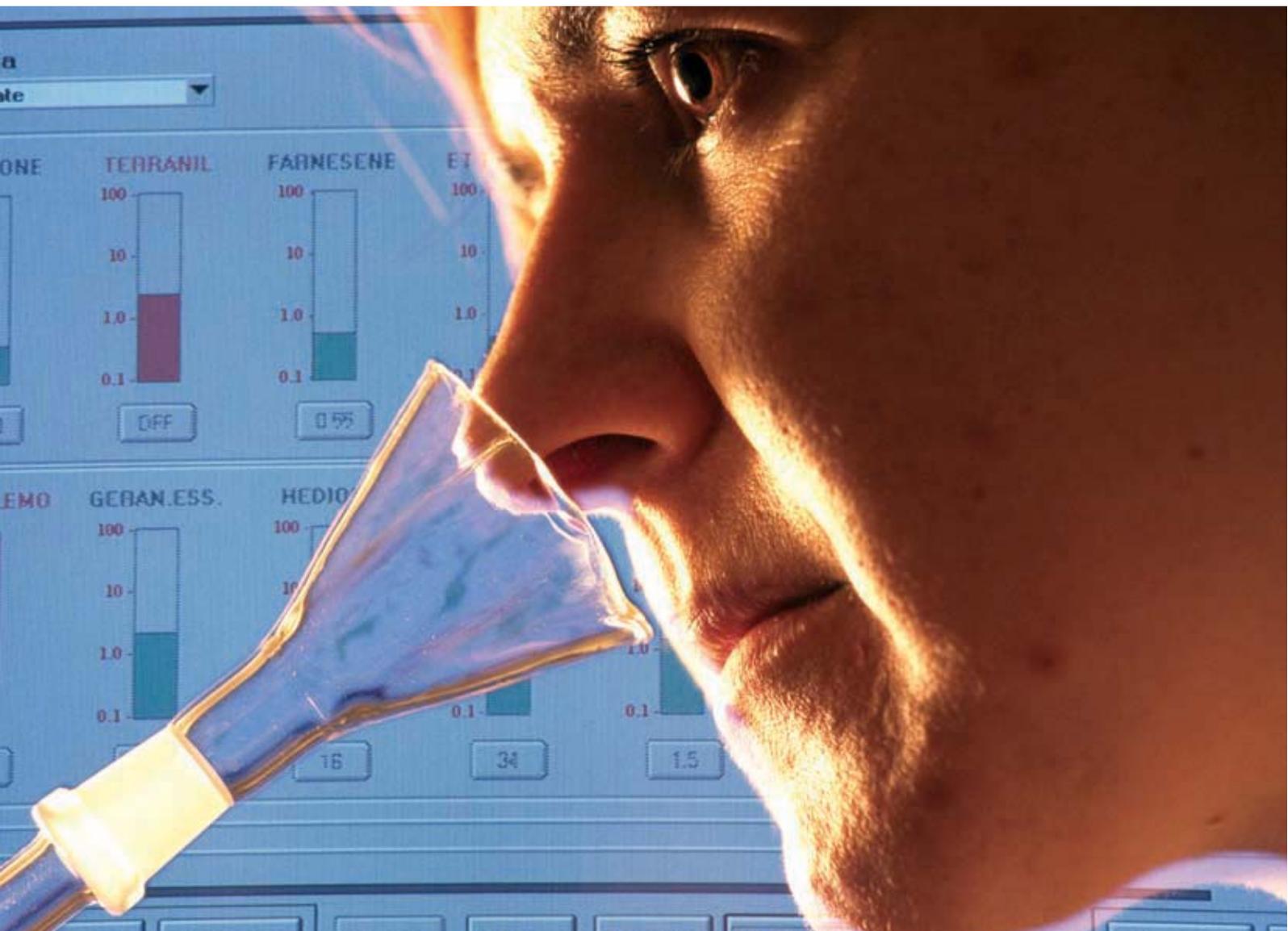




Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Die Erforschung der menschlichen Sinne

Funktionen und Leistungen, Störungen und Therapien



FORSCHUNG

Ideen zünden!

## Impressum

### Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat Öffentlichkeitsarbeit  
11055 Berlin

### Bestellungen

schriftlich an den Herausgeber  
Postfach 30 02 35  
53182 Bonn  
oder per  
Tel.: 01805 - 262 302  
Fax: 01805 - 262 303 (0,12 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)  
E-Mail: books@bmbf.bund.de  
Internet: <http://www.bmbf.de>

### Redaktion

Science&Media,  
Büro für Wissenschafts- und Technikkommunikation, München

### Autoren

Bernhard Epping, Tübingen  
Ernst Peter Fischer, Konstanz  
Judith Rauch, Tübingen  
Heidi Wahl, München  
Susanne Wedlich, München

### Bildredaktion

Carola Reinmuth, Reutlingen

### Gestaltung

Vasco Kintzel, ABling bei München

### Druckerei

FiBo Druck- und Verlags GmbH, Neuried

**Bonn, Berlin 2006**

## Bildnachweis

Titel:

Marc Steinmetz/Visum

Innenseiten:

Agentur Focus: S. 20 o. (C. Kruska), S. 25 r., S. 49 u., S. 71 u. (alle Meckes/Ottawa/Eye of Science), S. 50 (P. Menzel), S. 10, S. 68 (beide SPL); Agri.Tec AG: S. 24 r.; akg-images/British Library: S. 13; bildagentur-online: S. 6 o., S. 14/15; blickwinkel/M. Willemeit: S. 74; Bufo, B./Current Biology: S. 55; Bundesverband Selbsthilfe Körperbehinderter e.V.: S. 46 M.; Carl Zeiss: S. 19 u., S. 21 l., S. 23, S. 24 l.; Caro: S. 6 u., S. 28/29 (Hoffmann), S. 33 o. (Oberhäuser); Das Fotoarchiv: S. 18 u. (A. Buck), S. 48 (M. Matzel); Deutsches Institut für Ernährungsforschung Potsdam-Rehbrücke: S. 56 o., S. 60 o., S. 60 u.; dpa: S. 16, S. 17, S. 26 r., S. 31, S. 44, S. 54, S. 71 o., S. 79 u.; Dreamstime.com: S. 42 (Cpaquin), S. 43 (Showface), S. 59 (Manu1174), S. 61 l. (Anthonyjhall), S. 76 (Heintjelee); FI Online: S. 33 u. (Horizon), S. 66/67 (ASAP); FARINA GEGENÜBER: S. 66 l., S. 67 o., S. 67 u.; Forum Schmerz im Deutschen Grünen Kreuz: S. 46 u.; Friedrich, Brigitte: S. 12; Greune, Jan: S. 22; Heinrich Burghart GmbH: S. 75 u.; Hollander, Franklin: S. 72; images.de/KPA/Hochheimer: S. 47; Kintzel, Vasco: S. 20 u., S. 57; MED-EL Deutschland GmbH: S. 37, S. 38 u., S. 39 r.; mediacolor's: S. 7 M., S. 52/53, S. 56 u., S. 78; Okapia: S. 19 o., S. 25 l., S. 45 o., S. 45 u., S. 46 o., S. 62; Otto Bock Health-Care GmbH: S. 51 l.; Peter Arnold/E. Reschke: S. 61 r.; Privat: S. 18 o., S. 21 r., S. 27 l., S. 35, S. 39 l., S. 75 o., S. 79 o.; Retina Implant: S. 26 l.o., S. 26 l.u.; Sektion Physiologische Akustik und Kommunikation, HNO-Klinik, Universität Tübingen: S. 34 o., S. 36, S. 38 o.; Stock Food/feig/feig: S. 63; Stolt, Matthias: S. 32; Symrise GmbH & Co. KG: S. 58 o., S. 58 u.; Universität Leipzig/Dr. M. Grunwald: S. 51 r.; Universität Tübingen/F. Schäffel: S. 27 r.; vario-images/Chromorange: S. 69; Visum: S. 7 u., S. 64/65 (J. Braun), 34 u. (M. Kerstgens), S. 70 (T. Pflaum), S. 77 r. (B. Euler), S. 77 l. (S. Döring); WDR: S. 8; Weislog, Rainer: S. 7 o., S. 40/41; Westend61/B. Büchner: S. 73.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Die Erforschung der menschlichen Sinne

**Funktionen und Leistungen, Störungen und Therapien**





„Unser Gespräch geht mir nicht mehr aus dem Sinn“, „Liebe macht blind“, „Diese Idee macht mich sprachlos“ – häufig gebrauchen wir in der Alltagssprache Bilder, die mit den Sinnen zusammenhängen. Meistens tun wir das unbewusst. Diese Beiläufigkeit zeigt, wie alltäglich wir auf die Leistungen unserer Sinnesorgane vertrauen. Sie deutet aber zugleich an, unter welch schweren Folgen wir leiden, wenn einzelne Sinne nur noch eingeschränkt oder gar nicht mehr funktionieren.

Gewiss, manche Einschränkung ist unspektakulär. Mit zunehmendem Alter trifft sie fast jeden Menschen. Die Sehkraft lässt irgendwann nach, doch die Lesebrille schafft dann Abhilfe. Die Ohren unterscheiden nicht mehr so gut, wer am großen Tisch gerade das Wort führt – ein winziges Hörgerät kann dann den Alltag erleichtern. Dass derartige Erleichterungen immer besser werden, verdanken wir der Forschung: Der Gesundheitsforschung, der Medizintechnik und nicht zuletzt der spezialisierten Sinnesforschung. Sie hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht.

Obwohl wir aus der physiologischen Forschung bereits vieles über Sinnesleistungen und Sinneskrankheiten wissen, ist ihre Erkundung längst nicht abgeschlossen. Biomedizinische und chemische Methoden eröffnen neue Horizonte und erlauben ungeahnte Einblicke. Die neue BMBF-Broschüre zeigt eindrucksvoll, wie Sehen, Hören, Fühlen, Schmecken und Riechen heute erforscht werden und wie die daraus resultierenden Erkenntnisse den Patientinnen und Patienten zugute kommen: durch präzisere Diagnosen von Krankheiten, durch innovative Verfahren zur Linderung und Heilung, durch zielgenaue Hilfen für den Alltag.

