **Riesenkalmar:** Findet dank seiner 40 cm großen Augen Beutetiere auch noch im extrem schwachen Licht der Tiefsee.
- 5 **Fledermaus:** Stößt Ultraschall aus und erkennt aus dem Echo kleinste Hindernisse von bis zu 0,1 mm Durchmesser.
- 6 **Seehund:** Kann mit seinen Barthaaren bis zu ein tausendstel Millimeter messende Bewegungen im Wasser ertasten.
- 7 **Stubenfliege:** Nimmt mit ihren Facettenaugen bis zu 200 Bilder pro Sekunde wahr und kann so selbst schnellste Bewegungen erkennen.
- 8 **Gartengrasmücke:** „Sieht“ das Magnetfeld der Erde und findet mit diesem eingebauten Kompass immer den Weg zwischen Sommer- und Winterquartier.

5

von nur wenigen Hertz, den sogenannten Infraschall, können Elefanten „hören“ – wir Menschen nehmen ihn höchstens als Kribbeln im Bauch wahr. Den Ultraschall mit Frequenzen oberhalb von 20.000 Hertz wiederum nutzen die Fledermäuse. Nicht der einzige Sinn übrigens, bei dem Tiere uns überlegen sind.

Wie das Auge, so besteht auch das Ohr aus einer Reihe von „Bauteilen“, die unterschiedliche Aufgaben übernehmen. Die Ohrmuschel dient nicht nur als Trichter, um Schallwellen zu empfangen. Durch ihre spezielle, gefaltete Reliefform prägt sie den ankommenden Schallwellen ein Klangmuster auf, das von der Schallrichtung abhängt, aus der sie eintreffen. Damit kann das Gehirn unterscheiden, ob die Schallquelle vorne, hinten, oben oder unten liegt. Für die Richtungsinformation wertet das Gehirn beim Stereohören den Zeitunterschied aus, mit dem ein Signal am linken und am rechten Ohr ankommt.

Im Außenohr wandert der Schall durch den Gehörgang und trifft auf das Trommelfell als Tor zum Mittelohr. Diese Membrane schwingt mit den Schallwellen. Eine ausgeklügelte Feinmechanik aus den kleinsten Knochen des Körpers, den Gehörknöchelchen, überträgt die Schwingungen auf eine zweite Membrane: Sie bildet den Eingang zum flüssigkeitsgefüllten Innenohr. Dieses wandelt den Schall in elektrische Nervensignale um, die das Gehirn verarbeiten kann. Das Innenohr besteht aus drei Gängen, die in sich aufgerollt sind. Deshalb nennt man es auch Cochlea, was lateinisch Schnecke heißt.

In einem der Gänge steckt das eigentliche Sinnesorgan: die Basilarmembrane mit ihren rund 25.000 Hörsinneszellen. Wenn Schall über sie wandert, lässt er die haarförmigen Hörsinneszellen vibrieren. Dabei schwingen diese Zellen und die ganze Basilarmembrane aktiv mit und verstärken den Schall. Welche Frequenz ver-

stärkt wird, hängt vom Ort auf der Basilarmembrane ab. Vorne am ovalen Fenster reagiert sie auf hohe Töne, zum Schneckenende hin werden die gehörten Töne immer tiefer.

Physik mit Herz

Das Herz galt früher als Sitz der Seele. Heute wissen wir, dass es „nur“ eine Pumpe ist – aber was für eine! Kein Automotor läuft wartungsfrei bis zu hundert Jahre lang und kann dabei sogar noch seinen Hubraum der sportlichen Herausforderung anpassen. Das allerdings hat seinen Preis: Schon beim Ruhen frisst das Herz etwa zehn Prozent des gesamten Energieumsatzes im Körper, obwohl es nur 0,5 Prozent des Körpergewichts ausmacht.

Den Herzschlag hören wir, weil er im Blut turbulente Strömungen verursacht, die voller Wirbel sind. Diese Wirbel entstehen

INFO

Die künstliche Fingerkuppe

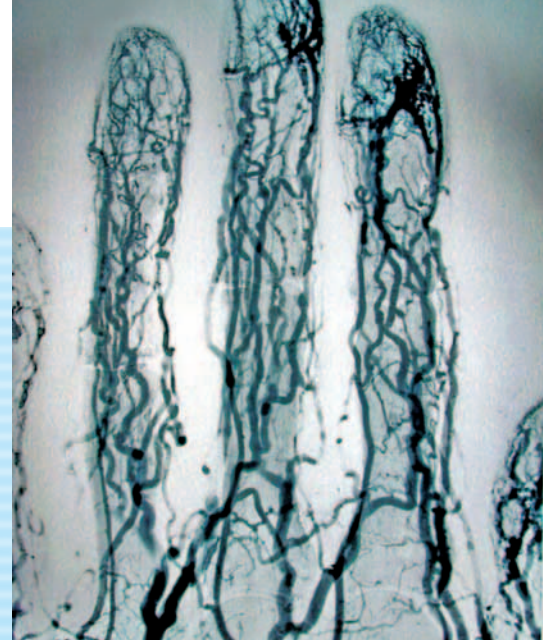
Auch der Tastsinn nutzt die Physik. In den Fingerkuppen sammeln sich besonders viele Sinneszellen. Sie wandeln permanent mechanische Reize in Nervensignale. Um zu erforschen, wie unser Tastsinn funktioniert, bauten französische Forscher daher eine künstliche Fingerkuppe, die aus einem mit einer Gummihaut überzogenen Drucksensor bestand. Dabei interessierte sie besonders, welche Rolle die kleinen Erhebungen und Hautleisten des Fingers spielen, die den Fingerabdruck bilden.

Das Tasten simulierten die Forscher, indem sie die Fingerkuppe über eine angeraute Glasfläche streichen ließen. Dabei stellten sie fest, dass eine glatte Gummihaut anders schwingt als eine, die mit künstlichen Rillen versehen war. Die glatte Gummihaut vibrierte nur bei einer bestimmten Frequenz, entsprechend informationsarm war das Signal des Drucksensors. Die gerillte Version dagegen geriet in schnellere Schwingungen, die sich mit der Beschaffenheit der Oberfläche änderten. Damit lieferte der Sensor eine viel präzisere Information. Besonders gut funktionierte das, wenn die Hautrillen senkrecht zu Kerben im Glas orientiert waren. Das erklärt die Wirbelstruktur der Papillarleisten auf unseren Fingern, denn so ist immer ein Teil der Leisten optimal orientiert.

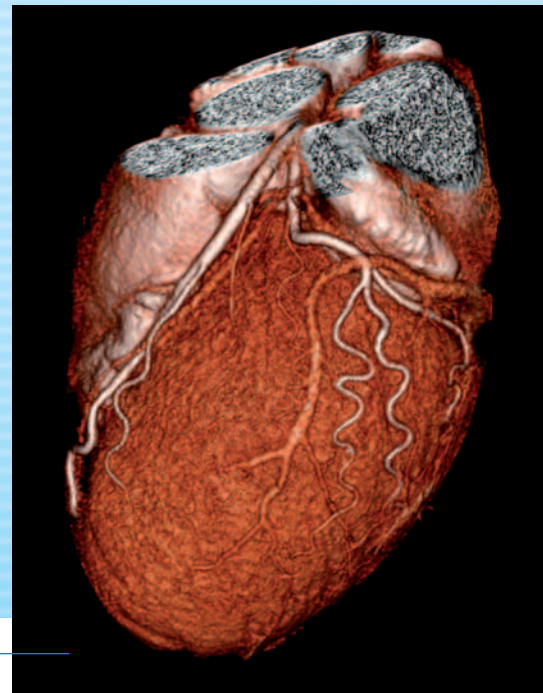
Beim Erfühlen von Oberflächen gleiten unsere Finger mit einer Geschwindigkeit von zehn bis fünfzehn Zentimetern pro Sekunde. Das lässt die Hautstege, mit 200 bis 300 Hertz schwingen. Für diese Frequenzen sind die Vater-Pacini-Rezeptoren, die Tastsinneszellen in der Unterhaut, besonders empfänglich. Übrigens nutzen alle Primaten den Fingerabdruck als Tastsensor, also auch Affen und Halbaffen.

(Bild oben: © Bram Cymet)

➤ Diese Großaufnahme zeigt die Adern in den drei mittleren Fingern einer Hand. Von den Fingerspitzen bis in die Zehen reicht das Netzwerk unseres Blutkreislaufs, durch den das Herz unter Hochdruck das Blut und damit Sauerstoff und Nährstoffe in jede Ecke unseres Körpers transportiert. (Bild: Dr. Michel Royon/Wikipedia/cc-by-sa)



➤ Computertomographie-Aufnahme des Herzens. Eigentlich besteht das Organ aus zwei Hälften: Die rechte Herzkammer schickt das aus dem Körper ankommende, sauerstoffarme Blut in das Niederdrucksystem der Lunge. Die linke Herzkammer pumpt das frisch mit Sauerstoff angereicherte Blut aus der Lunge in das Hochdrucksystem des Körpers. (Bild: Toshiba Medical Systems)



im Herz schlagartig mit einem doppelten Geräusch. Der lautere Herzton markiert den Moment, in dem das Herz das Blut aus seinen Kammern in die Schlagadern presst. Den zweiten, leiseren Ton produzieren die Herzklappen beim Schließen.

Technisch gesehen ist [das Herz](#) eine Saug- und Druckpumpe. Pro Minute pumpt es das gesamte Blutvolumen einmal durch den Körper, also fünf bis sechs Liter. Bei Höchstleistung ist es das Fünffache. Mit seinen vier Kammern muss es pro Schlag jeweils die gleiche Menge an Blut durch zwei Kreisläufe pumpen. Zwischen beiden besteht aber ein erheblicher Druckunterschied. Während der Lungenkreislauf an den Atmosphärendruck angepasst ist, liegt der Druck im Körperkreislauf sieben Mal höher. Nur so kann das Herz das Blut auch durch feinste Äderchen pressen.

Taktgeber des Herzschlags ist der Sinusknoten. Sein elektrisches Signal löst das

Zusammenziehen der Herzmuskeln aus. Interessanterweise hat das Signal beim gesunden Herz einen gewissen „Chaosanteil“. Ist das Signal dagegen zu regelmäßig, kann dies auf eine Herzkrankheit hindeuten.

Auch die Lunge sitzt in einer großen Pumpe, gebildet aus Rippen- und Zwerchfellmuskulatur. Sie muss die eingeatmete Luft möglichst effizient mit dem Blut des Lungenkreislaufs in Kontakt bringen. Nur so kann das Blut ausreichend Sauerstoff aufnehmen. Dafür sorgen die Lungenbläschen, zu denen die [verzweigten Bronchien](#) die Luft hinführen. Diese sogenannten Alveolen formen eine Membran zwischen dem Gas und der Flüssigkeit.

Die Größe eines Bläschens variiert zwischen etwa 250 Mikrometern (Millionstel Meter) beim Einatmen und 50 Mikrometern beim Ausatmen. Damit ist es ungefähr so groß wie ein feines Mehlkorn. Könnte man

► Täglich atmet ein Mensch etwa 360 Liter CO_2 aus. Hochgerechnet auf ein Jahr und alle 6,9 Milliarden Erdbewohner ergibt das mehr als 1,7 Milliarden Tonnen CO_2 pro Jahr – etwa das Doppelte der jährlichen CO_2 -Gesamtemission Deutschlands. (Bild: © Ernst Vikne)

▼ Diese Aufnahme der gesunden Lunge der Leistungsschwimmerin Hannah Stockbauer zeigt deutlich die feinen Verästelungen des Bronchialsystems. (Bild: Siemens-Pressbild)



▼ Luigi Galvani (1737-1798) selbst interpretierte die zuckenden Froschschenkel falsch: Er glaubte, damit „tierische Elektrizität“ nachgewiesen zu haben. Die Elektrizität kam allerdings aus der von Galvani ungewollt gebastelten Batterie, und die Nerven und Muskeln in den Froschschenkeln wirkten als Messgerät – nicht umgekehrt als Erzeuger der elektrischen Energie.



die Oberfläche der schätzungsweise 300 Millionen Lungenbläschen komplett entfalten, dann erhielte man eine Fläche von 80 bis 120 Quadratmetern.

Die Membrane der winzigen Lungenbläschen ist stellenweise nur etwa 100 Nanometer (Milliardstel Meter) dünn. Dort können die Sauerstoffmoleküle besonders schnell ins Blut gelangen und umgekehrt die Kohlendioxidmoleküle in die Luft. Entscheidend für die Richtung der Wanderschaft der jeweiligen Gasmoleküle ist das Konzentrationsgefälle zwischen Blut und Luft. In der Physik heißt dieser Mechanismus Diffusion.

Trotz der riesigen Membranfläche kann der Körper aus der eingeatmeten Luft nur fünf Prozent Sauerstoff nutzen, obwohl dieser ganze 21 Prozent der Atemluft stellt. Effizienter ist der [Austausch des Kohlendioxids](#): Von nur 0,04 Prozent in der eingeatmeten Luft steigt er auf beachtliche vier Prozent

beim Ausatmen. In Ruhe atmen wir pro Minute etwa sieben Liter Luft ein, bei Höchstleistungen bis zu 200 Liter. Pro Tag passieren auf diese Weise bis zu 15.000 Liter Luft unsere Lungen, was dem Volumen eines kleinen Swimmingpools entspricht.

Physik des Fühlens und Denkens

Im November 1780 beugte sich der Bologneser Anatomieprofessor Luigi Galvani über ein Experiment: Er hatte frische Froschschenkel auf dem Tisch, allerdings nicht als Mittagessen. Er versah die Schenkel mit Haken aus Kupfer und drückte diese auf eine Eisenplatte. Die verschiedenen Metalle bildeten im Kontakt mit der salzhaltigen Körperflüssigkeit eine Batterie, und deren elektrischer Strom ließ die Schenkel zucken. So entdeckte [der Urvater der Biophysik](#), dass Nerven auf elektrische Reize reagieren.

Tatsächlich kann man sich Nerven als Leitungen in unserem Körper vorstellen, die elektrische Signale transportieren. Sie verbinden die Sinneszellen mit dem Gehirn, steuern Organe, Drüsen, Muskeln. Und sie bringen unser Denken hervor, unsere Lernfähigkeit und unser Gedächtnis. Beim Lesen dieser Zeilen ändern Nerven im Gehirn ihre Verknüpfungen, so dass unser Denkorgan die durch die Worte transportierten Informationen verarbeiten kann.