Ich wünsche Ihnen, dass Sie bei der Lektüre der Texte und beim Betrachten der Bilder dieser Broschüre viele neue Erkenntnisse haben!

A handwritten signature in black ink, which reads "Annette Schavan". The signature is written in a cursive, flowing style.

Dr. Annette Schavan, MdB  
Bundesministerin für Bildung und Forschung

# Inhaltsverzeichnis



Impressum	2
Vorwort	5
Inhaltsverzeichnis	6
<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
Sinnesforschung: Von der Suche nach den Fundamenten unserer Wahrnehmung	8
Die Lust auf die Welt	12
<b>Sehen – Am Anfang steht die Welt auf dem Kopf</b>	<b>15</b>
Essen für Schwarzseher	16
Wie funktioniert das Auge?	17
Realität ist nicht immer nur real	18
Wenn das Sehen eingeschränkt ist: Krankheiten und Therapien	19
Gefährliches Souvenir	21
Aus der Forschung: Von Femto-Lasern und Adleraugen	22
Gesucht: die künstliche Cornea	23
Neues Testgerät für Sehschärfe	24
Kurzsichtigkeit – lieber Brille statt Pille	27
<b>Hören – Das kleine, aber feine Reich der Töne</b>	<b>29</b>
Übungen für ein neues Gleichgewicht	30
Wie funktioniert das Ohr?	31
Hörschäden – zu viele oder zu wenige Töne im Ohr	32
Tinnitus-therapie – Den Filter des Gehirns neu programmieren	35
Aus der Forschung: Maßnahmen am Innenohr	36
Für wen ist ein Cochlea-Implantat geeignet?	39

**Fühlen – Empfindungen  
der besonderen Art 41**

- Was Berühren und Spüren so angenehm macht 42
- Wie funktioniert die Haut? 44
- Unter Hautkrankheiten leiden Patienten besonders 45
- Polyneuropathie – Keine Kontrolle über die Füße 47
- Aus der Forschung: Ein neues Gefühl für den Patienten 48



**Schmecken – Eine Frage  
des Geschmacks 53**

- Wie funktioniert die Zunge? 54
- Die Küche des Frühmenschen 55
- Manche mögen einfach keinen Spinat 56
- Bittere statt süßer Erdbeertorte 57
- Geschmack und noch mehr Geschmack 58
- Aus der Forschung: Wie die Zunge die Nahrung prüft 60



**Riechen – Tausende  
Düfte lebenslang speichern 65**

- Orangenblüten kurz nach dem Regen 66
- Wie funktioniert die Nase? 68
- Anosmie oder „Mir fehlt eine Welt“ 69
- Aus der Forschung: Die Karten der Düfte 70
- Wie Sie Ihren Riechsinn trainieren können 73
- Riechstifte helfen Krankheiten erkennen 74
- Dem empfindlichsten Sinn auf die Sprünge helfen 75



**Jenseits der fünf Sinne – Intuition 76**

- Die Reflexe eines Hexers 79

- Anhang 80
- (Internet-)Adressen und Literatur 80
- Register 82

# Sinnesforschung: Von der Suche nach den Fundamenten unserer Wahrnehmung

Die Sinnesorgane lassen uns sehen, hören, riechen, schmecken und fühlen. Jedem der fünf Sinne ist ein Kapitel dieser Broschüre gewidmet. Dabei wird jeweils die Funktionsweise des einzelnen Organs erläutert, die die Wissenschaft zunehmend besser versteht. Wichtige Krankheiten und Therapien sowie der aktuelle Forschungsstand sind weitere Rubriken der einzelnen Kapitel. Der letzte Abschnitt ist der Intuition gewidmet, vom Volksmund oft als 6. Sinn bezeichnet.

Morgens, sobald der Mensch wach wird, beginnt für den Körper die tägliche Höchstleistung. Nachdem in der Nacht der ganze Organismus auf Erholung eingestellt war und alle Systeme auf niedrigem Level gearbeitet haben. Während wir noch im Bett liegen, sind die fünf Sinnesorgane schon wieder aktiv und laufen auf Hochtouren. Vogelgezwitscher oder Straßenlärm, Sonnenschein oder dunkle Wolken, Kaffeeduft oder abgestandene Luft, kalte Füße oder wohlige Wärme sind die ersten Eindrücke, die wir wahrnehmen. Den ganzen Tag über treffen dann bei Auge, Ohr, Haut, Mund und Nase unzählige Reize ein, die es zu sortieren und zu verarbeiten gilt.

Sinnesforschung ist heute nötiger denn je. Denn die menschlichen Sinne stehen wie nie zuvor unter Druck. Reizüberflutung und übergroße Beanspruchung gelten längst als Mitverursacher von steigenden Erkrankungszahlen. So leiden weltweit immer mehr Menschen in den Industriestaaten an Kurzsichtigkeit – als Folge der immer höheren Anforderungen an die Augen vor dem Computer oder Fernseher (siehe das Interview „Kurzsichtigkeit“, S. 27). Beim bislang noch unverstandenen Tinnitus, der den Betroffenen peinigende Ohrgeräusche bereitet und an dem hierzulande Millionen leiden, vermuten Experten einen Zusammenhang mit steigender Lärmbelastung (siehe „Maßnahmen am Innenohr“, S. 32 und S. 36 ff.). Dabei dürften manche Belastungen künftig eher zu- als abnehmen. Und selbst Marketing-Strategen entdecken einen Sinn nach dem anderen. Nach Erkennungsmelodien für Fernsehserien, Klingeltönen für Mobiltelefone und strikt einheitlichen Farben bei medialen Unternehmensauftritten (*Corporate Design*) sowie emotionalen Bildern in der Werbung sind markenspezifische Düfte stark im Kommen (siehe „Orangenblüten kurz nach dem Regen“, S. 66 f.).



*Eine ständige Reizüberflutung und die übergroße Beanspruchung von Augen und Ohren gelten als Mitverursacher von Kurzsichtigkeit und Hörschäden.*

## Die Funktionsprinzipien der Sinnesorgane

Nicht nur die Marketing-Strategen, auch Ärzte und Patienten profitieren von den neuen Erkenntnissen der Sinnesforschung. Denn inzwischen können Wissenschaftler recht klar darstellen, was genau passiert, wenn wir sehen, hören, fühlen, schmecken und riechen. Vereinfacht gesagt funktionieren und arbeiten alle Sinnesorgane nach folgendem Prinzip: In Auge, Ohr, Haut, Mund und Nase treffen Informationen in Form von Reizen aus der Umwelt ein, die zunächst von speziellen Sinneszellen und Rezeptoren des Sinnesorgans empfangen und dann in bioelektrische Signale, sogenannte Aktionspotenziale, umgewandelt werden (Transduktion). Diese Signale werden an die zentralen Verarbeitungsstellen des Gehirns weitergeleitet und dort zu Sinneseindrücken und -wahrnehmungen zusammengesetzt.

Schaut man sich die Sinnesorgane und deren Funktionsweise genauer an, werden die Unterschiede hinsichtlich Reizart, Reizempfang durch Rezeptorzellen, Signalumwandlung und Verarbeitungsbereichen im Gehirn offensichtlich (siehe

**Funktions- und Organisationsprinzipien der Sinnesorgane**

Sinn	Art des Reizes	Reizempfang durch Rezeptorzellen	Umwandlung der empfangenen Reize in bioelektrische Signale	Verarbeitungsbereiche im Gehirn
Sehen	Licht	Fotorezeptoren: Stäbchen (schwarz-weiß), Zapfen (Farben)	Licht (elektromagnetische Wellen) zunächst in biochemische Signale	Visuelles Zentrum (primäre Sehrinde)
Hören	Schall	Haarsinneszellen	Schallwellen zunächst in bioelektrische Signale	Hörzentrum (auditorische Rinde)
Fühlen	Druck, Vibration, Dehnung, Gewebeschäden, Kälte/Wärme	Druck-, Tast-, Schmerz- und Thermorezeptoren	Mechanische Reize zunächst in bioelektrische Signale	Somatosensorische Rinde
Schmecken	Chemische Schmeckstoffe	Geschmacksrezeptoren	Chemische Reize lösen zunächst biochemische Reaktionen aus	Limbisches System
Riechen	Chemische Duftmoleküle	Riechsinneszellen	Chemische Reize lösen zunächst biochemische Reaktionen aus	Riechrinde, Limbisches System

Tabelle S. 9 und Grafik S. 10). Die einzelnen Organe sind für die Wahrnehmung unterschiedlicher physikalischer, mechanischer und chemischer Reize ausgestattet. Das Auge empfängt Licht, das Ohr verarbeitet Schall und die Haut reagiert auf Druck, Vibration, Dehnung, Gewebeschäden sowie Kälte und Wärme. Die Zunge analysiert hingegen chemische Schmeckstoffe und die Nase chemische Duftmoleküle. Mithilfe der Rezeptorzellen werden die Reize in den Sinnesorganen aufgenommen.

Unter einem Rezeptor versteht man auf zellulärer Ebene eine spezialisierte Zelle. Sie bringt äußere und innere chemische oder physikalische Reize in eine verständliche Form für das zentrale Nervensystem, das aus Rückenmark und Gehirn besteht. Auf molekularer Ebene gesehen ist ein Rezeptor eine Zellstruktur, die aus der Oberfläche einer Biomembran herausragt und unterschiedliche Partikel bindet, die in die Zelle eingeschleust werden oder in deren Innerem biochemische Signalprozesse auslösen. Rezeptoren reagieren auf spezifische Reize und sind das erste Glied unserer Sinnesempfindungen. Sinneszellen als Rezeptoren kann man also mit biologischen Sensoren vergleichen.