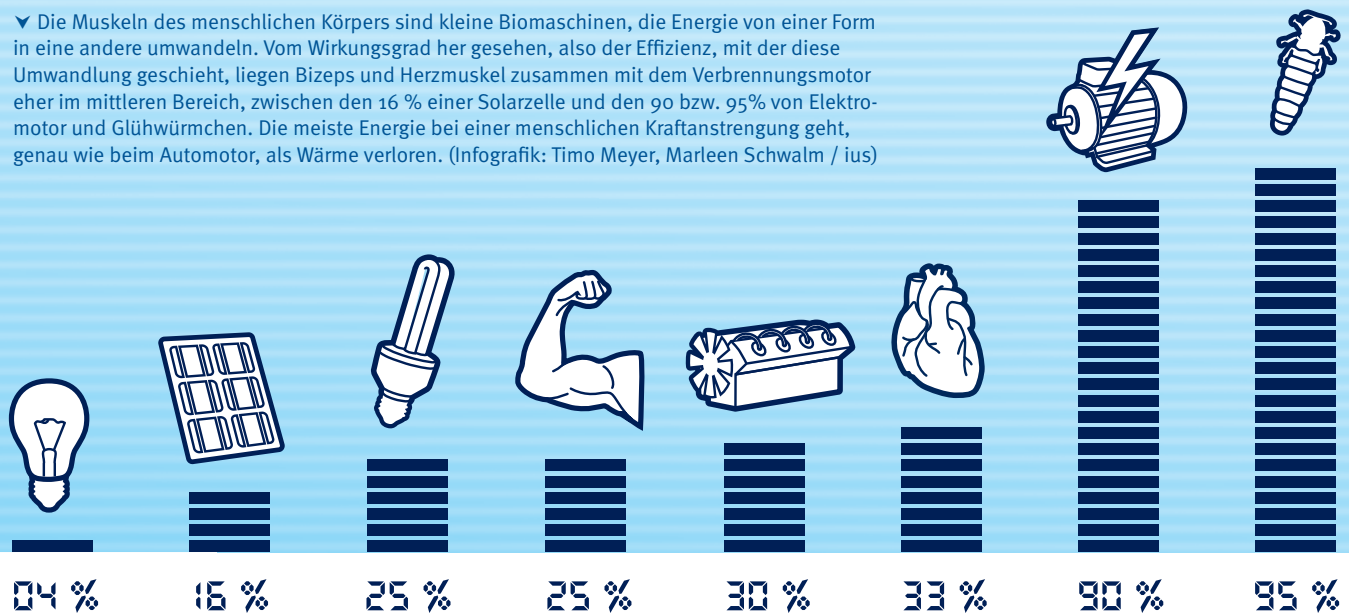
Nervenzellen – Neuronen – verhalten sich also viel komplexer als Kabel und Stecker. In unserem Körper gibt es Neuronen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Einige von ihnen sind mit unglaublich vielen anderen Nervenzellen vernetzt. Sie erbringen Rechenleistungen, die Computentwickler vor Neid erblassen lassen. Andere Neuronen erinnern tatsächlich in ihrer Funktion eher an Leitungen. Manche Nerven sind richtig fix: Sie könnten in einer Sekunde einen Reiz 100 Meter weit



◀ Auch bei Menschen mit einem schlechten Reaktionsvermögen können Nervenimpulse blitzschnell sein – bis zu 360 km/h, so schnell wie ein Formel-1-Rennwagen.
(Bild: © Nils van der Burg)

▼ Die Muskeln des menschlichen Körpers sind kleine Biomachines, die Energie von einer Form in eine andere umwandeln. Vom Wirkungsgrad her gesehen, also der Effizienz, mit der diese Umwandlung geschieht, liegen Bizeps und Herzmuskel zusammen mit dem Verbrennungsmotor eher im mittleren Bereich, zwischen den 16 % einer Solarzelle und den 90 bzw. 95% von Elektromotor und Glühwürmchen. Die meiste Energie bei einer menschlichen Kraftanstrengung geht, genau wie beim Automotor, als Wärme verloren. (Infografik: Timo Meyer, Marleen Schwalm / ius)

8



schicken – sofern der Körper groß genug wäre. Solche Nerven steuern vor allem die Skelettmuskulatur und ermöglichen **schnelle Reflexe**. Gemächlicher geht es in der Verdauung zu: Zum Brötchenzerlegen genügt eine Nervenleitungsgeschwindigkeit von 1,5 Metern pro Sekunde.

Nervenzellen haben einen Zellkörper und viele Fortsätze, die Dendriten. Diese bilden sozusagen die Kontaktstecker zu anderen Neuronen. Ein Fortsatz ist besonders lang: Das Axon kann als „Fernkabel“ Signale über größere Strecken durch den Körper leiten. An seinem Ende hat es wieder über Dendriten Kontakt zu anderen Zellen.

Die Häute der Nervenzellen, ihre Membranen, haben besondere elektrische Eigenschaften. Im Ruhezustand sind sie auf ihrer Innenseite elektrisch schwach negativ geladen, auf der Außenseite positiv. Bei Aktivierung polen die Membranen sich um.

Dazu öffnen sie winzige Kanäle, durch die ein elektrischer Strom aus positiv geladenen Kalium- oder Natriumatomen (Ionen) fließt. Die elektrische Erregung wandert das Axon entlang und erreicht an dessen Ende benachbarte Nervenzellen.

Die „Stecker“ zu anderen Nervenzellen heißen Synapsen. Es gibt elektrische Synapsen, über die ein elektrischer Ionenstrom fließen kann. Sie leiten das Signal besonders schnell weiter. Entdeckt wurden sie in Fischen, dort sorgen sie für den Schwanzschlag des Fluchtreflexes. Im menschlichen Körper sorgen sie zum Beispiel für die Kontraktion des Herzens.

Wesentlich komplexer sind chemische Synapsen. Sie wandeln die aus dem Axon eintreffende elektrische Erregung in ein chemisches Signal um. Dabei verlässt ein Botenstoffmolekül die Seite des Axons und wandert durch den etwa 20 Mikrom

eter (Millionstel Meter) breiten synaptischen Spalt. Auf der Seite der Nachbarzelle dockt es an den zugehörigen chemischen Rezeptor an – wie ein Schlüssel, der ein passendes Schloss findet. Ist er drin, dann öffnet die Membran der Nachbarzelle ihre Ionenkanäle. Das erzeugt wieder ein elektrisches Signal, das diese Zelle erregen kann. Es gibt allerdings auch Synapsen, die Nachbarzellen bei einem Signal hemmen – also sozusagen ruhig stellen.

Diese chemische Zwischenstufe hat allerdings ihren Preis. Sie verlangsamt den Signaltransport. Anders als bei den elektrischen Synapsen funktioniert er auch nur in eine Richtung. Dafür ist die chemische Synapse weit mehr als ein schlichter Stecker: Sie ist ein kleiner Biocomputer, den eine Vielzahl chemischer Botenstoffe steuert. Dazu gehören die sogenannten Neurotransmitter als Signalvermittler, zum

► Im Rahmen des Berliner Projekts AutoNOMOS steuern Forscher einen ansonsten autonom fahrenden umgerüsteten Passat über eine EEG-Kappe per Gedankenkraft. Das Fahrzeug sorgt für die Sicherheit und das eigentliche Fahren, der Mensch entscheidet, welche Ausfahrt genommen und in welche Richtung an einer Kreuzung abgebogen werden soll. (Bild: AutoNOMOS)

▼ Dreidimensionale Darstellung der großen Nervenfaserbündel im Gehirn. Die Fasern sind hier nach ihrem Verlauf farbcodiert: rot = links-rechts, grün = vorn-hinten, blau = durch den Hirnstamm. (Bild: Courtesy of the Laboratory of Neuro Imaging at UCLA and Martinos Center for Biomedical Imaging at Harvard, Consortium of the Human Connectome Project)



Beispiel Glutamat, aber auch Hormone. Viele Pharmaka beeinflussen gezielt die Signalübertragung der chemischen Synapsen, zum Beispiel Antidepressiva oder Drogen.

Im Gehirn sind vermutlich 90 bis 100 Milliarden Nervenzellen (manche Schätzungen gehen sogar bis 1 Billion) extrem miteinander vernetzt. Das gilt besonders für etwa 10 Milliarden spezielle Nervenzellen: Diese sogenannten Pyramidenzellen sind mit gut 100.000 Nachbarzellen dieses Typs verschaltet. Das ergibt insgesamt eine Billion synaptischer Verbindungen! Je nach Schätzung kann das Gehirn damit 10 Billionen bis 10 Billarden Rechenoperationen pro Sekunde durchführen. Damit halten nur die besten Supercomputer mit – brauchen dafür aber auch einige Megawatt an Strom, also die Leistung kleiner Kraftwerke. Das Gehirn kommt dagegen mit 20 Watt aus – wie eine kleine Glühbirne.

Im Unterschied zu unseren Computern erreicht das Gehirn seine Leistung nicht nur durch die massive Vernetzung seiner Nervenzellen. Die Neuronen bauen ihre Verknüpfungen zu Nachbarzellen permanent auf oder ab, verstärken oder schwächen sie. Hardware und Software sind im Gehirn eins. Noch dazu verändert sich die Hardware unseres Denkkorgans in jeder Sekunde – ein genialer Trick, den unsere Computer nicht beherrschen.

Physik der Bewegung

Gerade das Zusammenspiel der Muskeln als Motoren mit den Knochen als Hebel erinnert an eine Maschine. Aber was kann sie leisten? Um das zu beantworten, schaut die Forschung sogar in den Himmel. Berühmt geworden sind die zeitlupenartig hüpfenden Astronauten auf dem Mond, dessen Schwerkraft sechs Mal geringer



INFO

Denken steuert Autos

Sich wie elektrisiert fühlen – wenn wir unser Hirn benutzen, ist das mehr als eine Redewendung. Denken elektrisiert nämlich tatsächlich. Die geballte Masse an Nerven im Gehirn produziert elektrische Signale, die man auf der Kopfhaut als Ströme messen kann. Darauf basiert das Elektroenzephalogramm (EEG) in der Medizin. Seit einigen Jahren nutzen manche Forscher EEG-Sensoren aber nicht nur für Untersuchungen, sondern auch, um per Gedankenkraft Computern Befehle zu geben.

Der neueste Coup geht sogar noch weiter. Berliner Forscher haben ein Auto umgebaut, das sich durch Denken steuern lässt. Fahrer bekommen dazu eine EEG-Kappe auf den Kopf. Sie registriert die verschiedenen Muster der Hirnwellen, ein Computer interpretiert diese und lenkt danach das Auto.

Allerdings ist zuvor ein Fahrtraining am Schreibtisch nötig. Auf einem Computermonitor des Berliner Instituts übt man, einen Würfel durch gedachte Kommandos wie „rechts“, „beschleunigen“ oder „bremsen“ zu steuern. Erst wenn man dies beherrscht, darf man ins umgerüstete Auto.

Vorausschauendes Fahren ist dabei oberstes Gebot: Ans Abbiegen beispielsweise muss man schon gut fünf Sekunden vorher denken. Erst dann hat der Bordcomputer verstanden, was man will. Auch eine Unterhaltung mit Mitfahrern ist aufgrund der Ablenkungsgefahr heikel. So wird dieses faszinierende Gedanken-Experiment wohl vorerst nicht auf öffentliche Straßen gelangen.



INFO

Volle Kraft am Klavier

Professionelle Musiker klagen oft über Handbeschwerden. Konstanzer Sportwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler wollten daher genauer wissen, welche Fingerkraft Klavierspielen erfordert. Sie baten 18 angehende Pianistinnen und Pianisten ins Labor. Dort versahen sie Finger und Hände mit Kraftsensoren. Außerdem vermaßen sie die komplette Körperhaltung beim Spielen mit Infrarotlicht und zeichneten den Pulsschlag auf.

Die Messungen zeigten: Klassische Klaviermusik ist Leistungssport! Bei anspruchsvollen Stücken, etwa von Franz Liszt, schnellte der Puls auf 170 Schläge pro Minute hoch. Schon beim kraftvollen Pianoforte muss ein Finger mit bis zu 200 Newton auf die Taste schlagen, bei sehr lauten Tönen steigt die Kraft sogar auf 500 Newton an. Das entspricht kurzzeitig der Gewichtskraft eines knapp 50 Kilogramm schweren Gegenstandes! (Bild: picture-alliance / Denkou Images)

10

als die der Erde ist. Biomechaniker fragten sich, ob ein [Mensch auf dem Mond](#) dadurch auch sechsmal höher springen könnte als auf der Erde.

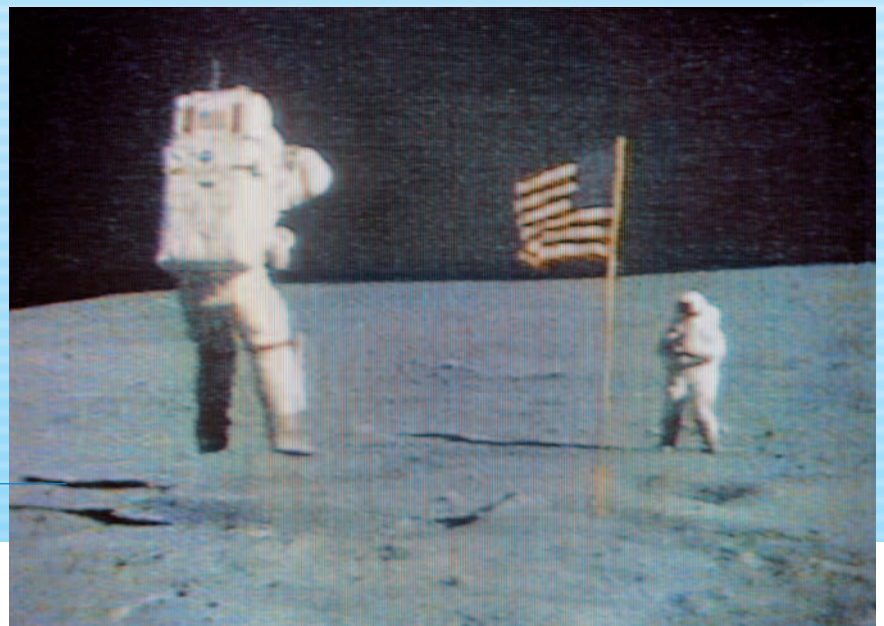
Die Antwort fällt nicht leicht, denn Muskeln und Skelett wirken überraschend komplex zusammen. Natürlich gelten die Hebelgesetze der Physik. Nach diesen hängt die Kraft unter anderem von dem Winkel ab, in dem die Muskeln an den Knochenhebeln ziehen. Die Streckmuskeln der Beine sitzen so, dass sie umso mehr Kraft auf den Boden bringen, je weiter sie die Beine strecken. Also steigt die Kraft bei der Sprungbewegung aus der Hocke heraus an. Allerdings nimmt die Muskelkraft mit wachsender Bewegungsgeschwindigkeit ab. Letztendlich zeigten Computersimulationen: Menschen könnten auf dem Mond nur gut doppelt so hoch springen wie auf der Erde – und das auch nur ohne schwere Raumanzüge!

Astronauten erleben in der Schwerelosigkeit, wie stark unser Körper an die Schwerkraft angepasst ist. Übrigens ist die Gravitationskraft der Erde etwa in einer Raumstation keinesfalls verschwunden: Vielmehr ist es so, dass sie durch die Fliehkraft der um die Erde rasenden Station gerade aufgehoben wird. Mit Folgen für die Menschen an Bord: Der Kreislauf pumpt das Blut in den Kopf, weil keine Schwerkraft es mehr in die Füße zieht und langfristig droht der Abbau von Muskeln und Knochen.

Knochen selbst sind ebenfalls faszinierende Forschungsobjekte für die Biophysik. Im Prinzip sind sie Verbundwerkstoffe aus zähem Kollagengewebe, das mikroskopische Kristalle aus Kalziumphosphat verstärken. Anders als technische Werkstoffe allerdings leben Knochen. Sie formen sich permanent um. Dabei lösen spezielle Knochenzellen, die

► Spricht man über die Physik des Menschen, lohnt es sich, auch einmal einen Blick auf seine einzelnen Bauelemente zu werfen. Unzählige Einzelteile arbeiten im menschlichen Körper zusammen wie in einer extrem komplexen Maschine. Wir haben hier eine kleine Auswahl verschiedener Bauteile zusammengestellt. (Infografik: Timo Meyer, Marleen Schwalm / ius)

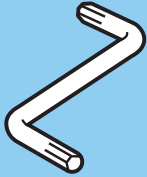
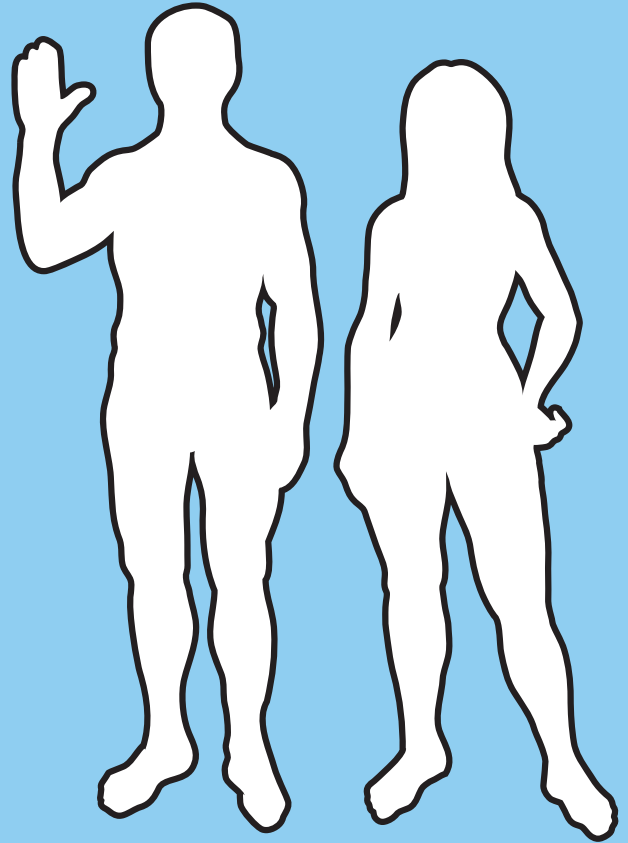
▼ Astronaut John W. Young macht einen beeindruckenden Hüpfer während seines ersten Mondausflugs am 21. April 1972. Ganz so hoch wie man es durch die geringere Schwerkraft erwarten würde, fällt der Sprung des Apollo-16-Kommandanten allerdings nicht aus. Der Grund: Die Mechanik des menschlichen Körpers. (Bild: NASA)



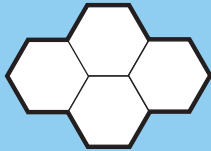
Osteoklasten, altes Gewebe auf. Osteoblasten bauen es dagegen auf. Knochen passen sich Anforderungen an – fast so wie Muskeln, nur langsamer. Vor allem können sie feine Risse ausheilen, müssen also nicht wegen Materialermüdung ausgetauscht werden. Und nach einem Bruch bilden sie an der heilenden Stelle eine Verdickung, die später wieder verschwindet.

Knochen sind zudem in ihrem Inneren komplex aufgebaut. Wirbelknochen zum Beispiel müssen hohe Kräfte aushalten und das Rückenmark schützen. Sie sind innen hohl und von einem Netzwerk dichter Verstreutungen durchzogen: Diese sogenannten Trabekel nehmen zuverlässig Kräfte aus allen Richtungen auf und ermöglichen zugleich eine leichte Bauweise. Knochen sind also weit mehr als ein einfach strukturierter Werkstoff, sie besitzen eine innere Architektur.

MENSCH



1 x



Haut
1,5-2 m²



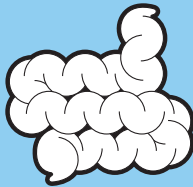
Knochen
206 x



Muskeln
656 x



Retina-Rezeptoren
106 000 000 x



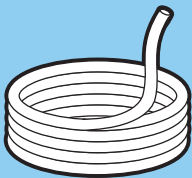
Darm
8 m



Stimmbänder
2 x



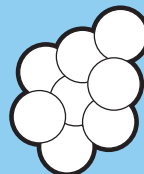
Nervenzellen
1 000 000 000 000 000 x



Kapillarsystem
80 km



Blut
5-6 l



Lungenbläschen
300 000 000 x



Riechsinneszellen
10 000 000 x



Kopfhaare
100 000 x



Schweißdrüsen
3 000 000 x



Hörsinneszellen
25 000 x



Nervenfasern
768 000 km





Diagnose Physik am Menschen

„Sich röntgen lassen“ – schon diese Redewendung, in der der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen verewigt ist, beweist: Ohne Physik geht wenig in der heutigen Medizin. Das gilt gerade für Diagnosemethoden, die tief ins Innere des lebenden Körpers blicken. Röntgen & Co. machen damit einen uralten Traum der Medizin wahr. Diese verdankt der Physik sogar das Wissen, dass winzige Erreger Krankheiten verursachen, denn erst Lichtmikroskope machten sie sichtbar.

Viele Diagnoseverfahren der Medizin basieren auf Physik. Auch das altherwürdige Stethoskop nutzt sie. Als akustischer Verstärker macht es Herzschlag, Puls, Atem- oder Darmgeräusche besser hörbar. Jahrtausendlang mussten Ärzte zum Abhören ihr Ohr direkt an die Patienten legen. 1816 entdeckte der französische Arzt René Théophile Hyacinthe Laënnec, dass das mindestens genauso gut mit einer Papierrolle funktionierte. Noch dazu war es bequemer, hygienischer und erleichterte das Hören bestimmter Körpergeräusche. Laënnec erfand daraufhin das allererste Stethoskop, ein hölzernes

Hörrohr mit einem konusförmigen Kopf zum Aufsetzen auf den Patientenkörper.

Bei modernen akustischen Stethoskopen sind am Abhörkopf zwei Schläuche angeflanscht, die zu Ohrbügeln abzweigen. Der Stethoskop-Kopf enthält eine Membrane, die im Rhythmus des Schalls aus dem Körper des Patienten mitschwingt. Sie versetzt die Luftsäule im Stethoskop in akustische Schwingungen, die durch die beiden Schläuche bis zu den Trommelfellen der ärztlichen Ohren wandern. Auf ihrem Weg von der breiten Membrane bis zum schmalen Trommelfell wird die

schwingende Luftsäule immer enger eingezwängt. Da die bewegten Luftvolumina über der Membran und im Ohr gleich groß sein müssen, macht die beengte Luftsäule am Trommelfell einen viel größeren Hub. So wirkt dieses „Übersetzungsgetriebe“ aus Luft als Verstärker.

Der Körper produziert aber nicht nur akustische Geräusche. Auch seine elektrischen Signale liefern viele Informationen. Der „Hirnstrom“ zum Beispiel zeichnet die Aktivität der Milliarden von Neuronen in unserem Kopf nach. Seine Wellenmuster zeigen, ob das Gehirn wach ist, tief schläft – oder ob es an einer Krankheit leidet. Elektroden am Kopf nehmen diese [Elektroenzephalogramme \(EEG\)](#) auf. Die Elektroden registrieren dabei sehr kleine elektrische Spannungen von nur etwa hundert Millionstel Volt. Entsprechend hochempfindlich müssen die EEG-Geräte sein.

◀ Moderne Verfahren zeigen Ärzten heutzutage ganz ohne chirurgische Eingriffe wie es im Inneren ihrer Patienten aussieht. Die Computertomographie-Aufnahme links zeigt unterschiedliche Gewebearten von Gefäßen, Knochen und Organen. (Bild: Siemens Pressebild)

➤ Harald zur Hausen – von 1983 bis 2002 Direktor des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg – erhielt 2008 den Nobelpreis für Medizin, gemeinsam mit den Franzosen Luc Montagnier und Françoise Barré-Sinoussi. (Bild: DKFZ)

▼ EEGs zeigen die elektrische Aktivität des Hirns. Hier wird zum Beispiel über die EEG-Kappe gemessen, was bei der Betrachtung der Objekte auf dem Bildschirm sowie ihrer Auswahl im Probanden-Gehirn vorgeht. (Bild: SensoMotoric Instruments (SMI), www.smivision.com)



Fließt elektrischer Strom, dann wird er von Magnetfeldern begleitet. Ein aktives Gehirn produziert deshalb auch immer magnetische Signale, die allerdings hundert Millionen Mal schwächer als das Magnetfeld der Erde sind. Um sie aufzuspüren, muss die aufwendige Magnetoezephographie (MEG) supraleitenden Magnetsensoren, sogenannte SQUIDS einsetzen. Diese registrieren selbst winzigste Magnetfeldänderungen. Spezielle MEG-Helme für den Kopf besitzen bis zu 300 Sensoren, die ein recht genaues Abbild der Hirnaktivitäten liefern. MEGs sind deshalb wichtig für die Planung schwieriger Hirnoperationen.

Das Herz sendet ebenfalls elektrische Signale aus, die außen am Brustkorb messbar sind. Das erste Elektrokardiogramm (EKG) nahm der englische Physiologe Augustus Désiré Waller 1882 an seinem Hund Jimmy auf. Fast 130 Jahre

später zeichnen moderne EKG-Geräte die „Herzspannungskurve“ mit Elektroden auf der Brust auf. Diese Kurve kann Hinweise auf Herzerkrankungen liefern, von denen sich manche allerdings erst bei bestimmten Belastungen zeigen. Zur Langzeitmessung gibt es deshalb tragbare EKG-Geräte. In Krankenhäusern stehen sie mit Computern in Funkverbindung, die bei einem Problem des Patienten Alarm schlagen.

Kein Bild ohne Physik

Lichtmikroskope gibt es ungefähr seit Anfang des 17. Jahrhunderts. Aber erst in der zweiten Hälfte jenes Jahrhunderts gelang es dem Naturforscher Antonie van Leeuwenhoek, brauchbare Geräte zu bauen. Mit ihnen entdeckte der Niederländer die bis dato völlig unbekannte Welt der Mikroben, darunter die ersten



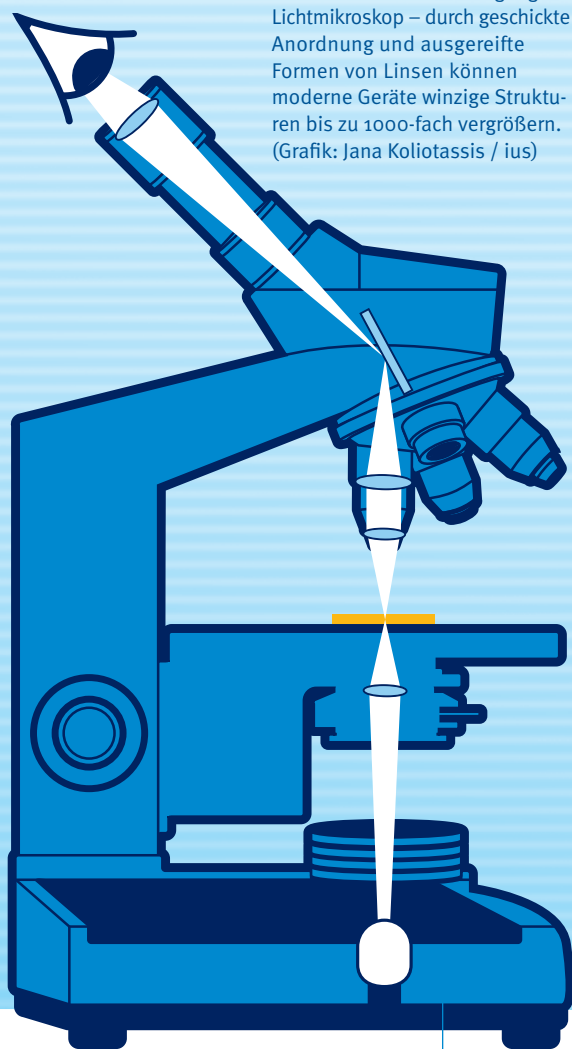
INFO

Dem Krebs auf der Spur

Krebs hat viele Ursachen und seine Diagnose und Therapie sind außerordentlich komplex. Vor allem im Bereich der Krebserkennung werden heute zahlreiche physikalische Methoden eingesetzt. Doch nur etwa jeder zweite Patient kann mit den herkömmlichen Methoden – Operation, Chemo- und Strahlentherapie – erfolgreich behandelt werden. Nicht selten kommt es dabei zu heftigen Nebenwirkungen.