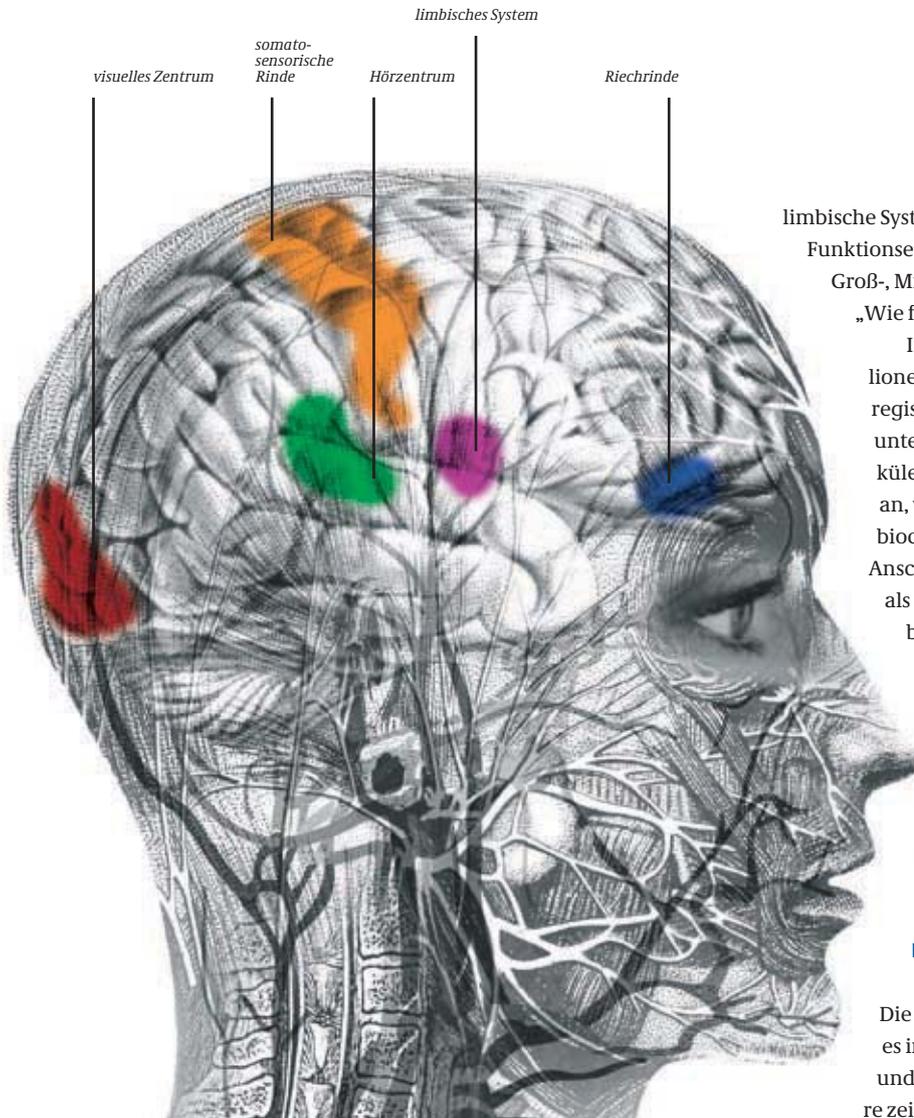
**Signalumwandlung geschieht auf unterschiedlichen Wegen**

Im Auge sind die Fotorezeptoren bzw. Lichtsinneszellen (Stäbchen und Zapfen) auf der Netzhaut für den Empfang des Lichts zuständig. Während die Stäbchen nur hell und dunkel unterschieden können, erfassen die Zapfen je nach Typ einen Farbbereich: rot, blau oder grün. Das eintreffende Licht (elektromagnetische Wellen) wird in den Fotorezeptoren zunächst in chemische und dann in elektrische Signale umgewandelt, die von nachgeschalteten Nervenzellen via Sehnerv an das

visuelle Zentrum (primäre Sehrinde) ins Gehirn geleitet werden. Erst dort werden die Impulse zu dem Bild zusammengesetzt, das wir sehen (siehe auch „Wie funktioniert das Auge?“, S. 17).

Beim Hören spielt das Innenohr eine entscheidende Rolle. Im zur Schnecke (Cochlea) aufgerollten Hörorgan werden die mechanischen Schallschwingungen in bioelektrische Nervenreize umcodiert. Im Inneren der Cochlea liegen auf der Basilarmembran in vier Reihen jeweils drei äußere Haarsinneszellen einer inneren Haarsinneszelle gegenüber. Die äußeren Sinneszellen arbeiten als Verstärker und erregen dadurch die unempfindlicheren inneren Haarsinneszellen. Diese reichen das Signal zu den Fasern des Hörnervs und von dort ins Hörzentrum (auditorische Rinde) im Gehirn weiter (siehe auch „Wie funktioniert das Ohr?“, S. 31).

Beim Fühlen hingegen reagieren verschiedene Typen von Sinneszellen (Druck-, Tast-, Schmerz- und Thermorezeptoren) auf eintreffende Reize. So erkennen die Druckrezeptoren (Vater-Pacini-Körperchen) in der Unterhaut Druckänderungen und Vibrationen, für Dehnungsreize sind vor allem die Ruffini-Körperchen in der Lederhaut zuständig. Tastrezeptoren (Meissner-Körperchen, Merkel-Zellen) kommen in der unbehaarten Haut vor. Besonders dicht sind sie in Fingerspitzen, Lippen, Brustwarzen und den äußeren Geschlechtsorganen. Sowohl die Schmerzrezeptoren als auch die Thermorezeptoren (Krause-Körperchen, freie Nervenendigungen) liegen in der Lederhaut. Während die Krause-Körperchen für die Wahrnehmung von Kälte ausgelegt sind, registrieren die freien Nervenendigungen Informationen über Wärme und Gewebeschäden. In den Sinneszellen der Haut werden die eintreffenden mechanischen Reize in bioelektrische Impulse umgewandelt und dann in die sensorische Rinde des Gehirns geleitet (siehe auch „Wie funktioniert die Haut?“, S. 44).



### Zunge und Nase analysieren chemische Stoffe

Während Auge, Ohr und Haut physikalische bzw. mechanische Reize aufnehmen, nutzen Zunge und Nase chemische Prozesse und die Kombinationen zahlreicher Rezeptoren, um sich in der Vielfalt an Duftmolekülen und Schmeckstoffen zurechtzufinden.

Fünf Geschmacksqualitäten (Süß, Salzig, Bitter, Sauer, *Umami*) kann der Mund erfassen. Werden die Geschmacksrezeptoren auf der Zunge durch chemische Stoffe aktiviert, löst dies zunächst eine biochemische Reaktion aus. Dabei geben die Sinneszellen Überträgersubstanzen (Transmitter) an benachbarte Ausläufer von Nerven. Von dort gelangen die in bioelektrische Impulse umgewandelten Informationen in das

limbische System des Gehirns. Das limbische System ist eine Funktionseinheit in der Gehirnmitte, zu dem Teile des Groß-, Mittel- und Zwischenhirns gehören (siehe auch „Wie funktioniert die Zunge?“, S. 54).

In der Nase liegen zwischen zehn und 100 Millionen Riechsinneszellen, die eingehende Düfte registrieren. Rund 10.000 Düfte kann unsere Nase unterscheiden. Docken genügend Duftmoleküle an den Rezeptoren der Riechsinneszellen an, verursachen diese chemischen Reize eine biochemische Reaktion in den Sinneszellen.

Anschließend gelangen die Riechinformationen als bioelektrische Impulse über die Nervenbündel des Riechstrangs in verschiedene Gehirnteile (Riechrinde, limbisches System mit Mandelkernen, Hypothalamus). Im limbischen System werden die Sinnesindrücke mit Emotionen verknüpft. In der Riechrinde hingegen entsteht aus den eintreffenden Nervenreizen ein bewusster Geruchseindruck (siehe auch „Wie funktioniert die Nase?“, S. 68).

### Forschung zum Nutzen der Patienten

Die größten wissenschaftlichen Erkenntnisse gab es in den vergangenen Jahren bei Auge, Nase und Ohr. Die Forschungsbeiträge dieser Broschüre zeigen, dass neue Therapien beim Ausfall eines Sinnesorgans oft noch schwach oder gar nicht entwickelt sind. Doch auf einigen Feldern hat die Grundlagenforschung in den Laboren zu großen Fortschritten in der klinischen Anwendung und Umsetzung geführt. So gibt das Cochlea-Implantat (CI) heute Ertaubten wieder das Hörvermögen zurück; allerdings nur dann, wenn der Hörnerv noch intakt ist. Wer die Freude eines Implantat-Trägers über die wieder gewonnene Hörfähigkeit und damit über die Teilnahme an Gesprächen erlebt hat (siehe „Maßnahmen am Innenohr“, S. 36), der ahnt, welche Leistungen moderne medizintechnische Produkte erbringen können. Mithilfe von Hightech-Geräten kann die ausgefallene Leistung eines Sinnesorgans ersetzt und anschließend im Gehirn zu einer Wahrnehmung verarbeitet werden. Auch beim Auge rücken Prothesen wie künstliche Sehchips, teilweise sogar mit integriertem Sensor zur Messung des Augeninnendrucks, seit kurzem in Reich-

weite. Insbesondere die Entwicklung der Laser-Technologie hat den Augenchirurgen neue Möglichkeiten eröffnet. Mit einer Laseroperation an der Hornhaut wird immer öfter eine moderate Kurz- oder Weitsichtigkeit korrigiert (siehe „Von Femto-Lasern und Adleraugen“, S. 22 ff.).