Doch derzeit vollzieht sich ein Umbruch in der Krebsforschung. Eingeleitet wurde er durch den deutschen Forscher Harald zur Hausen, der schon in den 1970er Jahren erkannte, dass Viren Krebs auslösen können. Damit widersprach er der vorherrschenden Lehrmeinung und sollte doch Recht behalten: Jahrzehnte später, 2008, erhielt er den Nobelpreis für Medizin. Seiner Forschung ist es zu verdanken, dass man heute zunehmend versteht, wie Krebs auf mikroskopischer Ebene entsteht. Dadurch wurden neue Behandlungen möglich, die höhere Wirksamkeit bei besserer Verträglichkeit ermöglichen.

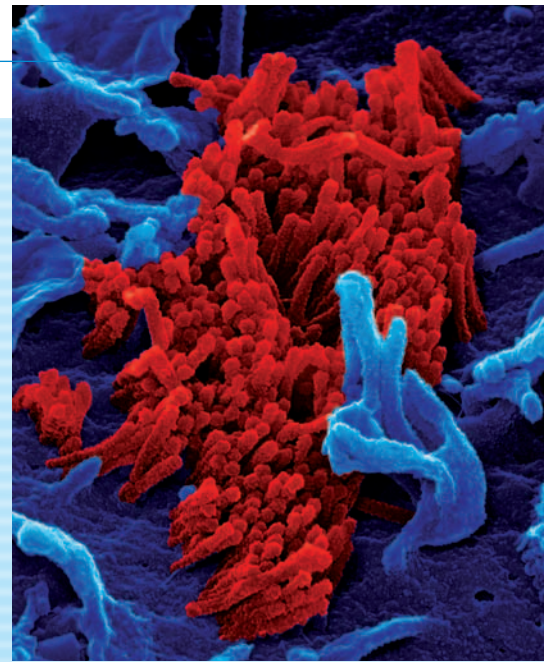
Die Krebsforschung nimmt Tumore heute molekular ins Visier. Tumore werden also weniger durch Lage und Gewebsursprung definiert („Brustkrebs“, „Darmkrebs“), sondern vermehrt anhand ihrer Genfehler („molekulare Signatur“) und den dadurch gestörten Signalwegen innerhalb des Gewebes charakterisiert. In der Tat kann ein Lungentumor auf molekularer Ebene einem Brusttumor ähnlicher sein als zwei Brusttumore untereinander.



▼ Vereinfachter Strahlengang im Lichtmikroskop – durch geschickte Anordnung und ausgereifte Formen von Linsen können moderne Geräte winzige Strukturen bis zu 1000-fach vergrößern. (Grafik: Jana Koliotassis / ius)

► Diese nachträglich eingefärbte Aufnahme eines Influenzavirus ist mit einem Rasterelektronenmikroskop entstanden. Für ein Lichtmikroskop sind solche Viren unsichtbar – mit Größen zwischen 80 und 120 Nanometer (nm) sind sie viel kleiner als die kleinste Wellenlänge des sichtbaren Lichts. (Bild: Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie / Volker Brinkmann)

► Hightech-Kundschafter im Körperinneren – das 1-2 mm lange Mini-U-Boot „Nautilus“ der Hochschule Karlsruhe (rechts eine Computersimulation) soll zur Krebstherapie in die menschliche Blutbahn injiziert werden, mit optischen Methoden das Blut seines Trägers untersuchen und mit einem eingebauten Laser Viren oder Krebszellen unschädlich machen. (Grafik: Ars Electronica Futurelab)



Bakterien. Das Mikroskop brachte der Medizin damit eine entscheidende Erkenntnis: Krankheiten werden von winzigen Erregern verursacht.

Die kleinsten Erreger, die Viren, erwischt man mit dem klassischen Lichtmikroskop allerdings nicht. Das liegt an der Wellennatur des Lichts, die verhindert, dass die Optik von Mikroskopen Objekte auflösen kann, die kleiner als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts sind.

Erst die Erkenntnisse der Quantenphysik brachten den Durchbruch hin zu Mikroskopen mit kürzeren Wellenlängen und zum Elektronenmikroskop. Nach den Regeln der Quantenphysik sind Teilchen gleichzeitig auch Wellen und Elektronen wesentlich kurzwelliger als Licht. Damit kann eine Elektronenoptik Viren abbilden, die einem Lichtmikroskop entgehen würden. Tatsächlich lassen sich die geladenen Elektronen mit „Linsen“ aus elektr-

ischen und magnetischen Feldern sogar fokussieren. So entstehen leistungsfähige Elektronenmikroskope, die die kleinsten Erreger in Patientenproben und für die Grundlagenforschung auch unbekannte Viren aufspüren können.

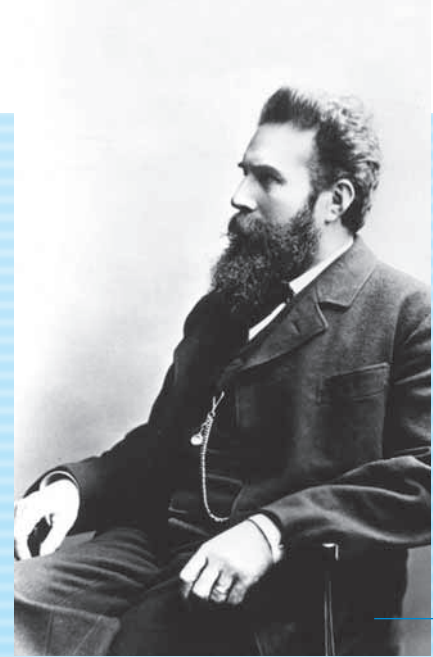
Ein anderes optisches Gerät, das Medizinern den direkten Blick ins Körperinnere ermöglicht, ist das Endoskop. Es ist Lampe und Sehhrohr in einem. Das Prinzip geht auf den „Augenspiegel“ zurück, den der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz um 1850 erfand. Damit konnten Augenärzte erstmals die Netzhaut durch die Pupille hindurch betrachten. Moderne Endoskope nutzen die Physik gleich mehrfach. Glasfasern transportieren das Licht einer Lampe an die Stelle im Körper, die gerade untersucht wird. Ein Objektiv vorne am Endoskop schickt das Bild dann durch Glasfasern aus dem Körper heraus zu einem Okular. Bei Videoendoskopen ist vorne eine kleine

Digitalkamera eingebaut, deren Bild auf einem Monitor erscheint.

Schall kann nicht nur über Geräusche medizinische Informationen aus dem Körperinneren liefern, sondern – bei geeigneter gewählter Frequenz – auch richtige Bilder. Jeder kennt die Ultraschallaufnahmen von Babys im Bauch der werdenden Mutter. So wissen die Eltern heute meist schon vor der Geburt, ob das Kind ein Mädchen oder ein Junge wird oder dort gar Mehrlinge heranwachsen. Mit modernen Ultraschallgeräten gelangen verblüffend detaillierte Bilder der Kleinen, die sogar Lebensfunktionen wie das schlagende Herz darstellen können.

Ultraschall liegt mit Frequenzen zwischen 2 und 20 Megahertz weit oberhalb unseres Hörvermögens. Solche Schallwellen sind zwischen 1 und 0,1 Millimeter kurz, können also entsprechend feine Strukturen abbilden. Der Schall dringt mit gut

► Als erstes Anschauungsobjekt durchleuchtete Röntgen die Hand von Albert von Kölliker. Dieser war es auch, der vorschlug, die X-Strahlen in Röntgenstrahlen umzubenennen, was man im deutschsprachigen Raum auch tat. Im Englischen verwendet man hingegen immer noch Röntgens erste Wortwahl „X-rays“.



▲ Der Physiker Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) auf einer Aufnahme aus dem Jahr 1906. (Bild: Deutsches Röntgen-Museum)

◀ Das Verfolgen des strömenden Blutes per Ultraschall wird „Doppler-Sonographie“ genannt. (Bild: GE Healthcare Deutschland)



1500 m/s durch Gewebe und Organe. Auf dem Weg ins Körperinnere werden hochfrequente Schallwellen allerdings schneller gedämpft als niederfrequente. Untersuchungen, die z.B. 25 cm tief reichen, müssen also mit 2 Megahertz auskommen, können folglich „nur“ millimeterfeine Details abbilden.

Die Technik funktioniert dabei ähnlich wie Radar. Der auf die Haut aufgesetzte Schallkopf sendet Schallimpulse in den Körper und empfängt ihre darin reflektierten Echos. Die Verzögerung zwischen Puls und Echo – die Laufzeit – gibt eine Information über die Tiefe, aus der das Echo zurückschallt. Zudem liefert das Signal Informationen über die Eigenschaften des Gewebes. Daraus kann der Computer ein Bildelement aus dieser Tiefe errechnen.

Auf den meisten heutigen Schallköpfen sind mehrere hundert Sende- und Empfangselemente in einer Reihe angeordnet.

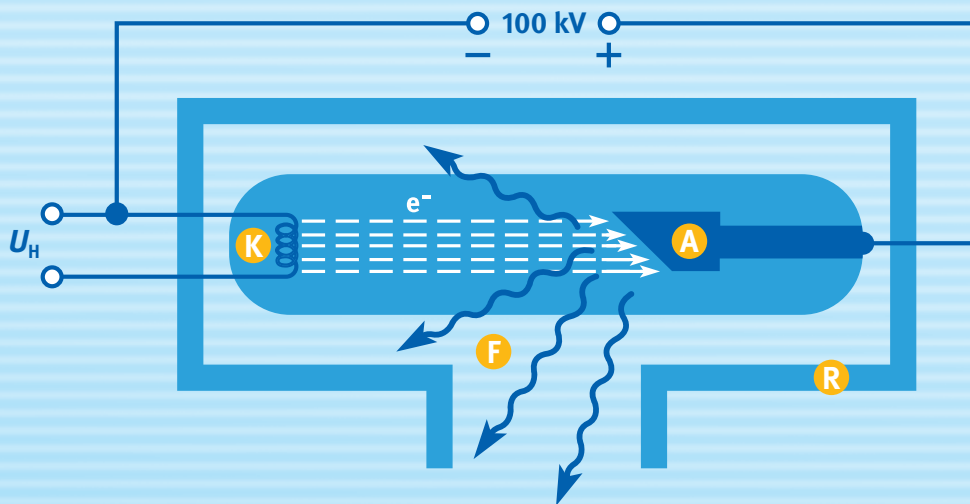
Die gesendete Schallkeule wandert diese Zeile entlang. Ein dreidimensionales Bild erzeugt der Kopf, indem er die Schallkeule zusätzlich seitlich schwenkt. Deshalb haben so erzeugte Ultraschallbilder ein scheibenwischerartiges Aussehen. Aufwändigere Geräte besitzen Schallköpfe, in denen die Sensoren auf einer Fläche angeordnet sind. Der Vorteil: Bilder können wesentlich schneller aufgenommen werden als beim zeilenförmigen Abtasten. Sie ermöglichen auf diese Weise sogar gestochen scharfe Aufnahmen von sich schnell bewegenden Organen wie etwa dem schlagenden Herz.

Ultraschallgeräte können sogar das Strömen von Blut visualisieren. Dazu nutzen sie ein bekanntes physikalisches Phänomen, nämlich den Doppler-Effekt. Jeder kennt ihn vom Sirenengeheul eines Krankenwagens: Rast der Wagen auf uns zu, klingt der Heulton höher, bewegt sich der Wagen von uns weg, ist der Ton tiefer. Über die

Messung dieses Doppler-Effekts kann man mit Ultraschall sichtbar machen, wie Blutkörperchen sich mit der strömenden Körperflüssigkeit bewegen. Durchblutungsstörungen können so schnell erkannt werden.

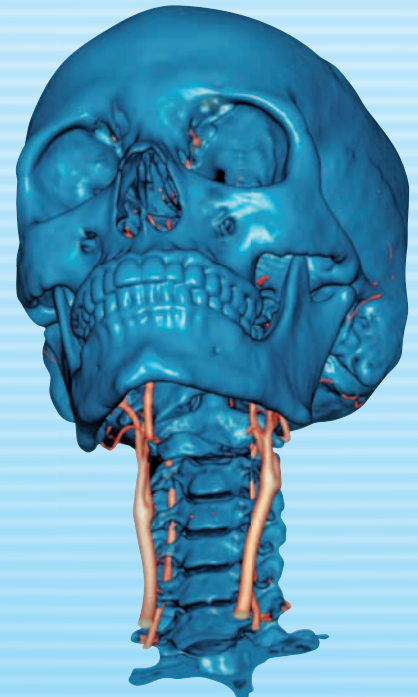
Röntgens Revolution

Frau Röntgen war genervt. Als ihr Mann endlich zum Abendessen erschien, war es kalt. Der Würzburger Physikprofessor aß geistesabwesend, dann verschwand er wieder im Labor. Das ging schon seit Tagen so. Wilhelm Conrad Röntgen hatte nämlich am 8. November 1895 eine faszinierende Entdeckung gemacht, als er mit einer speziellen Elektronenröhre experimentierte. Er fand eine unsichtbare Strahlung, die Gegenstände durchdringen konnte. Kaum hatte Röntgen wenig später die Wirkung dieser „X-Strahlen“ veröffentlicht, raste die Meldung um die Welt. Überall stürzten sich Forscher auf die Entdeckung.



▲ Schon Conrad Röntgen baute seine Röhre nach diesem einfachen Prinzip. In einem evakuierten Glaskolben brachte er zwei gegenüberliegende Elektroden an: die Glühkathode (K) (Wendel aus Wolframdraht) und die Anode (A) aus einem kompakten, vorne angeschrägten Kupferstab (wassergekühlt). Nach dem Einschalten der Heizspannung (U_H) treten aus der Kathode Elektronen (e^-) aus, die im Vakuum zwischen Kathode und Anode durch eine hohe Gleichspannung mit zehn bis hundert Kilovolt auf bis zu 180.000 km/s beschleunigt werden. Prallen diese Elektronen auf die Anode, so werden sie plötzlich abgebremst. Ihre hohe kinetische Energie wird dabei (senkrecht zur Flugrichtung) in die „Röntgenbremsstrahlung“ umgewandelt, eine energiereiche Strahlung, die das Röhrengehäuse (R) durch das Fenster (F) verlässt.

► Diese CT-Aufnahme vom Kopf und der Halswirbelsäule eines Patienten zeigt deutlich die in diesem Bereich verlaufenden Blutgefäße. Entstanden ist das Bild in einem „Somatom Definition“, einem CT-Scanner, bei dem zwei Röntgenröhren dreimal in der Sekunde um den Körper rotieren mit einer Zentrifugalkraft, die dem 30-fachen der Erdbeschleunigung entspricht. Selbst kleinste Arterienverkalkungen können so mit einer Auflösung von weniger als 0,33 Millimeter sichtbar gemacht werden. (Bild: Siemens-Pressebild)



Sehr schnell war klar, dass diese neue Strahlung ein Segen für die Medizin ist. Vor allem die Knochen im Körper macht sie perfekt sichtbar. Das ermöglichte eine gezielte Behandlung von Knochenbrüchen. Mit immer besserer Technik gelangen dann auch Aufnahmen von weicherem Gewebe. So entstand das medizinische Gebiet der Radiologie, dem die Menschen zu Beginn noch mit einiger Naivität begegneten. So gab es zwar aus Angst um die Intimsphäre bald diverse Angebote röntgensicherer Unterwäsche, der Umgang mit Röntgenstrahlen war jedoch von gefährlicher Sorglosigkeit geprägt. Schon 1896 gab es erste Strahlenopfer aus Unwissenheit. Das bekannteste war ein amerikanischer Student, der sich immer wieder öffentlich selbst durchleuchtet hatte und dadurch strahlenkrank wurde.

Heute wissen wir, dass Röntgenstrahlen wie sichtbares Licht elektromagnetische Wellen sind. Allerdings haben ihre Licht-

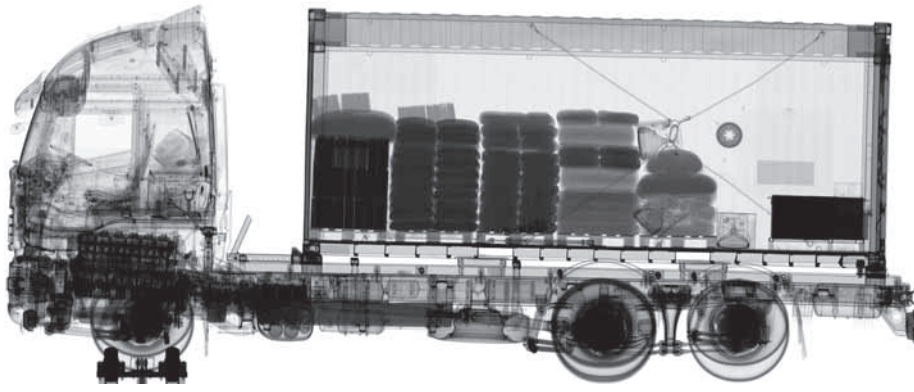
quanten eine vergleichsweise viel höhere Energie und können deshalb Knochen und Gewebe tief durchdringen. Treffen sie dabei auf Atome, dann schlagen sie aus ihnen energiereiche Elektronen heraus. Zurück bleibt ein elektrisch positiv geladener Atomrumpf, ein Ion. Deshalb spricht man auch von ionisierender Strahlung. Diese ist in der Medizin eher unerwünscht, bilden doch manche der Ionen so genannte freie Radikale. Sie können das Gewebe chemisch schädigen. Geht dabei die Erbsubstanz (DNS) einer Zelle irreparabel kaputt, kann diese zu einer Krebszelle mutieren. Umgekehrt kann geschickt eingesetzte Röntgenstrahlung aber auch bösartige Tumore zerstören.

Nach über hundert Jahren Praxis kennt die Medizin die Risiken genau und geht verantwortungsbewusst vor. Besonders schonend arbeiten digitale Röntgengeräte, in denen ein großflächiger digitaler Sensor den klassischen Film ersetzt. Sensor und

elektronische Signalverarbeitung machen die modernen Geräte besonders empfindlich. Entsprechend gering ist die Strahlendosis, mit der sie auskommen.

Die nächste Revolution im Bereich der Strahlenmedizin nach Röntgens Entdeckung war die Erfindung der [Computertomographie \(CT\)](#). Herkömmliche Röntgenbilder liefern nur eine zweidimensionale „flache“ Bildinformation. Schon früh träumten Wissenschaftler allerdings von räumlichen Bildern des Körperinneren. Sie würden zum Beispiel enthüllen, wo genau sich ein Tumor befände. In den 1970er Jahren war es dann soweit: Immer leistungsfähigere Computer ermöglichten schließlich den Durchbruch in die dritte Dimension.

Die räumliche Information gewinnen CT-Geräte, indem sie die Patienten schichtenweise aus verschiedenen Richtungen durchleuchten. Dazu rotieren Röntgen-



◀ Röntgenstrahlen können nicht nur Knochenbrüche sichtbar machen, sondern auch Schmuggelware. Moderne Hochenergie-Röntgenprüfanlagen können dazu ganze LKW auf einmal durchleuchten. (Bild: Smiths Detection)

INFO

Technetium entlarvt Tumore

Es klingt paradox: radioaktives Material als Werkzeug im Kampf gegen Tumore. In der so genannten Szintigrafie ist dies allerdings gang und gäbe. Radioaktive Substanzen werden hier in geringen Dosen in den Körper injiziert, um Tumore zu enttarnen. Dieses Radiopharmakum reichert sich vor allem in Tumoren an, weil deren Stoffwechsel hoch ist. Dort sendet der zerfallende Stoff Gammastrahlung aus. Außerhalb des Körpers trifft sie auf eine für die Strahlung empfindliche Kamera, in deren Bildern die Tumore sich durch hohe Aktivität verraten.

Das wichtigste szintigrafische Verfahren nutzt das künstliche Element Technetium-99m. Es zerfällt mit einer extrem kurzen Halbwertszeit von nur sechs Stunden. Das sichert ein hohes Signal bei geringer Dosierung, zudem verschwindet es schnell aus dem Körper.

Als Vorstufe stellen spezielle Kernreaktoren durch Bestrahlung mit Neutronen Molybdän-98 her. Da dieses mit gerade einmal zwei Tagen Halbwertszeit zum Technetium zerfällt, muss beim Transport vom Reaktor zur Klinik alles sehr schnell gehen.

Weltweit gibt es nur noch wenige Spezialreaktoren zur Technetium-Produktion. Immer mehr müssen aus Altersgründen abgeschaltet werden. Dabei werden allein in Deutschland pro Woche 60.000 Szintigrafien aufgenommen. Ein Konflikt, für den es noch keine Lösung gibt.

17



◀ Diese Aufnahmenserie zeigt, wie per CT ein Patientenkörper Schicht für Schicht durchleuchtet werden kann. Zunächst ist die Haut und teilweise auch noch die Kleidung sichtbar (links), dann die Muskulatur sowie einige Knochen, danach das Skelett, große Arterien sowie Herz, Nieren und Blase und als letztes die großen Blutgefäße sowie Herz, Nieren und Blase ohne Skelett. (Bild: Siemens-Pressebild)

quelle und Empfänger schnell um den Patienten herum. Allerdings verrät so ein Durchleuchtungsbild nicht, in welcher Tiefe sich ein bestimmtes Objekt im Körper befindet. Erst die Kombination mehrerer Bilder aus unterschiedlichen Blickwinkeln – also Drehrichtungen – liefert diese räumliche Information und zusammen mit speziellen Algorithmen die Bildinformation. Dieses Zusammenspiel brachte auch den Durchbruch zu anderen Methoden der dreidimensionalen Bildgebung wie etwa der Kernspintomographie.

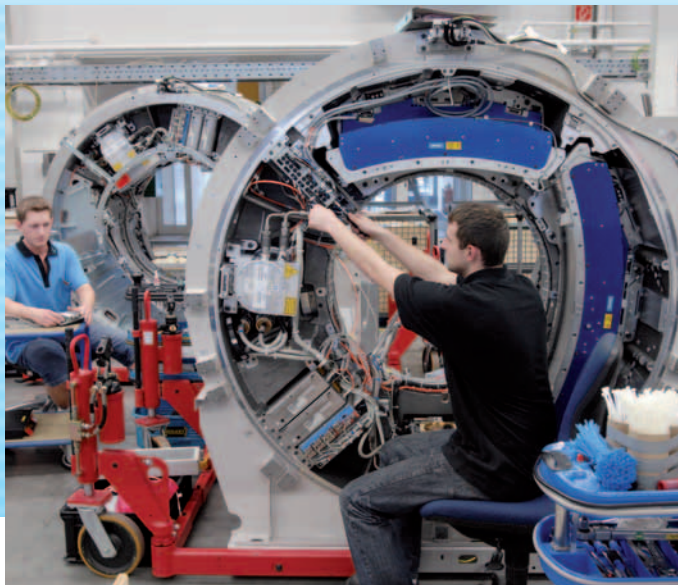
Heute gibt es eine Vielzahl an Röntgenmethoden, die unter Verwendung von den Patienten verabreichten Kontrastmitteln Knochen, Zähne, Adern, Gewebe und sogar eingesetzte Implantate durchleuchten können. Diese Methoden sind auch für die Planung schwieriger Operationen unerlässlich. Ohne Wilhelm Conrad Röntgens große Entdeckung wäre die moderne Medizin undenkbar.

Magnetisierende Bilder

Moderne Röntgenverfahren können neben Knochen zwar auch feine Gewebedetails abbilden, aber die Kernspintomographie kann das noch besser. Der Grund: Gewebe enthält viel Wasser, und vor allem die Kerne der Wasserstoffatome liefern die Bildinformation. Ein weiterer Vorteil: Die Kernspintomographie kommt ohne ionisierende Strahlung aus. Ihre Geschichte beginnt mit Paul Christian Lauterbur. Der amerikanische Chemiker hatte 1973 die entscheidende Idee, weitere Pioniergedanken steuerte der britische Physiker Peter Mansfield bei.

Heute werden allein in Deutschland pro Jahr fast sechs Millionen Patienten in Kernspintomographen untersucht. Dabei ist enorm viel Physik im Spiel. Um zu verstehen, in welcher Form, müssen wir ins Innere der Materie schauen. Einige Atomkerne sind wie kleine Magnete: Sie haben

► Die in dem Ring dieses Kernspintomographen lagernde Spule wird beim ersten Hochfahren des nagelneuen Geräts mit elektrischem Strom geladen. Danach kreist dieser Suprastrom ohne Steckdose – theoretisch – unendlich lange. Praktisch bremsen ihn aber die Körper der Patienten und Störungen langsam aus. Bei modernen Geräten würde es trotzdem über tausend Jahre dauern, bis das Stromkarussell still steht. (Bild: Philips)



◀ Fertigung von Computertomographen in der weltweit größten CT-Fabrik in Forchheim bei Nürnberg. (Bild: Siemens-Pressebild)

einen „Kernspin“. Tatsächlich tragen alle Kernbausteine, also Neutronen und Protonen, solche Spins. Zum Kern zusammengeballt neutralisieren sich aber immer zwei Nachbarn dieser Minimagnete. Ihre Spins klappen in die entgegengesetzten Richtungen, weil das Energie spart. Viele Atomkerne enthalten aber eine ungerade Zahl von Kernbausteinen. Also übersteht ein Spin die kollektive Neutralisierung. Dieser macht den Kern zum kleinen Magneten.

Im einfachsten Atom unserer Welt gibt es sowieso nur einen Kernbaustein: Wasserstoff besitzt ein einzelnes Proton als Kern. Unser Körper besteht zu über 50 Prozent aus Wasser, auch Fett enthält viele Wasserstoffatome. Folglich sind Wasserstoffatomkerne die wichtigsten Informationslieferanten der Kernspintomographie. Diese nutzt aus, dass die Kernspins sich in Magnetfeldern wie kleine Kompassnadeln ausrichten. Dazu braucht der Kern-

spintomograph allerdings ein sehr starkes Magnetfeld, vielfach größer als etwa das Erdmagnetfeld.

Zu diesem Zweck steckt in dem großen Ring, in den Patienten geschoben werden, ein starker Elektromagnet, dessen Feldstärke bei modernen Geräten bis zu 3 Tesla erreichen kann – etwa das 60.000-fache des Erdmagnetfelds. Dieser Magnet besteht aus einer supraleitenden Spule, die von flüssigem Helium auf etwa minus 269 Grad Celsius gekühlt wird.

Je stärker das Magnetfeld eines Tomographen ist, desto feinere Strukturen kann er abbilden. Sobald es die Wasserstoffkernspins im Patienten parallel ausgerichtet hat, sendet eine weitere Spule einen kurzen elektromagnetischen Puls in den Patientenkörper hinein. Dieser kickt die Kernspins aus ihrer ausgerichteten Lage heraus. Wie seitlich angeschubste Brummkreisel drehen sie sich dann um

die Achse des Magnetfelds. Wie schnell diese so genannte Präzessionsbewegung ist, hängt von dessen Stärke ab.

Während dieser Präzession senden die Kernspins selbst elektromagnetische Strahlung aus. Bei Wasserstoff und einem Magnetfeld von einigen Tesla Stärke liegt die Sendefrequenz ungefähr im Bereich eines UKW-Radios. Dieses Signal empfängt eine Antennenspule, die den Körper der Patienten umschließt. Die interessante Information steckt nun in der Dauer, mit der das Kreiseln der Atomkerne abklingt. Da die Abklingzeit von der Anordnung der Nachbaratome und damit von der Art des Gewebes abhängt, liefert sie einen eindeutigen „Fingerabdruck“ dieses Gewebes. Das kann der Computer dann als Bild darstellen.