### Riechstörungen gelten als privates Problem

Ein echter biologischer Ersatz für zerstörte Sinneszellen in Auge oder Ohr ist leider nicht in Sicht. Dies gilt für die schlechende Zerstörung der Netzhaut im Auge (Retina) durch die altersbedingte Makuladegeneration (siehe „Von Femto-Lasern und Adleraugen“, S. 25) ebenso wie bei Hörschäden. Zwar haben jüngste Entdeckungen von Stammzellen im Innenohr die Hoffnung der Regenerationsbiologen neu belebt (siehe „Maßnahmen am Innenohr“, S. 36 ff.). Aber selbst beim Riechepithel in der Nase oder den Geschmackssinneszellen auf der Zunge – also Gewebearten, die sich von Natur aus permanent erneuern – ist eine therapeutische Regeneration bislang noch ein Wunschtraum.

Diese beiden Sinne gelten ohnehin als vernachlässigt: „Riech- und Schmeckstörungen bleiben ein privates Problem, das gesellschaftliche Interesse ist leider sehr gering“, beklagt der Sinnesphysiologe Thomas Hummel von der HNO-Universitätsklinik Dresden. Ein enormer Verlust an Lebensqualität ist der Ausfall des Riechsinn auf jeden Fall, wie die davon betroffene Susanne Alertz berichtet (siehe „Anosmie“, S. 69).

Ein gesunder Mensch erfährt meist nur in Ausnahmesituationen die immense Bedeutung eines sonst eher unbeachteten Sinneserlebnisses. Essen in der Finsternis macht manche Riech- und Schmeckfreuden erst möglich. Unserer Reporterin fiel beim Dinner in der Dunkelheit der aparte Duft des Kellners auf – eine Note, die sie später im Tageslicht nicht mehr wahrnahm. Das liegt an der typischen Dominanz des Sehsinns beim „Augentier Mensch“ (siehe „Essen für Schwarzseher“, S. 16).

### Individuelle Bilder von der Welt

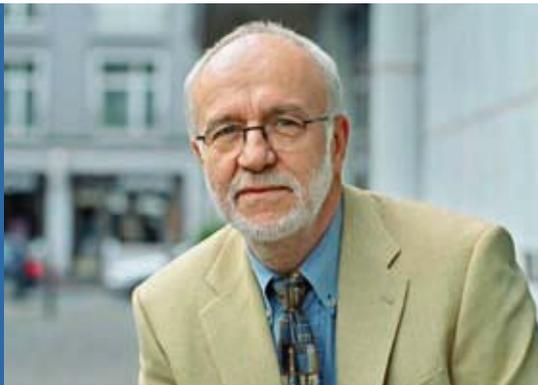
Erfahrbar wird ein Sinneseindruck allerdings nur dank der „Verarbeitungsstation“ Gehirn. Ob Rosenduft oder Sonnenuntergang – die Wahrnehmung entsteht im Kopf. Er schafft jenes Bild, das jeder von uns ganz individuell für sich allein von der Welt entwirft. In Grundzügen steht heute fest, wie das Gehirn Sinneseindrücke ordnet. Es baut auf Karten, um

die Umwelt für sich und damit am Ende für uns, zu sortieren. Im somatosensorischen Cortex laufen alle Tast- und Schmerzreize exakt wieder so zusammen, dass sich dort ein Abbild unseres Körpers bietet. „Homunculus“ taufte der Entdecker, der Kanadier Wilder Penfield (1891-1976), schon in den 1950er Jahren diese Ordnung, also so etwas wie eine Hirnkarte für unsere Selbstwahrnehmung im Raum. Vergleichbare Bauprinzipien sind heute für alle Sinnesmodalitäten beschrieben. Dabei codieren längst nicht alle Karten räumliche Ordnungen. Die Karten des olfaktorischen Cortex stehen für verschiedene Duftqualitäten, wie faszinierende Versuche in den letzten Jahren gezeigt haben (siehe „Die Karten der Düfte“, S. 70 ff.). Und die Karten des auditorischen Cortex entschlüsseln uns Tönhöhen.

Eine besonders faszinierende Erkenntnis lautet: Die im Gehirn gespeicherten Karten sind nicht starr, sondern werden je nach Input, den die einzelnen Sinnesorgane liefern, flexibel angepasst. Meistens zu unserem Vorteil, da Training die innere Repräsentation der Außenwelt verändert. So ist bei Geigern das Areal für Finger und Hand im somatosensorischen Cortex deutlich vergrößert und Blinde hören wesentlich besser als Sehende. Vermutlich auch deshalb, weil bei ihnen Teile des nicht mehr benötigten visuellen Cortex dann einen Anteil der Verarbeitung von Tönen mit übernehmen. Manchmal erweist sich diese Plastizität des Gehirns aber auch als Nachteil. Bei Patienten mit Phantomschmerzen treffen an der Stelle im somatosensorischen Cortex, wo zuvor die Tastempfindungen eines nun fehlenden Armes oder Beines verarbeitet wurden und jetzt quasi Funkstille herrscht, mehr Signale anderer Gliedmaßen ein. Von manchen Forschern wird dies als eine „feindliche Übernahme“ interpretiert, die vielleicht für die Schmerzen verantwortlich ist.

Vergleichende Sinnesforschung bietet jetzt die Chance, den besonders peinigen Phantomphänomen generell ein Stück näher zu kommen. Phantomschmerzen, Geruchshaluzinationen (Phantomsmien siehe „Riechstifte helfen Krankheiten erkennen“, S. 74), abnorme Geschmacksempfindungen (Parageusien siehe „Bittere statt süßer Erdbeertorte“, S. 57) oder Tinnitus, ob Tastsinn, Riechen, Schmecken oder Gehör: Der Ausfall eines Sinns führt immer zu einer Kompensation des Gehirns, das auf fehlenden Input mit „Erfindungen“, also quasi eigenständig produzierten Schmerzen, Gerüchen, Geschmäckern oder Geräuschen reagiert. Die biomedizinische, molekularbiologische und chemische Erforschung der Sinne, das steht fest, hat gerade erst begonnen.

## Die Lust auf die Welt



Erst kürzlich ist der diplomierte Physiker, promovierte Biologe und habilitierte Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer Ordentliches Mitglied der Europäischen Akademie für Wissenschaft und Künste geworden. Neben seiner Professur für Wissenschaftsgeschichte an der Universität Konstanz arbeitet der 59-Jährige als freiberuflicher Wissenschaftsvermittler und Berater etwa für die Stiftung Forum für Verantwortung. Fischer ist zudem Autor zahlreicher Bücher (Werner Heisenberg – Das selbstvergessene Genie, 2001; Die Bildung des Menschen, 2004; Einstein trifft Picasso und geht mit ihm ins Kino, 2005) und Herausgeber von „Mensch und Kosmos“ (2004) sowie „Die Zukunft der Erde“ (2006). Der gebürtige Wuppertaler ist mit der Lorenz-Oken-Medaille (2002), dem Eduard-Rhein-Kulturpreis (2003), der Treviranus-Medaille des Verbandes Deutscher Biologen (2003), dem Sartorius-Preis der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen (2004) und der Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für naturwissenschaftliche Publizistik (2004) ausgezeichnet worden. Von Ernst Peter Fischer stammt das nachstehende Essay.

„Ich weiß,  
dass ich  
wissen will.“

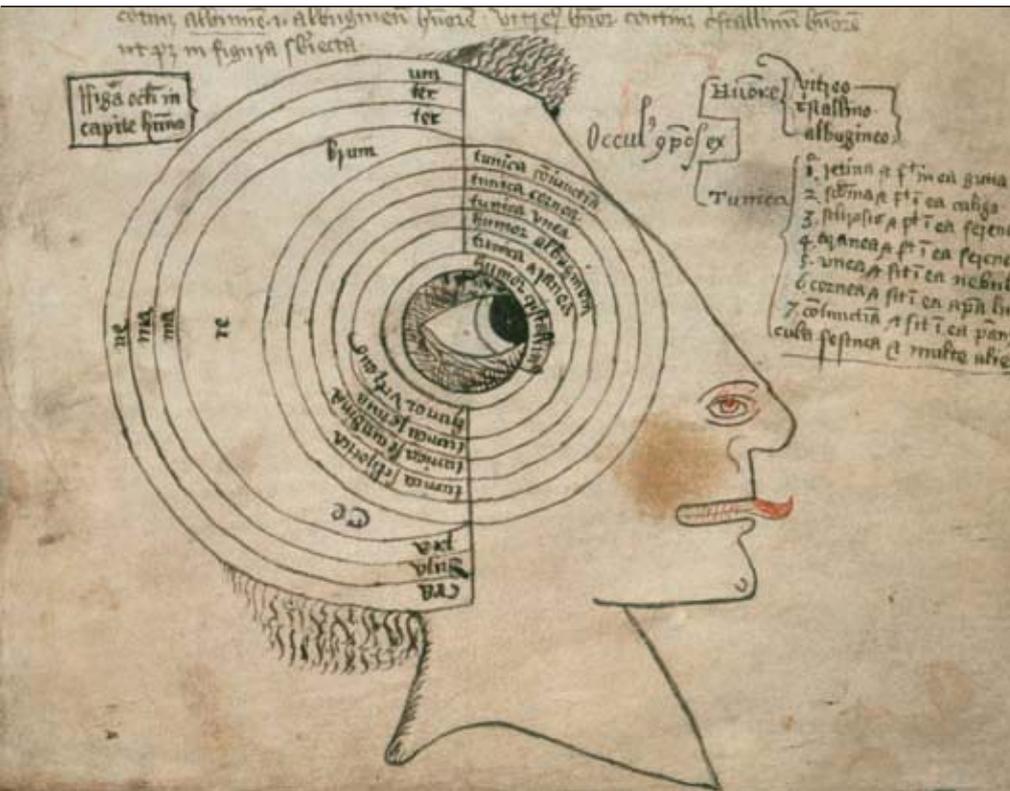
„Ich weiß, dass ich nichts weiß.“ Dieser Satz ist uns von Sokrates überliefert und scheint unschlagbar gut zu sein. Kann es dem großen Denker tatsächlich entgangen sein, dass es doch etwas gab, das er ganz sicher wusste? Er wusste doch, dass er etwas wissen wollte. „Ich weiß, dass ich wissen will“, macht in meinem Verständnis des Abendlandes mehr Sinn. Festgestellt hat das Aristoteles in seiner „Metaphysik“, die mit dem Hinweis beginnt, dass alle Menschen dank ihrer Natur nach Wissen streben. Und wir tun dies – wie Aristoteles erläutert hat und wie jeder Einzelne täglich an sich selbst erfahren kann –, weil wir Freude an der Wahrnehmung der Welt haben. Das größte ästhetische Vergnügen bereitet uns dabei das Sehen, also die visuelle Wahrnehmung der Welt. So ist es kein Wunder, dass dieser Sinn des Menschen am längsten und am besten erkundet ist.

### Sehen historisch betrachtet

In der Antike dachte man, dass Sehen etwa so funktioniert wie Tasten, also dadurch, dass sich dem Auge die Formen eines Gegenstandes mitteilen. Und um diese Information zu bekommen, sendet unser Sehorgan einen Suchstrahl aus. Zwar kommt uns dieser Gedanke heute eher abwegig vor. Aber ganz falsch ist er nicht, wenn die gerichtete Aufmerksamkeit des Betrachters mit zum Sehen gezählt wird. Unabhängig davon geriet der Gedanke des Sehstrahls in die Kritik der arabischen Wissenschaft, die sich dem Auge zuwandte und versuchte, eine Korrespondenz zwischen dem betrachteten Gegenstand und seinem Bild zu finden. Von ihm nahm man an, dass er in der Mitte des Auges zu finden sein müsste.

Der erste Wissenschaftler, der bemerkte, dass dafür die Netzhaut zuständig ist, war Johannes Kepler, der zugleich noch etwas anderes entdeckte. Ihm fiel im 17. Jahrhundert auf, dass sich beim Weg durch die Linse die Orientierung des Lichtes umkehrt: aus oben wird unten und aus rechts wird links. Kepler wusste damit als erster, dass Sehen mehr als ein Auge braucht, und er hatte eine neue Frage für die Wissenschaft gefunden: Wie schafft es der Kopf, das auf der Netzhaut umgekehrt angebotene Bild richtig herum zu sehen?

Es dauerte dann noch einige Zeit, bis klar wurde, dass es überhaupt keinen Sinn macht, nach der Abbildung der Welt auf der Netzhaut zu fragen. Im Kopf kann es niemanden geben, der sie anschaut. Denn um zu verstehen, was und wie dieser hypothetische innere Seher sieht, müssten wir erneut in ihm einen Seher suchen. Doch da der Vorgang an dieser



Diese schematische Darstellung eines unbekanntem Zeichners stammt aus der Zeit um 1500 und zeigt den damaligen Stand der Anatomie des Auges. Zu sehen sind auf der Zeichnung die sieben Häutchen (innen) und drei Säfte (außen) des Auges.

Stelle nicht Halt macht, weil dieser innere Seher wieder einen inneren Seher bräuchte, führt dieser Ansatz nur in eine endlose Reihe... An irgendeiner Stelle auf dem Weg ins Gehirn muss also das Abbilden der Welt unterbrochen werden. Die Konsequenz, mit der die Natur dank der Evolution an dieser Stelle vorgegangen ist, kann nur bestaunt werden. Sie handelt nämlich sofort – bei der ersten sich bietenden Möglichkeit. Was die Netzhaut empfangen kann, sind allein die Lichtpunkte und Flecken, die durch das der Netzhaut vorgeschaltete Nervengestrüpp gedrungen sind, wie man in dieser Genauigkeit seit den 1960er Jahren weiß. Die Konsequenzen daraus sind überraschend. Denn das Bild, das unser Gehirn von der Welt liefert, hat das Nervensystem selbst, haben wir selbst, hergestellt. Das Bild, das wir von der Wirklichkeit sehen, stammt sowohl von außen als auch von innen, also von uns. Wenn wir die Welt sehen, „zeichnen“ wir ein Bild von ihr.

### Die fünf Qualitäten der Sinne

Wer fragt, mit wie vielen Sinnen uns die Evolution ausgestattet hat, wird gewöhnlich „mit fünf“ antworten. Tatsächlich hat man sich im Alltag auf diese Zahl und damit auf die Fähigkeiten des Sehens, Hörens, Riechens, Schmeckens und Fühlens (verstanden als Tasten und Spüren) geeinigt, die durch die außen liegenden Organe Augen, Ohren, Nase, Mund und Haut ermöglicht werden.

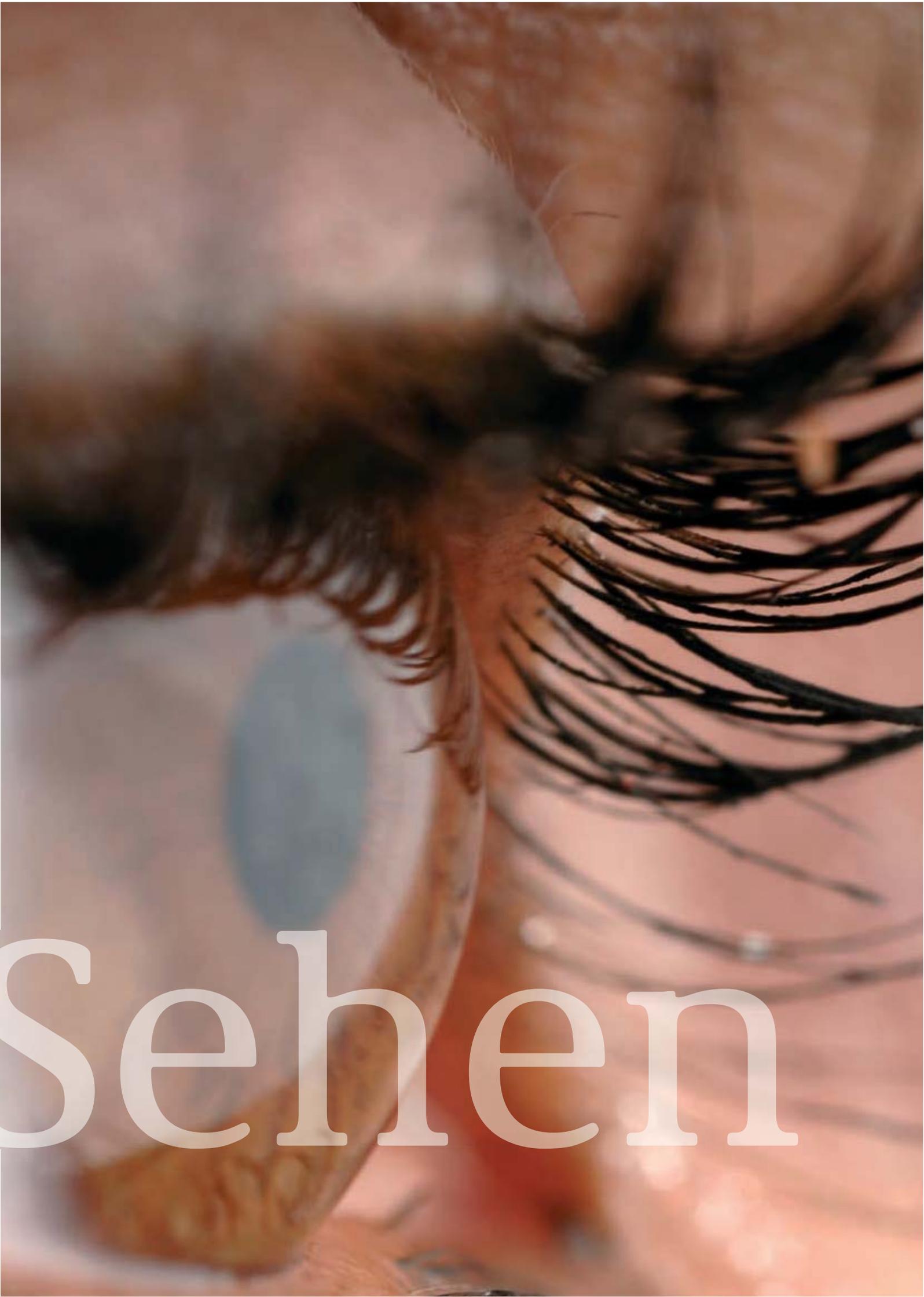
Die Beschränkung auf fünf Qualitäten geht auf antike Gelehrte zurück. Sie interessierten sich für die Frage, die wir bis heute nicht einmal im Ansatz beantworten können, nämlich für die nach dem inneren Ort der außen wahrgenommenen Gegenstände und Sachverhalte. Die antiken Forscher gaben auch eine Antwort, die unmittelbar einleuchtet. Danach müssen die verschiedenen Erfahrungen, die beim Sehen, Hö-

ren, Riechen, Schmecken und Tasten eines Objektes gemacht werden, zusammengeführt werden. Und zwar in einen inneren Sinn, der alle Eindrücke gemeinsam enthält und daher „Gemeinsinn“ heißen könnte. Berühmt wurde diese Idee, als sie im 18. Jahrhundert in die italienischen Worte *sensio comune* gefasst wurde, die im Englischen als *common sense* weiter lebendig blieben. Der *sensio comune* sollte nicht nur das Gemeinsame des Gegenstandes enthalten, sondern auch das für alle Menschen gemeinsame Erkennen darstellen. In dieser Form ist aus dem Gemeinsinn der „gemeine Menschenverstand“ geworden, mit dessen Hilfe wir einen wahrgenommenen Gegenstand beurteilen, ohne über ihn nachzudenken.

### Sinnesforschung hat langen Weg vor sich

Es wäre natürlich schön, wenn die Hirnforscher solch einen *common sense* konkret als einen Nervenstrang finden könnten. Doch im Kopf geht es anders zu als es sich der gesunde Menschenverstand gerne ausmalt. Denn trotz der als selbstverständlich angenommenen Existenz unserer fünf Sinne: Es gibt spürbar mehr von ihnen, und sie alle treffen an anderen Stellen im Gehirn ein. Wir öffnen uns der Welt mit mehr Sinnesorganen als die Gelehrten und andere Autoritäten uns einreden wollen. Wir sind unter anderem in der Lage, Wärme zu empfinden, wir haben ein Gefühl für die eigene Körperlage und wissen selbst dann, wo unsere Füße und Hände sind, wenn wir sie nicht sehen. Wir können das Gleichgewicht halten, wir merken, ob wir beschleunigt oder gebremst werden, wir registrieren Drehungen (bei geschlossenen Augen) und wir sind vor allem äußerst schmerzempfindlich.