Für das Bild fehlt aber eine entscheidende Information: Die Position der Atomkerne im Patienten, die per Radiosignal



◀ Nicht nur Lebewesen kann man mit Computertomographen durchleuchten. Diese Scans der Büste der Nofretete zeigen, dass sich unter dem äußeren makellosen Antlitz aus Gips (Bilder 3 und 4) noch ein zweites Gesicht aus Kalkstein verbirgt (Bilder 1 und 2). Die Aufnahmen beweisen, dass der königliche Bildhauer Thutmosis das Gesicht der ehemaligen ägyptischen Königin später noch einmal deutlich überarbeitet zu haben scheint. (Bild: Siemens-Pressebild)



◀ Der britische Physiker Peter Mansfield (links) und der US-amerikanische Chemiker Paul Lauterbur erhielten 2003 den Medizin-Nobelpreis für die Entwicklung der Kernspintomographie. (Bild: picture-alliance / dpa)

über das Gewebe in ihrer Gegend berichten, ist noch unbekannt. Diese Nuss knackte Christian Lauterbur mit einer genialen Idee: Er überlagerte das Magnetfeld, das die Spins ausrichtet, mit einem zweiten Magnetfeld. Dieses „Gradientenfeld“ nimmt über den Querschnitt des Körpers hinweg ab.

Die beiden überlagerten Magnetfelder kann man sich wie die absteigenden Ränge eines Kinosaals vorstellen. Auf jedem Sitz befindet sich ein Wasserstoffkern. Innerhalb der Reihe eines Rangs ist das gesamte Magnetfeld immer gleich stark. Also senden die Atomkerne auf seinen Sitzen auch auf gleicher Frequenz. Je höher der Rang ist, desto höher ist auch die Sendefrequenz, weil das Gesamtfeld anwächst. Damit kann der Computer die Atome schon einmal nach Rängen ordnen.

Noch weiß er aber nicht, ob ein bestimmtes Atom in seinem Rang eher in der

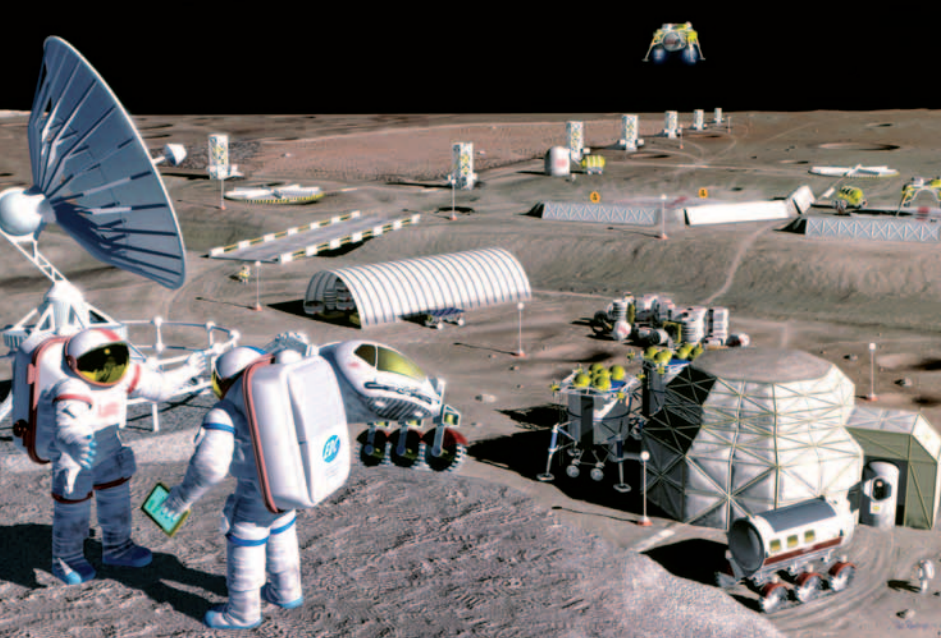
Mitte, links oder rechts sitzt. Hier kommt Lauterburs zweite Idee ins Spiel: Da die Atomkerne im Gewebe ja an ihrem Ort fest sitzen, drehte er das Gradientenfeld schrittweise um einen kleinen Winkel. Jedes Mal machte er eine neue Aufnahme. Er sandte einen Puls in seine Probe und zeichnete das Abklingen der Präzessionsbewegung auf. Dann drehte er ein bisschen weiter. Nach einer vollständigen 360-Grad-Drehung erhielt er ein zweidimensionales Schichtbild. Das zeigte nun erkennbare Gewebestrukturen.

Stellen wir uns vor, dass der gesamte Sitzreihenblock des Kinosaals auf eine Drehbühne montiert ist. Die atomaren Gäste hängen dagegen wie Marionetten an Seilen von der Decke. Da diese fest steht, rotieren die Sitze bei jeder neuen Aufnahmeeinstellung unter den Atomkernen weg. Jedes Mal wechselt ein Kern Platz und Rang. Er spürt ein verändertes Magnetfeld und passt seine Sendefrequenz an. In sei-

nem Signal erhalten bleibt aber die einzigartige Information über seine speziellen atomaren Sitznachbarn. Damit kann der Computer seine Position aus den „Drehbildern“ errechnen und die Eigenschaften des dortigen Gewebes zuordnen.

Dieser Trick erzeugt ein Bildscheibchen. Nebeneinander gereiht ergeben solche Schichtbilder ein dreidimensionales Bild. Heutige Geräte schalten Gradientenfelder in alle drei Raumrichtungen, um Gewebestrukturen hinunter bis zur Größe von einem Millimeter präzise aufzulösen. Forschungsgeräte mit 7 Tesla starken Magneteten erreichen sogar schon Hundertstel Millimeter Auflösung.

Neben einer feineren räumlichen Auflösung ist die Aufnahmegeschwindigkeit ein wichtiges Thema. In beiden Fällen kämpfen die Entwickler mit dem schwachen Signal der Kernspins. Es droht im Rauschen vieler Störungen unterzugehen.



◀ Das leichte Isotop Helium-3 mit zwei Protonen und einem Neutron im Kern, ist ein sehr seltenes Gas, in natürlichem Helium nur zu 0,00014 Prozent enthalten. Wegen seiner breiten Anwendung bei der Erzeugung sehr tiefer Temperaturen, bei der Kernfusion, als Kontrastmittel bei MRT-Untersuchungen und in Strahlendetektoren auf Flug- und Seehäfen besteht jedoch weltweit ein enormer Bedarf. Der wurde früher bei der Herstellung von Kernwaffen, heute bei deren Zerlegung zum großen Teil gedeckt. Frank Schätzing glaubt in seinem Roman „Limit“, dass wir Helium-3 demnächst vom Mond holen. (Bild: NASA)

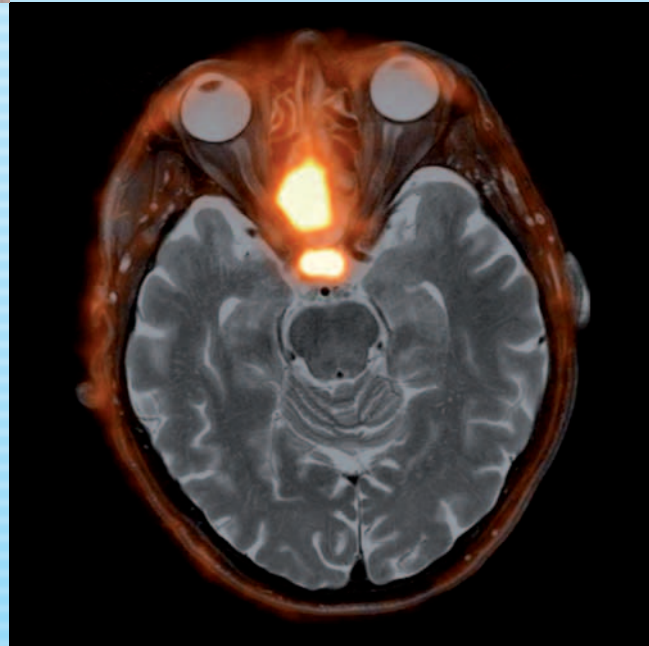
INFO

Dem Atem auf der Spur

Eine lebende Lunge beim Atmen zu durchleuchten ist extrem schwierig. Röntgenbilder liefern kaum Information über Lungenfunktionen. Mainzer Physikerinnen und Physiker verfolgen deshalb die folgende Idee: Sie mischen der eingeatmeten Luft ein harmloses Markergas bei, das im Kernspintomographen sichtbar wird. Damit können Ärzte zum Beispiel in allen Phasen des Atmens verfolgen, wie gut eine Lunge durchlüftet ist. Allerdings ist die Herstellung des Markergases schwierig. In Mainz besteht es aus dem leichten Helium-3-Gas, denn Helium-3 besitzt den für die Aufnahmen unerlässlichen Kernspin. Vor dem Einatmen müssen diese Kernspins in eine Richtung orientiert werden. Ohne diese magnetische Ordnung funktioniert die Kernspintomographie nicht. Bei einem Edelgas ist das aber eine Herausforderung, denn seine Atome flitzen wild durcheinander. Tatsächlich gelingt dies nur mit Hilfe eines starken Lasers.

Das Mainzer Verfahren kann sogar abbilden, wie gut die Lunge Sauerstoff aufnimmt. Sauerstoff zerstört nämlich die magnetische Ordnung des Helium-3-Gases innerhalb von 10 bis 20 Sekunden. Je langsamer ein Lungenbläschen den Sauerstoff aus der Luft ins Blut überträgt, desto schneller verschwindet dort der Magnetismus. So macht die Methode Lungenfunktionen in mehrfacher Hinsicht transparent.

► Diese PET/MRT-Aufnahme zeigt einen Tumor bei einem 70 Jahre alten Patienten. Deutlich erkennbar ist die gelbe Anfärbung, dort wo sich das Tumorgewebe befindet. Diese Färbung ist auf die Anreicherung von tumorspezifischen Markierungsmolekülen zurück zu führen. (Bild: © Universitätsklinikum Tübingen)



Das Signal wächst mit der Kraft der Magnetfelder. Heute sind Gradientenfelder schon so stark, dass sie nicht nur beim Umschalten die Spulen laut knallen lassen. Sie könnten in den Nerven sogar Schmerzreize auslösen, würden Überwachungssysteme dies nicht verhindern.

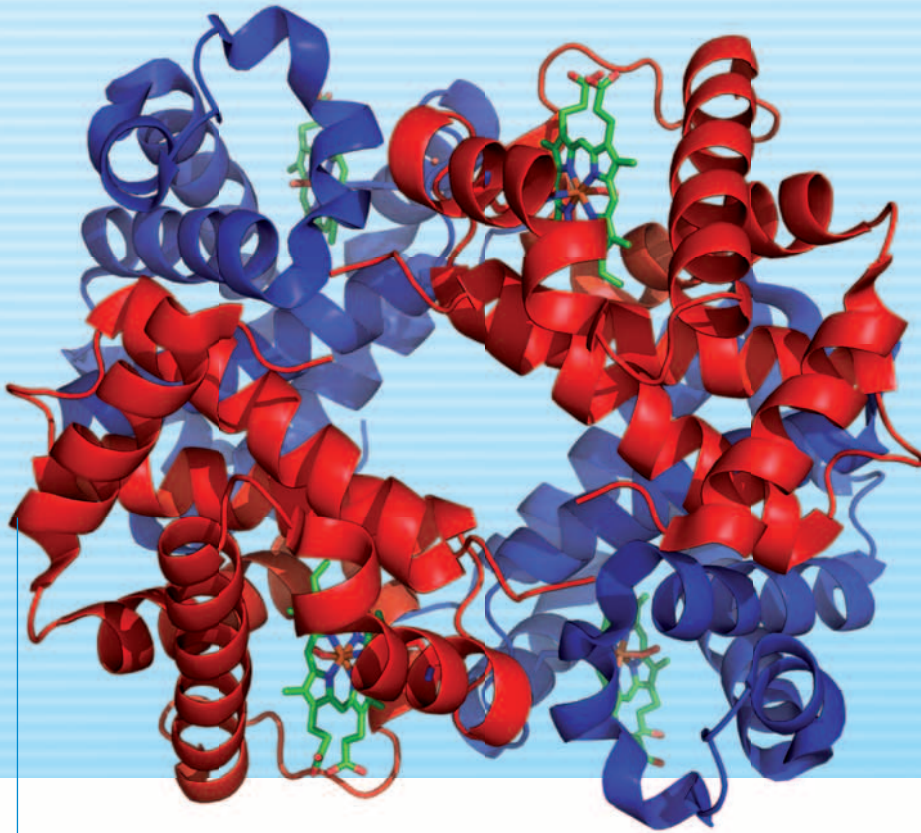
Früher verlangten die Geräte langes Stillhalten, da jedes Wackeln, Atmen oder Schlucken Unschärfen verursachte. Heute sind die Geräte wesentlich schneller geworden. Trotzdem braucht die Aufnahme eines kompletten Kopfs in der Klinik immer noch eine Viertel bis halbe Stunde. Im Labor sind dagegen schon Bilder in Echtzeit möglich, zum Beispiel Videos vom schlagenden Herzen.

Die Kernspintomographie heißt wissenschaftlich präzise eigentlich Magnetresonanztomographie (MRT). Ein besonders interessantes Gebiet ist die funktionelle

Magnetresonanztomographie (fMRT). Sie nutzt aus, dass der Blutfarbstoff [Hämoglobin](#) in sauerstoffreichem Blut andere magnetische Eigenschaften hat als in sauerstoffarmem Blut. So kann dieses natürliche Kontrastmittel zum Beispiel die Gehirnaktivität sichtbar machen, denn aktivere Nervenzellen verbrauchen mehr Sauerstoff. fMRT-Bilder können zum Beispiel zeigen, welche Zentren aktiv sind, wenn wir mathematische Aufgaben lösen, Videospiele spielen oder mit dem Finger schnippen.

Noch besser kann ein anderes Verfahren der Medizinphysik die Stoffwechselaktivität bebildern. Es heißt Positronen-Emissions-Tomographie – kurz PET. Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen. Antimaterie klingt nach Science Fiction, doch PET wird bereits heute eingesetzt. Dazu wird den Patienten ein Mittel gespritzt, das radioaktive Atome in

▼ Bändermodell des Hämoglobin A, der vorherrschenden Variante des roten Blutfarbstoffs. Das Protein ist in den roten Blutkörperchen enthalten und bindet den Sauerstoff aus den Lungen, um ihn dann im ganzen Körper zu verteilen.
(Grafik: Richard Wheeler/wikipedia/cc-by-sa)



▼ Auch Muskelaktivität kann die PET (hier in Kombination mit CT) darstellen. Als Radiopharmakon wird hier Fluordesoxyglucose verwendet, welche vom Körper genauso behandelt und verarbeitet wird wie ihr nicht-radioaktives Pendant Glucose. So kann durch die Visualisierung der Anreicherung des Radionuklids Fluor-18 der Glucosestoffwechsel verfolgt werden.
(Bilder: Hg6996, Wikimedia Commons)



sehr geringer Konzentration enthält. Sie sind sehr kurzlebig, und bei ihrem Zerfall setzen sie jeweils ein Positron frei. Dieses trifft im Gewebe unweigerlich auf eines der vielen Elektronen.