Die Erforschung der Sinne hat sowohl eine lange Geschichte hinter als auch einen langen Weg vor sich. Wir werden ihn gehen, denn wir wissen, dass wir mehr wissen wollen.

A close-up, artistic photograph of a woman's face, focusing on her eyes. She has dramatic, dark eye makeup, including thick, black, winged eyeliner and long, dark, curled eyelashes. Her eyes are looking slightly to the right. The lighting is soft and warm, highlighting the texture of her skin and the intensity of her makeup. The background is blurred, showing a hint of a blue circular object.

Sehen

## Am Anfang steht die Welt auf dem Kopf

Die Augen sind wohl das wichtigste Sinnesorgan des Menschen. Wenn sie richtig funktionieren, öffnen sie uns täglich die Tür zur Welt und verschaffen uns vielfältige optische Eindrücke, manchmal sogar visuelle Genüsse. Deshalb sprechen Fachleute vom „Augentier Mensch“, während Dichter die Augen als „Spiegel der Seele“ beschreiben. Ganz neue Erfahrungen können wir machen, wenn der Sehsinn einmal willentlich ausgeschaltet wird: In der fremden Welt, der Welt von Blinden, ist die Orientierung plötzlich ganz schwierig und das Essen wird zur Herausforderung. Künftig können Blinde dank eines Sehchips vielleicht wieder ganz normal sehen. Bereits jetzt gibt es für Augenpatienten viele moderne Behandlungsmöglichkeiten (künstliche Linsen, Laser-Operationen) und technische Hilfsmittel. An neuartigen Diagnoseverfahren und Therapien arbeiten Forscher weltweit.

## Essen für Schwarzseher

**Das Auge isst mit. Bei sehenden Menschen jedenfalls. Was passiert, wenn dieser Sinn ganz gezielt ausgeschaltet wird, können Interessierte bei einem „Essen im Dunkeln“ erfahren. Eine kulinarische Stippvisite in die Welt von Blinden.**

Unser Kellner riecht richtig gut. Sehr viel mehr kann ich über den Mann leider nicht sagen. Ich rieche ihn oft, bevor ich ihn höre. Sehen dagegen kann ich ihn nicht. Schließlich bin ich Gast bei einem „Essen im Dunkeln“ in einem Münchner Hotel. Die Veranstalter haben nicht zu viel versprochen: An die 50 Gäste sitzen hier in absoluter, tiefster, nachtschwarzer Finsternis. Nein, auch nach zwei Stunden haben sich meine Augen nicht daran gewöhnt. Die Kellner dagegen kennen



den Raum. Sie sind blind oder stark sehbehindert und können sich deshalb auf ihre anderen Sinne verlassen.

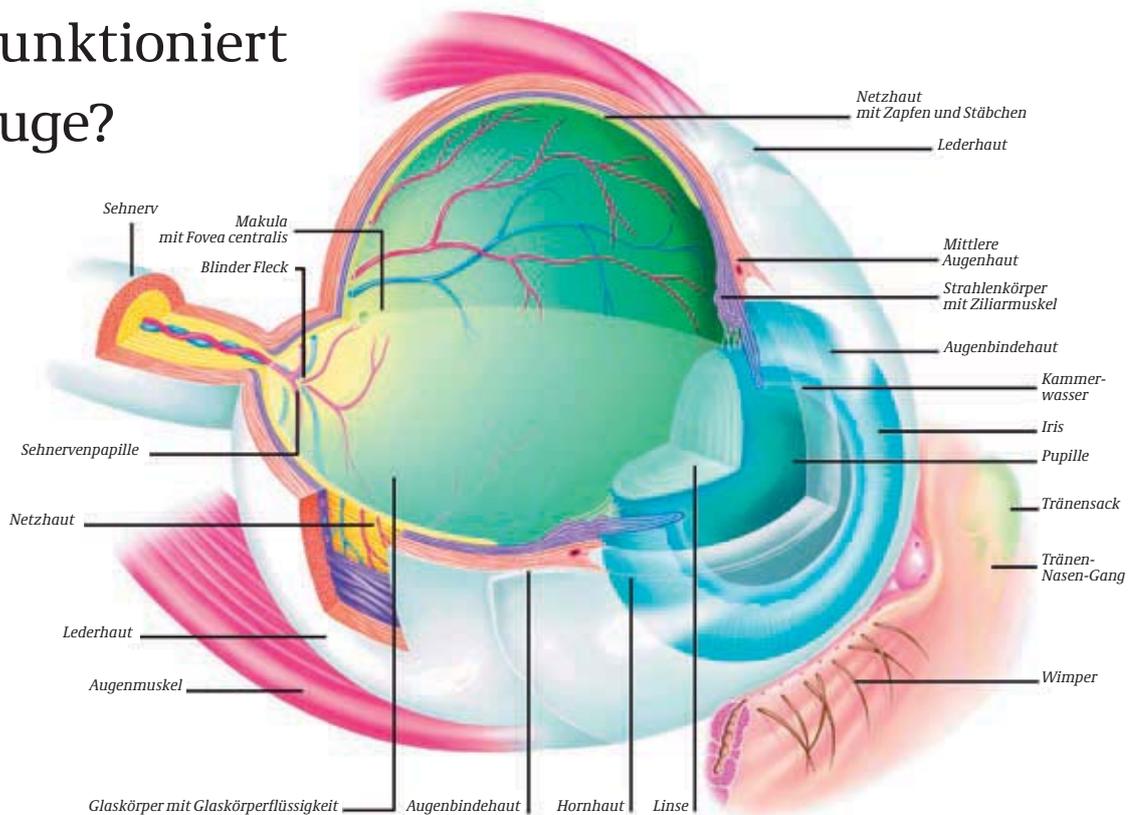
Wir dagegen werden zu Beginn Händchen haltend in den Saal geführt. Ich ahne nicht einmal dessen Größe. Auf dem Weg zu unserem Tisch wird mir dann doch etwas mulmig, weil wir uns im Slalom um ungesehene Hindernisse bewegen – ohne Hilfe käme ich hier so leicht nicht wieder raus. Doch einmal fest auf einem Stuhl verankert, brauche ich nicht lange, die Koordinaten zu ertasten: Der Tisch vor mir ist perfekt eingedeckt, mein Mann sitzt genau zwei Armlängen entfernt, und die Wasserflasche steht leicht versetzt zwischen uns. Einschenken ist auch kein Problem: Ein Finger ist der Pegelmelder.

Die wahre Herausforderung aber ist das exzellente Essen. Wenn ich bloß wüsste, was ich vor mir oder im Mund habe. Aufgelöst wird nämlich erst später. Ich taste und schnuppere und koste mich durch vier Gänge. Mein kulinarischer Höhepunkt ist das vegetarische Hauptgericht. Ein paar Minuten hänge ich wie berauscht über dem Teller. Riechen Kräuter auch so intensiv, wenn man sie sehen kann? Das Gericht ist nicht allzu schwer zu erkennen – auch wenn hier nichts verraten werden soll. Nur der Pseudospargel macht mir ernsthaft zu schaffen. Es ist ein Gemüse, es ist lang, dünn und sehr faserig. Das hört sich an wie Spargel, ist aber keiner. Und auch beim dritten Versuch konzentrierten Kauens und Schmeckens komme ich nicht dahinter. Anschließend beim Dessert wird es ruhig, ganz ruhig im Saal ..... bis hie und da ein spitzer Schrei ertönt: „Minzblatt!“.

Nach dem Essen treffen wir dann in der Lobby all die großen Unbekannten des Abends wieder. Die einzelnen Gänge werden noch einmal präsentiert. Und der Pseudospargel gibt sich endlich zu erkennen – als Stück einer wohl ungewöhnlich milden Frühlingszwiebel. Darauf hätte ich natürlich kommen müssen. Auch unser Kellner gesellt sich zu den Gästen, und ich stelle mich neben ihn. Erst später fällt mir auf, dass ich ihn nicht mehr gerochen habe. Wahrscheinlich war ich zu sehr damit beschäftigt, einfach nur mal zu schauen.

*Im Stuttgarter Dunkelrestaurant „aus:sicht“ werden die Gäste von den blinden Servicekräften Simone (links) und Ute im Stockdunkeln bedient. Vor der Eröffnung des Lokals haben die beiden für den Fotografen geübt – bei minimaler Beleuchtung.*

## Wie funktioniert das Auge?



Es gibt viel zu lernen von den Bienen und den Blümchen. Nicht zuletzt, wenn es um die Anpassung der Sehorgane im Laufe der Evolution geht. So können Bienen ultraviolette Strahlung wahrnehmen, die uns Menschen verborgen bleibt. Manche Pflanzen locken die Insekten nämlich mithilfe von Zeichnungen auf den Blütenblättern an, die eben nur im UV-Licht sichtbar sind.

Aber auch wir Menschen können uns dank unserer Augen gut orientieren. Wir verdanken ihnen mehr als die Hälfte unserer Sinneseindrücke. Wie alle Wirbeltiere verfügt der Mensch über Linsenaugen, den höchstentwickeltesten Typ von Sehorganen. Sehen bedeutet, Licht wahrzunehmen. Unser Sehvermögen umfasst aber nicht das gesamte Spektrum. Wir nehmen nur das für uns sichtbare Licht mit einer Wellenlänge zwischen 380 und 750 Nanometern wahr.