Immer, wenn Antimaterie auf Materie stößt, zerstrahlen beide zu reiner Energie. Diese wird in Form von zwei Gammastrahlungsquanten frei. Sie rasen in genau entgegengesetzter Richtung aus dem Körper und schlagen in die Gammastrahlungsdetektoren des PET-Gerätes ein. Aus deren Signalen setzt ein Computer das räumliche Bild zusammen.

Das Radionuklid reichert sich vor allen in den Zellen an, die besonders aktiv sind. Damit kann die PET Gehirnaktivitäten darstellen oder Tumorzellen sichtbar machen. Allerdings ist die räumliche Auflösung viel geringer als bei der Computertomographie (CT) oder der Kernspintomogra-

phie (MRT). Deshalb ist ihre Kombination mit einem der beiden anderen bildgebenden Verfahren interessant. Besonders attraktiv ist die Verknüpfung mit MRT, denn diese belastet den Körper nicht mit Röntgenstrahlung. Erste PET/MRT-Geräte sind bereits in Kliniken im Einsatz.



22

Therapie Physik für Menschen

Wer sich heute die Brille „weglasern“ lässt, vertraut sich modernster Laserphysik an. Und nicht allein den Augen hilft die Medizinphysik: Schall zertrümmert Nierensteine, verschiedene Strahlenarten therapieren Tumore. Physik steckt in Implantaten und Herzschrittmachern und in vielen medizinischen Zukunftsvisionen wie etwa dem intelligenten T-Shirt, das die Lebensfunktionen seines Trägers in Extremsituationen überwacht.

Als die Lehrerin dem kleinen Oskar in der ersten Schulstunde seine Blechtrommel wegnehmen will, setzt er seine schlimmste Waffe ein: Mit einem lauten Schrei lässt er die Gläser ihrer Brille zerspringen. So beschreibt Günter Grass ein physikalisches Phänomen, das es tatsächlich gibt. Allerdings kann keine menschliche Stimme dem Schall so viel Energie mitgeben, dass Glas zerplatzt – das zumindest legen Versuche mit [Opernsängern](#) nahe.

Ultraschall hat genug Energie und die richtige Frequenz, um Nierensteine oder Gallensteine zu zertrümmern. Heute hel-

fen so genannte Stoßwellengeneratoren vielen Patienten, die früher unters Chirurgemesser mussten. Sie erzeugen eine Folge von starken Schallstößen. Dazu sind sie zum Beispiel mit Piezokristallen ausgerüstet, die elektrische Signale in mechanische Schwingungen umwandeln. Das akustische Formen der Schallimpulse erfordert allerdings ein Frequenzgemisch, zu dem auch laut hörbare Geräusche gehören. Deshalb müssen die Patienten während der Behandlung Ohrschützer tragen. Der Ultraschallanteil schwingt mit bis zu zehn Megahertz, also 10 Millionen Schwingungen pro Sekunde. Das ist 500-

mal höher als der höchste Ton, den junge Menschen hören können.

Die Schallstöße müssen ihre Energie effizient in den Körper einleiten. Das Gerät überträgt sie durch eine mit Wasser gefüllte Blase in den Körper, die an dessen hohen Wassergehalt am besten angepasst ist. Sonst würde die Körperoberfläche wie ein Spiegel wirken und einen Großteil der Schallenergie zurück reflektieren. Damit die Ultraschallimpulse die Steine mit maximaler Energie „zersingen“, werden sie auf diese wie durch ein Brennglas fokussiert.

Ultraschall kann auch bösartige Tumore bekämpfen. In einem großen Forschungsprojekt hierzu überwacht ein Kernspintomograph den Eingriff. Die Idee ist bestechend einfach: Der Schall erhitzt den Tumor, bis dessen Zellen absterben. Dazu muss das Gerät die Schallwellen allerdings höchst präzise in den Tumor fokus-

◀ Ohne Physik und Hightech wären medizinische Zukunftsvisionen wie das Exoskelett eLEGS, mit dem Rollstuhlfahrer wieder laufen können, undenkbar. Wie viele andere zurzeit in der Entwicklung begriffenen Exoskelette wird auch eLEGS durch Sensoren gesteuert, die die Bewegungsabsicht des Trägers erkennen können. (Bild: Berkeley Bionics)

➤ Allein mit seiner Stimme kann kein Mensch ein Glas zersingen. Trotzdem kursieren im Internet Videos, die genau das zeigen. Dazu müssen sich mechanische Schwingungen des Glases bis zur sog. „Resonanzkatastrophe“ aufschaukeln; und dafür ist aber vermutlich nicht allein der Schalldruck verantwortlich, sondern vielmehr herstellungsbedingte oder künstlich erzeugte Fehler im Glas. Mit einem Frequenzgenerator und einem guten Lautsprecher kann man aber spielend jedes Glas zersingen. (Bild: © Per Hauberg)

➤ Dieses Laserskalpell operiert mit grünem Laserlicht, das mit einer Frequenz von 532 nm optimal von roten Blutgefäßen und blutreichem Gewebe absorbiert wird. Die Licht-Absorption führt zu einer plötzlichen, explosionsartigen Aufnahme von Energie, die das bestrahlte Gewebe verdampft, ohne dass Blut austritt. (Bild: M.Boeckh/Klinik für Prostata-Therapie, Heidelberg)



sieren. Sonst verkocht es gesundes Gewebe. Leider bewegen sich viele Organe, etwa beim Atmen. Deshalb muss eine aufwendige Software den Schallfokus den Bewegungen des Ziels nachführen.

Auch Laserlicht kann therapeutisch wirken. Schon Anfang der 1960er-Jahre versuchte der amerikanische Hautarzt Leon Goldman, damit Hauttumore zu behandeln. Heute hilft der Laser nicht nur bei Hautkrankheiten, sondern b leicht auch Tätowierungen und Altersflecken weg oder verödet Haarwurzeln. Seit den 1970er Jahren entwickelte die Medizinphysik verschiedenste Anwendungen vom Laserskalpell bis zum Laserbohrer für Zähne. Besonders erfolgreich ist der Laser in der Augenmedizin. Hier nutzt man ihn beispielsweise, um eine sich ablösende Netzhaut durch die Pupille hindurch wieder „anzuschweißen“ oder Sehschwächen zu korrigieren.

So haben sich seit Anfang der 1990er-Jahre viele Millionen Menschen ihre Brille „weglasern“ lassen. Die Lasik genannte Methode nutzt aus, dass das Auge zwei Linsen hat: Die gewölbte Hornhaut ist eine davon, die bewegliche Linse die zweite. Die Behandlung setzt an der Hornhaut an: Auf ihr verdampft computergesteuert ein sogenannter Excimer-Laser mit Ultraviolettlichtpulsen eine dünne Schicht. Das korrigiert ihre Wölbung und gleicht damit die Kurz- oder Weitsichtigkeit aus.

Zuvor müssen die Ärzte die lebende, schmerzempfindliche äußere Hautschicht des Auges von der unbelebten Hornhaut ablösen. Dieses Epithel klappen sie während der Operation vorübergehend beiseite. Bei der klassischen Lasik-Behandlung sorgt ein Messer für den Schnitt, beim modernen Femto-Lasik-Verfahren ein spezieller Laser. Er schneidet nicht wie ein Messer, sondern setzt in der

Schnittebene lauter feine Dampfblasen nebeneinander. An diesen lässt sich das Epithel wie an einem Reißverschluss abtrennen. Dabei kann der Laser von vorne durch das Epithel strahlen, ohne es zu schädigen, auch das Augeninnere verschont er. Nur im präzisen Fokus sind seine Infrarotlichtpulse stark genug, um Gewebe zu verdampfen. Sie blitzen nur wenige Femtosekunden kurz auf, also Billionstel Bruchteile einer Sekunde.

Strahlenwaffen gegen Krebs

Nach Röntgens Entdeckung kam die Idee auf, Krebstumore zu bestrahlen. Die heutige Strahlenmedizin hat dafür verschiedene Methoden. Sie kann zum Beispiel Kapseln mit einem radioaktiven Strahler neben dem Tumor für eine gewisse Zeit einpflanzen. Meist bestrahlt sie ihn aber von außen. Die ionisierende Strahlung



INFO

Stimulierende Lebenshilfe

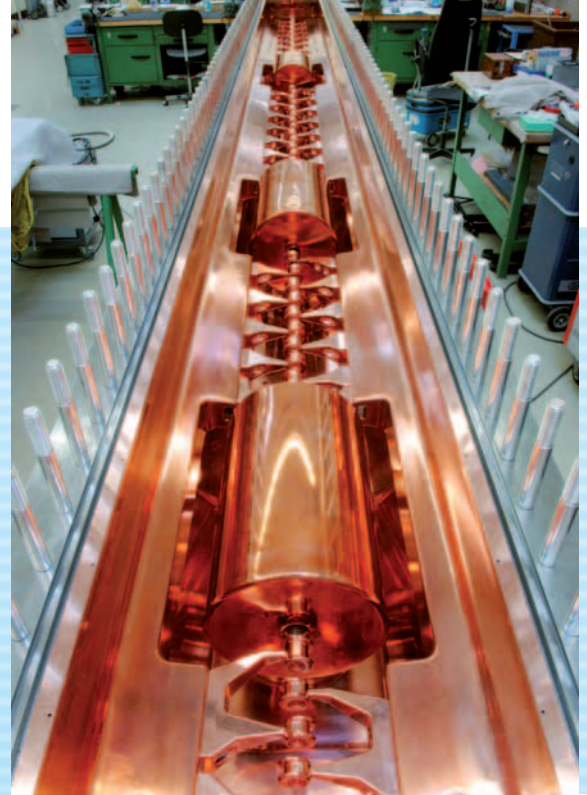
Es gibt Menschen, denen Erkrankungen bestimmter Hirnregionen schwer zusetzen: Parkinson, Essentieller Tremor, Dystonie oder das Tourette-Syndrom zwingen sie zu lästigen Ticks oder unkontrollierten Bewegungen.

Die tiefe Hirnstimulation kann diesen Menschen helfen. Sie reizt die betroffenen Hirnareale elektrisch und dämpft dadurch die Symptome. Im besten Fall schaltet sie diese sogar weitgehend aus, was den Patienten zu mehr Lebensqualität verhilft. Die Geräte besitzen Elektroden, die durch Löcher in der Schädeldecke in die linke und die rechte Hirnhälfte eingepflanzt sind. Gesteuert werden sie über ein unter der Haut verlegtes Kabel von einem kleinen Impulsgeber mit Batterie. Dieser sitzt im Brust- oder Bauchbereich unter der Haut. In Deutschland werden jährlich 400 Patienten solche Geräte eingesetzt. Weil sie ähnlich funktionieren wie Herzschrittmacher, werden sie oft auch „Hirnschrittmacher“ genannt. Das ist aber eigentlich falsch, denn dem Denken machen sie keine Beine. Beim Einsetzen der Elektroden während der Operation müssen die Patienten bei vollem Bewusstsein sein. Sie müssen den Medizinern nämlich durch ihre Reaktion auf bestimmte Testreize dabei helfen, die richtige Hirnregion ausfindig zu machen. Was die elektrischen Reize dort genau bewirken, ist noch unklar – das Gehirn ist eben enorm komplex.

Diese Komplexität zeigt sich auch daran, dass die Hirnstimulation manchmal unerwünschte Nebenwirkungen entfaltet. Einige Patienten sind nach dem Eingriff extrem euphorisch, andere depressiv. Bei manchen verändert sich die Persönlichkeit auf Dauer, was auch ein ethisches Problem darstellt. Für diese Notfälle haben die Entwickler der Geräte eine Aus-Funktion eingebaut, mit der der Träger die Stimulation jederzeit sofort abschalten kann.

◀ Tiefe Hirnstimulation bei Morbus Parkinson: Verlauf der Sonden in Projektion auf den Schädel auf einer Röntgenaufnahme. (Bild: Hellerhoff)

➤ Bei der Ionentherapie ist der Behandlungsraum Teil eines gewaltigen Beschleunigers. Das obere Bild zeigt den Innenteil eines Linearbeschleunigers, der am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum eingesetzt wird. Durch ihn rasen beschleunigte Teilchen bis in den Bestrahlungsplatz in der sogenannten Gantry (unteres Bild). Diese ist eine riesige, um ihre Achse drehbare Strahlführung, mit deren Hilfe der Patient von allen Seiten bestrahlt werden kann. (Oberes Bild: GSI Helmholtz-zentrum für Schwerionenforschung, G. Otto; unteres Bild: Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT))



schädigt den genetischen Code – die DNS – der Tumorzelle. Ist deren Reparatursystem überfordert, dann stirbt sie.

Die Kunst besteht darin, das gesunde Gewebe möglichst nicht zu belasten. Röntgenlicht hat bei der externen Bestrahlung allerdings einen prinzipiellen Nachteil: Beim Beschuss tiefer liegender Tumore kann sie das davor liegende Gewebe schädigen. Das gilt für alle Formen elektromagnetischer Strahlung, auch für die energiereichere Gammastrahlung. Moderne Geräte besitzen deshalb mehrere Kanäle, aus denen sie möglichst schwache Strahlen auf den Tumor richten. Erst dort, wo diese zusammentreffen, entfalten sie eine starke Wirkung.

Bei Teilchenstrahlen aus Beschleunigern funktioniert dies sogar mit nur einem einzigen Strahl. Ein Beispiel sind elektrisch geladene Kohlenstoffatome. Treffen sie auf Gewebe, dann rasen sie ein Stück weit hindurch, ohne es zu schädigen. Erst nach

einer sehr genau berechenbaren Strecke haben sie so viel Energie verloren, dass sie fast schlagartig abbremsen. Dabei deponieren sie nahezu ihre gesamte zerstörerische Energie in einem genau definierten Punkt – mitten im Tumor.