Bis die Strahlung auf die lichtempfindlichen Sinneszellen an der Rückwand des menschlichen Augapfels (Bulbus oculi) trifft, muss sie erst einmal die Augen durchqueren, die gut geschützt in knöchernen Höhlen im Schädel liegen. Die erste Hürde ist die Hornhaut oder Cornea. Ihre wichtigste Aufgabe ist die Lichtbrechung zur Bildfokussierung. Hinter der Cornea liegt die Iris oder Regenbogenhaut, der jeder Mensch seine spezielle Augenfarbe verdankt.

In deren Zentrum befindet sich die Pupille. Wie bei der Blende eines Fotoapparats kann sich diese kreisförmige Öffnung verengen oder weiten und so den Lichteinfall regulie-

ren. Gleich danach treffen die Lichtstrahlen auf die Linse, die das Licht noch mehr bündelt – und zwar mit einer Besonderheit: Der transparente Körper der Linse ist elastisch aufgehängt und kann mithilfe des Ziliarmuskels im Strahlenkörper ihren Krümmungsgrad verändern. Dieser Mechanismus wiederum passt die Brechkraft an und erlaubt die Einstellung auf unterschiedlich weit entfernte Objekte, die Akkommodation.

Hinter dem Glaskörper trifft das Bild dann scharf gestellt, aber auf dem Kopf stehend, auf die Netzhaut oder Retina. Dort erst sitzen die Stäbchen und Zapfen als lichtempfindliche Fotorezeptoren. Sie teilen sich die Arbeit: Während die rund 120 Millionen Stäbchen nur hell und dunkel unterscheiden können, nehmen die etwa sieben Millionen Zapfen immer nur einen Farbbereich besonders gut wahr: je nach Typ rot, blau oder grün.

Die Fotorezeptoren, die die eintreffenden Lichtsignale in elektrische Impulse verwandeln, sind nicht gleichmäßig auf der Retina verteilt. Die nur wenige Quadratmillimeter große Makula (gelber Fleck) ist der Bereich des schärfsten Sehens mit einem besonders empfindlichen Zentrum, der Fovea centralis. Der blinde Fleck schließlich ist die Stelle, an der der Sehnerv aus dem Auge austritt. Dort gibt es weder Stäbchen noch Zapfen. Die Signale der Fotorezeptoren leitet der Sehnerv an die visuellen Zentren des Gehirns weiter. Dort erst werden die Impulse zu dem Bild zusammengesetzt, das wir wahrnehmen.

## Realität ist nicht immer nur real



Die von Computern erzeugte „virtuelle Realität“ und angrenzende Technologien erobern immer mehr Lebensbereiche. Nicht zuletzt Sehbehinderte profitieren davon, wie ein Projekt von Professorin Gudrun Klinker zeigt. Ihr Fachgebiet am Lehrstuhl

für Informatikanwendungen in der Medizin & Augmented Reality der Technischen Universität München ist die „Augmented Reality“.



Mithilfe von Datenbrillen können die Benutzer in computererzeugte, virtuelle Welten eintauchen. Diese Technologie wird vor allem in der Spieleindustrie genutzt, aber auch in Bereichen, wo es um Realitätssimulation geht, wie etwa in der Raumfahrt.

Neben der „virtual reality“ ist zunehmend auch von einer „mixed reality“ und einer „augmented reality“, der „erweiterten Realität“, die Rede. Was sind die Unterschiede?

Die „mixed reality“ ist ein Oberbegriff, der von Paul Milgram geprägt wurde. Er bringt die beiden anderen Konzepte unter einen Hut. Man kann sich das auf einer Achse vorstellen. Auf der einen Seite der Achse steht die reale Welt, die Realität. Auf der anderen stehen computererzeugte, virtuelle Welten, die Virtualität. Dazwischen sind gemischte Welten, in denen virtuelle Information in ein reales Konzept eingebracht wird, die „Erweiterte Realität“ oder „Erweiterte Virtualität“. Bei jeder Anwendung werden sich die beiden Anteile aber ständig ändern. Man kann sich das an einem virtuellen Auto in einem realen Bild vorstellen: Wenn das Auto noch weit weg ist, ist auch der virtuelle Anteil klein. Wenn man aber nah herangeht, sieht man irgendwann nur noch das virtuelle Auto – und der reale Anteil ist fast verschwunden.

An welcher Art von Projekten arbeiten Sie?

Wir arbeiten an einer ganz neuen Art der Kommunikation, bei der Benutzer nicht mehr zum Computer gehen müssen, um Informationen zu erhalten. Vielmehr gelangen die Informationen von selbst zum Benutzer und sind eingebettet in sein reales Arbeitsumfeld. Unsere Projekte sollen Menschen unterstützen, die mit Objekten arbeiten, also unter anderem Fabrikarbeiter an Maschinen, Astronauten oder Besucher in einem Museum – aber auch Ärzte. Das Navigationssystem NAVI etwa übermittelt Blinden und Sehbehinderten Informationen auf einem Bildschirm akustisch oder über Vibrationen. Das war sogar ein besonders interessantes Projekt. Wir haben nämlich gelernt, dass Sehbehinderte nicht immer nur akustische Informationen dazu gewinnen wollen. Weil sie den Hörsinn so stark nutzen, besteht eine Gefahr der Überlastung.

Ist diese Erkenntnis wichtig für Ihre anderen Projekte?

Man kann auch normal sehende Benutzer überlasten. Tatsächlich kommt man jetzt schon oft in einen Grenzbereich. Dann ist eine Anwendung zwar möglich, aber vielleicht gar nicht nötig oder einfach zu viel. Ein Beispiel sind die ausgefeilten Navigationssysteme im Auto: GPS, also eine auf Satelliten gestützte Positionsbestimmung, ist viel einfacher und wäre absolut ausreichend. Es geht also nicht immer nur um Visionen und das, was technisch möglich ist. Man muss auch pragmatisch beim sinnvoll Realisierbaren bleiben.

## Wenn das Sehen eingeschränkt ist: Krankheiten und Therapien

Erkrankungen des Auges treten häufig auf. Bei den meisten Betroffenen mit Weit-, Kurz- oder Alterssichtigkeit können Brillen oder Kontaktlinsen die Sehschwäche ausgleichen. Vielen Augenpatienten kann mit Operationen das Augenlicht erhalten werden, doch manche müssen mit einer visuellen Einschränkung leben.

„Ich hatte gewaltigen Respekt vor der Operation“, erinnert sich Helga Anderka. Fünf Jahre lang hatte die Münchenerin mit dem Gedanken gespielt, ihre starke **Kurzsichtigkeit** per Laserchirurgie behandeln zu lassen. Bei dieser Fehlsichtigkeit ist in den meisten Fällen der Augapfel zu lang, so dass Bilder nicht scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Sehhilfen können das ausgleichen. „Ich habe die Kontaktlinsen aber immer schlechter vertragen“, erinnert sich Anderka. „Und die Brille fand ich vor allem beim Sport sehr unpraktisch. Ein Infoabend zur LASIK-Laserchirurgie hat mich dann aber so beruhigt, dass ich schon zwei Wochen später den Eingriff vornehmen ließ.“

Bei einer solchen Operation (LASIK steht für „Laser-in-situ-Keratomeileusis“, siehe „Von Femto-Lasern und Adlernaugen“, S. 22) wird zuerst die Hornhaut eingeschnitten und aufgeklappt. Ein Laser trägt dann passgenau weiter unten liegende Schichten des Gewebes ab. „Das war der unangenehmste Teil, weil man die verbrannte Hornhaut riecht“, berichtet Anderka. „Das Lasern dauert aber nur ein paar Minuten, und dann wird die Hornhaut wieder zugeklappt. Auf dem Weg nach Hause jedenfalls konnte ich mit bloßem Auge schon Autokennzeichen erkennen, was vorher unmöglich war.“ Nur ein paar Tage lang waren ihre Augen noch lichtempfindlich. Seitdem aber erfreut sich die 35-jährige Lehrerin sogar einer überdurchschnittlichen Sehschärfe.

Einen derart durchschlagenden Erfolg wünschen sich wohl alle Augenpatienten. Doch nur selten gibt es entsprechende Möglichkeiten der Therapie. Bei der **Weitsichtigkeit** etwa macht eine Operation die Brille oder Kontaktlinsen nur in wenigen Fällen überflüssig. Bei dieser Fehlsichtigkeit ist der Augapfel zu kurz, so dass Betroffene die Objekte in der Nähe nicht scharf sehen können. Ähnliche Probleme bereitet die **Alterssichtigkeit**. Hier führt aber die nachlassende Elastizität



Wer weiter weg stehende Bäume unscharf sieht, leidet unter Kurzsichtigkeit. Wie stark eine solche Fehlsichtigkeit ist, kann der Augenarzt feststellen.



Menschen mit einem rot-grün-Sehfehler haben Probleme, wenn sie beim Sehtest mit dem Finger den grünen Punkten im orange-roten Kreis folgen sollen.



Patienten mit einer altersbedingten Makuladegeneration (AMD) haben mitten in ihrem Sichtfeld einen grauen Fleck.

der Augenlinse dazu, dass nur in die Ferne scharf gestellt werden kann. Auch in diesem Fall gibt es Hilfe: die bei älteren Jahrgängen so weit verbreitete Lesebrille.