Dieses gutmütige Verhalten macht die [Ionentherapie](#) zum großen Hoffnungsträger. Erste Zielobjekte sind gefährliche Hirntumore, denn im fest fixierbaren Kopf lassen diese sich präzise abstrahlen, ohne das umgebende Areal zu schädigen. Zukünftige Anlagen sollen auch bewegte Organe bestrahlen können. Zwei der weltweit ersten drei Anlagen stehen in Darmstadt und Heidelberg.

Ersatzspieler und Antreiber

Die berühmteste große Zehe aus dem antiken Ägypten ist eine 2700 Jahre alte, liebevoll geschnitzte Prothese. Einst gehörte sie der Priester Tochter Tabaketen-



▲ Prothesen können heutzutage extrem leistungsfähige Hightechprodukte sein. Wie leistungsfähig, das beweist der südafrikanische Athlet Oscar Pistorius. Im Jahr 2011 qualifizierte er sich für die Leichtathletik-Weltmeisterschaft und erreichte mit der südafrikanischen Staffel über 4x400 Meter das Finale. (Bild: picture-alliance / dpa)

➤ Von dem hier abgebildeten vollständig künstlichen Herzen sind bereits mehr als 900 Exemplare erfolgreich implantiert worden. Für ewig ist aber auch dieses Hightech-Produkt nicht – es überbrückt lediglich die Zeit, bis der herzkranke Patient ein gesundes Spenderorgan erhält. (Bild: SynCardia Systems)



mut. Britische Forscher konnten zeigen, dass sie nicht nur einen kosmetischen Zweck hatte. Sie half tatsächlich beim Gehen.

Heute sind Prothesen und Implantate faszinierende Hightech-Stücke aus hochentwickelten Werkstoffen. Der Unterschenkel amputierte [Sprinter Oscar Pistorius](#) zum Beispiel rennt mit federnden Fußprothesen, die seine Energie optimal in Vortrieb umsetzen. Auf Distanzen zwischen 200 und 400 Metern hält der Südafrikaner mühelos mit den weltbesten Läufern ohne Behinderung mit. Der 4-fache Paralympics-Goldmedaillengewinner kämpfte lange darum, gegen nichtbehinderte Sportler antreten zu dürfen: 2011 qualifizierte er sich für die Leichtathletik-WM.

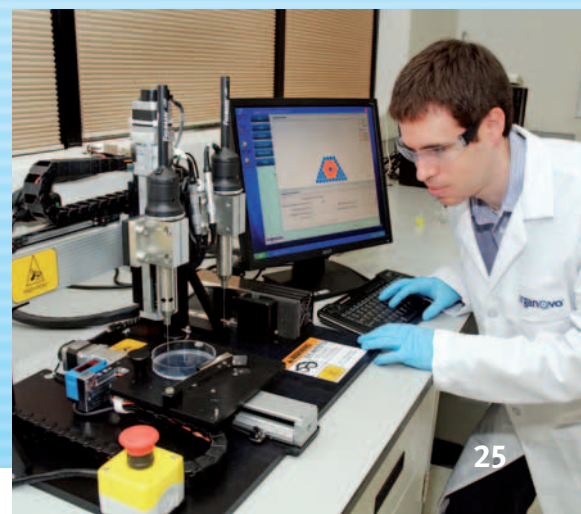
Nicht nur Athleten profitieren von der Materialforschung. Zahnimplantate ermöglichen heute vielen Menschen ein normales Kauen. In der alternden Gesellschaft benötigen immer mehr Senioren Hüftim-

plantate. Diese künstlichen Gelenke aus Titan haben den Nachteil, dass sie die Knochen, in die sie eingesetzt sind, zu sehr entlasten. Sie halten zu viele Kräfte vom Knochen fern, so dass er sich zurückbildet. Die Folge: Nach einigen Jahren lockern sich die Implantate. Düsseldorfer Forscher haben deshalb eine weichere Titanlegierung entwickelt, die besser an Knochen angepasst ist. Wichtig beim Design der komplexen Legierung waren Werkzeuge aus der Quantenphysik.

Physik steckt auch in den Antreibern, die zum Beispiel müde Herzen brauchen. Moderne Herzschrittmacher messen mit ihrer Elektrode die elektrische Aktivität des Herzens. Schlägt es zu langsam, dann stimulieren sie es über diese. Sie können sogar die Schlagzahl des Herzens an die Aktivität ihrer Besitzer anpassen.

Schon lange träumt die Medizin von künstlichen Ersatzorganen. Allerdings zeigt gerade die Geschichte des Kunstherzens,

▼ Spenderorgane sind rar. Was für eine Erleichterung wäre es, wenn man menschliche Organe z.B. in einem Drucker selber herstellen könnte. Diese Technik steckt zwar noch in den Kinderschuhen, hat jedoch mit dem „Bioprinter“ bereits seinen Anfang genommen. Das Gerät kann Gewebezellen in Schichten übereinander drucken und hat auf diese Weise bereits menschliche Adern hergestellt. (Bild: Organovo)



dass die Herausforderung groß ist. Seit Jahrzehnten wird an ihm geforscht. Doch an die Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit echter Herzen kommt es bis heute nicht heran. Deshalb werden [Kunstherzen](#) nur zur Überbrückung eingesetzt, bis ihre Träger ein lebendiges Herz bekommen können.

Intelligente T-Shirts und Exoskelette

Die Körperfunktionen eines Patienten im Alltag zu überwachen ist mit tragbaren EKG-Geräten heute schon möglich. Doch das Tragen der mobilen Messstationen ist alles andere als bequem – Elektroden müssen auf die Brust geklebt werden, Kabel baumeln unter der Kleidung. Wie viel praktischer wäre es da, wenn man seine Alltagskleidung einfach in ein EKG-Gerät umfunktionieren könnte, z.B. in Form eines [intelligenten T-Shirts](#), das man normal anziehen und sogar waschen kann?



INFO

Gehhilfe nach Insektenart

Zu den schlimmsten Einschnitten im Leben gehören Unfälle mit Querschnittslähmung als Folge. Bislang gibt es keine Therapie, die unterbrochene Nervenstränge im Rückgrat wieder heilen kann. Schlaue Technik kann aber den Betroffenen das Leben erleichtern. Ihr größtes Problem ist die eingeschränkte Mobilität, denn unsere Umwelt ist für Rollstuhlfahrer meist ein einziger Hindernisparcours.

26

Aus diesem Grund wurde zum Beispiel in Israel eine Gehhilfe für Querschnittsgelähmte entwickelt. Sie besteht aus einem künstlichen Exoskelett, das an die Beine geschnallt wird. Das natürliche Vorbild solcher Außen- oder Exoskelette sind Insekten. Die möglichst leicht gehaltenen Stützen an Ober- und Unterschenkel haben elektrische Antriebe. Versorgt werden sie von einem Akkupack im Rucksack. Ihr Träger stellt die gewünschte Gangart über eine Fernsteuerung ein. Die größte Herausforderung beim aufrechten Gang ist das Gleichgewicht. Dazu registriert ein Sensor auf der Brust das räumliche Pendeln des Oberkörpers. Noch funktioniert das Gehen nicht ohne die Hilfe von Krücken. Bis Exoskelette einen Moonwalk wie Michael Jackson beherrschen, werden wohl noch Jahre vergehen.

Diese Vision ist heute keine reine Zukunftsmusik mehr. Deutsche Forscher entwickeln bereits ein solches Sensor-shirt – allerdings zunächst nur für Feuerwehrleute. Im Einsatz kommt es immer

◀ Mit Hilfe eines Exoskeletts können Querschnittsgelähmte wieder stehen, laufen und sogar Treppen steigen. Servomotoren bewegen ihre Beine. Bei diesem Modell kommt die Energie von Batterien am Gürtel des Trägers. Kontrolliert werden die Motoren von Sensoren, die aus den Bewegungen des Oberkörpers auf den angestrebten Bewegungsablauf schließen. (Bild: ddp images/AP/Katsumi Kasahara)

► Das Projekt UMIC der RWTH Aachen – ein EKG Shirt, das zusammen mit anderen textilen Überwachungssystemen bereits bei ersten Laufveranstaltungen seine Alltagstauglichkeit unter Beweis stellen konnte. (Bild: Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen)

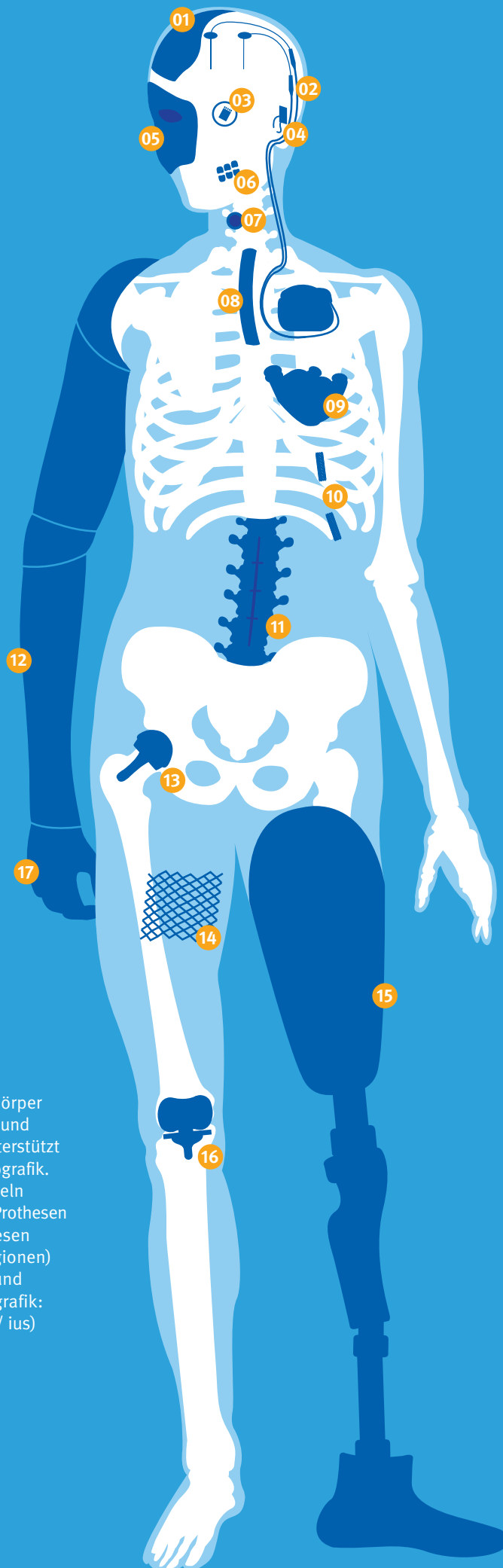


◀ Mischwesen aus Mensch und Maschine wie der von Arnold Schwarzenegger verkörperte „Terminator“ treten wohl noch für längere Zeit lediglich auf der Leinwand auf. (Bild: picture-alliance / Mary Evans Picture Library)

wieder vor, dass diese in der Hitze unter ihrer Schutzkleidung kollabieren. Doch wegen des Rauchs sehen die Kollegen das nicht immer rechtzeitig. Deshalb sollen ihre Hemden in Zukunft permanent ihre Temperatur, Atemfrequenz und Herzschlag zur Einsatzzentrale funken. Intelligentes Garn soll die Signale des Körpers aufnehmen. Die Temperatur wird über den elektrischen Widerstand der leitfähigen Gewebefasern gemessen. Die Überwachung des Atems übernehmen Fasern, die ihre elektrische Leitfähigkeit mit der Dehnung des Brustkorbs verändern. Die größte Herausforderung ist das Erfassen der extrem schwachen elektrischen Signale des Herzens.

Medizinische Hightech-Physik kann auch älteren Menschen helfen, die an Gleichgewichtsstörungen leiden. Im Alter nimmt die Empfindlichkeit der Nerven in den Fußsohlen ab, die wichtig für den Gleichge-

wichtssinn sind. Amerikanische Forscher haben vibrierende Schuheinlagen als Gehhilfe entwickelt. Der Pegel der Vibrationen liegt knapp unter der Reizschwelle der Nerven. Damit heben sie feine Drucksignale über diese Schwelle. Allerdings blendet unser Gehirn gleichmäßige Signale schnell aus. Deshalb vibrieren die Sohlen nach dem Zufallsprinzip. Das mechanische Rauschen verstärkt sogar die erwünschten Drucksignale. Dazu nutzt es einen Resonanzeffekt aus der Physik, die „stochastische Resonanz“. Die vibrierenden Schuheinlagen machen so 70-jährige wieder 50 Jahre jünger – zumindest was den sicheren Stand betrifft. Trotz dieser verblüffenden Erfolge ist der Forschungsweg zu vollwertigen künstlichen Organen und Körperteilen noch weit. Mischwesen aus Mensch und Maschine, wie der „Terminator“ oder „RoboCop“, so genannte Cyborgs, werden noch lange Zeit einzig und allein auf der Kinoleinwand zu finden sein.



- 01 Schädel-Plastik
- 02 Hirnschrittmacher
- 03 Netzhautchip
- 04 Hörimplantat
- 05 Gesichts-Epithese
- 06 Zahnprothese
- 07 Kehlkopfersatz
- 08 Speiseröhren-Stent
- 09 Kunstherz
- 10 Gefäßstütze (Stent)
- 11 Wirbelversteifung
- 12 Armprothese
- 13 Hüftgelenk
- 14 Hautimplantat
- 15 Beinprothese
- 16 Kniegelenk
- 17 Handprothese

Baustelle Mensch

Was alles im menschlichen Körper bereits ausgetauscht, ersetzt und durch technische Bauteile unterstützt werden kann, zeigt diese Infografik. Bei den künstlichen Hilfsmitteln unterscheidet man zwischen Prothesen (ersetzen Körperteile), Epithesen (ersetzen zerstörte Körperregionen) und Orthesen (stabilisieren und entlasten Körperteile). (Infografik: Timo Meyer, Jana Koliotassis / ius)



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2011: Röntgen & Co.“ (Rostock, 27.09. – 02.10.2011), Infos: www.physik-highlights.de

Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Partner



Klaus Tschira Stiftung
Gemeinnützige GmbH



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Wissenschaftsjahr 2011

Forschung für
unsere Gesundheit

Rostock
denkt **365°**



Medienpartner



OSTSEE ZEITUNG
Weil wir hier zu Hause sind