Die **altersbedingte Makuladegeneration**, kurz **AMD**, tritt wie die Alterssichtigkeit mit zunehmendem Lebensalter gehäuft auf. Die Makula (auch als „gelber Fleck“ bezeichnet) ist ein nur wenige Quadratmillimeter großer Bereich der Netzhaut. Wegen einer besonderen Anordnung der Fotorezeptoren ist sie der Bereich des schärfsten Sehens und für das Erkennen von Details zuständig. Zwei Arten der Makuladegeneration, die trockene und die feuchte, gibt es. Bei der sehr viel häufigeren „trockenen“ Form treten Veränderungen in der Pigmentschicht der Retina im Bereich der Makula auf. Sehr viel schneller – und dramatischer – verläuft in der Regel aber die „feuchte“ Ausprägung. Dabei kommt es zu vernarbenden Schwellungen und der Einwucherung von Blutgefäßen in die Netzhaut. Typisch ist in beiden Fällen ein grauer Fleck im Sichtfeld der Patienten. Die meisten Betroffenen müssen mit einem partiellen oder vollständigen Verlust ihrer zentralen Sehschärfe leben, weil nur selten therapiert werden

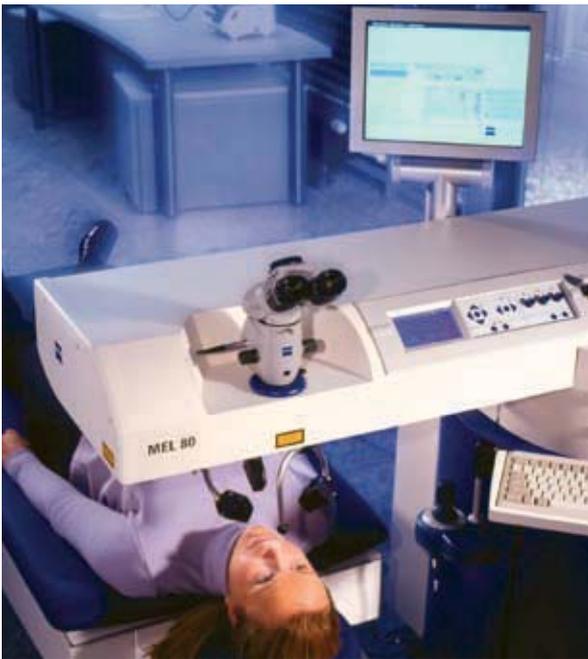
kann. Das bedeutet, dass sie oft nicht mehr lesen, Auto fahren oder Gesichter erkennen können.

Die Betroffenen erblinden aber nicht vollständig, wie es bei einigen anderen Augenleiden der Fall ist. Häufig verursacht wird eine Erblindung durch den **Grünen Star**, das **Glaukom**. Dabei schädigt in den meisten Fällen ein erhöhter Augeninnendruck den Sehnerv. An erster Stelle steht bei diesem oft schleichend verlaufenden Leiden die Senkung des Augeninnendrucks durch Medikamente. Der **Graue Star**, der **Katarakt**, wird dagegen in der Regel operiert.

### **Grauer Star ist häufigste Ursache für Erblindung**

Unter diesem Sammelbegriff werden alle Augenkrankheiten zusammengefasst, die zu einer Trübung der Augenlinse führen, was viele Ursachen haben kann. Bei einem Eingriff wird die getrübbte Linse durch eine Kunstlinse ersetzt. Diese Operation gilt als eines der sichersten chirurgischen Verfahren überhaupt. Trotzdem ist der **Graue Star** weltweit immer noch die häufigste Ursache für Erblindung, weil der Eingriff in gering entwickelten Ländern wegen der unzureichenden medizinischen Versorgung nicht flächendeckend durchgeführt werden kann.

Dagegen ist **Blindheit** bei Kindern oft angeboren oder entwickelt sich in den ersten Lebensjahren, wenn etwa ein Bestandteil des Sehapparates fehlgebildet oder nicht vorhanden ist. In seltenen Fällen ist auch das **Retinoblastom** genetisch bedingt. Dieser bösartige Tumor der Netzhaut tritt vorwiegend in jungen Jahren auf. Bei der Therapie hängen die Chancen auf Heilung und den Erhalt der Sehkraft stark von der Größe der Geschwulst ab. **Augentumore**, aber auch eine starke **Kurzsichtigkeit** und Erkrankungen wie Diabetes mellitus können außerdem zu einer **Netzhautablösung** und



Bei der operativen Behandlung von Patienten mit Fehlsichtigkeiten ist Präzisionsarbeit gefragt. Deshalb arbeiten die Chirurgen mit modernen Lasergeräten.

damit bis zur Erblindung führen. Auch in diesem Fall muss möglichst früh behandelt werden, um das Augenlicht etwa per Laseroperation zu retten.

Nicht alle Augenkrankheiten aber verlaufen potenziell so dramatisch. Die häufigste Sehstörung in der frühen Kindheit beispielsweise ist das **Schielen**. Dabei weicht die Sehachse eines Auges vom fixierten Objekt ab. Mittlerweile wird Schielen so früh wie möglich und meist mithilfe einer Brille behandelt, manchmal ist jedoch eine Operation nötig. Die **Rot-Grün-Sehschwäche** dagegen kann nicht therapiert werden. Dies ist die häufigste der verschiedenen Farbfehlsichtigkeiten. Sie wird oft fälschlicherweise als „Farbenblindheit“ bezeichnet, obwohl dies ein anderes, sehr seltenes Leiden ist. Die Rot-Grün-Sehschwäche ist genetisch bedingt und tritt sehr viel häufiger bei Männern als Frauen auf. Weil die zuständigen Farbrezeptoren nicht oder nicht richtig funktionieren, können die Betroffenen die Farben Rot und Grün schlechter unterscheiden – was im Alltag meist kein großes Problem ist. Nur bei kleinen Jungs können sich Zukunftsträume zerschlagen: Polizist oder Pilot darf man mit dieser Sehschwäche nämlich nicht werden.

## Gefährliches Souvenir



Die Zahlen sprechen für sich: Am Trachom, einer bakteriellen Augeninfektion, leiden weltweit bis zu 400 Millionen Menschen, rund sechs Millionen sind deswegen erblindet. Übertragen wird diese Krankheit am häufigsten durch den direkten Kontakt mit infektiösem Augensekret. Mehr als 17 Millionen

Patienten erkranken an Onchozerkose oder „Flußblindheit“. Wie sich Reisende im tropischen Afrika, südlichen Arabien sowie Zentral- und Mittelamerika vor diesen Krankheiten schützen können, erläutert Johannes W. Grüntzig, Professor für Augenheilkunde und praktizierender Augenarzt in Düsseldorf.

### Was müssen Fernreisende beachten?

Sie sollten Tropfen zum Benetzen und Spülen der Augen sowie ein Antibiotikum mitnehmen. Am besten aber lassen sie sich von einem Tropeninstitut oder einer ähnlichen Einrichtung beraten. Ich empfehle außerdem immer, die genaue Reiseroute in einem Tagebuch festzuhalten. Wurmkrankheiten wie die Onchozerkose machen sich ja erst nach zwei bis drei Jahren bemerkbar. Anhand des Tagebuchs kann der Arzt dann die Reise nachvollziehen und so dem Erreger leichter auf die Spur kommen.

### Welche Augeninfektion spielt in unterentwickelten Ländern die größte Rolle?

Das Trachom ist immer noch am wichtigsten, auch wenn die Vorbeugung und Behandlung verbessert wurden. In diesen Regionen kommt aber immer die Mangelernährung erschwerend hinzu. Wenn etwa Vitamin A fehlt, verlaufen Leiden wie Masern oder die Geschlechtskrankheit Gonorrhoe bei einer Augenbeteiligung schlimmer und können Blindheit verursachen.

### Die Zahlen zur Verbreitung von Infektionen wie Trachom und Onchozerkose schwanken stark. Wie kommt das?

Es ist außerordentlich schwierig, zuverlässige Daten zu erheben. Ich habe selbst in Afrika einen Mann untersucht, der nach offiziellen Angaben sein Augenlicht durch die Flußblindheit verloren hat. Er litt tatsächlich an der Infektion. Blind war er aber, weil ihn eine Speikobra attackiert hatte. Diese Schlangen spritzen eine ätzende Flüssigkeit direkt in die Augen ihrer Angreifer.

## Aus der Forschung: Von Femto-Lasern und Adleraugen

„Wollte mir jemand ein optisches Gerät mit derartigen Fehlern anbieten, würde ich es in aller Deutlichkeit zurückweisen.“ So respektlos hat der berühmte Physiker und Physiologe Hermann von Helmholtz (1821-1894) über das menschliche Auge geurteilt. Wer sich die Fortschritte in der modernen Augenheilkunde (Ophthalmologie) anschaut, gewinnt den Eindruck, Helmholtzs Erben verfolgten eine andere Idee – nämlich die Fehler des menschlichen Auges so exakt wie möglich zu vermessen und so perfekt wie möglich zu korrigieren.



### Der Laser weist den Weg

Insbesondere die rasante Entwicklung der Laser-Technologie hat den Augenchirurgen neue Möglichkeiten eröffnet. Immer öfter wird heute eine moderate Kurz- oder Weitsichtigkeit (bis -8 bzw. +4 Dioptrien) statt mit Brille oder Kontaktlinsen mittels einer Laser-Operation an der Hornhaut (Cornea) korrigiert (siehe „Gesucht: die künstliche Cornea“, S. 23).

Standardverfahren bei der Laserchirurgie ist die LASIK („Laser-in-situ-Keratomileusis“). Dabei wird mit einem Mikroskalpell von der Hornhaut ein dünnes „Deckelchen“, das Flap, abgehobelt und zur Seite geklappt; danach wird das Gewebe darunter mit einem sogenannten Excimer-Laser gezielt verdampft, bis es die gewünschten Brechungseigenschaften hat. Der Flap wird zurückgeklappt und bedeckt nun das heilende Auge wie ein schützendes Pflaster. Eine halbe Stunde dauert die Operation.

Um die LASIK noch schonender zu machen, hat ein neues Gerät Einzug in die Praxen gehalten: der Femto-Laser. In den USA entwickelt, produziert das Gerät ultrakurze Lichtpulse: Eine Femtosekunde ist eine milliardstel Sekunde ( $10^{-15}$  Sekunden). Die kurzen Pulse durchtrennen berührungslos das Hornhautgewebe und ersetzen so das Mikroskalpell.

Pioniere des Verfahrens wie der Kölner Augenarzt Dr. Omid Kermani loben die hohe Präzision des Schnitts. Andere Spezialisten wie Professor Theo Seiler vom Züricher Institut für Refraktive und Ophthalmo-Chirurgie sind kritischer: Bei jedem fünften Femto-Patienten komme es zu einer oft monatelangen Lichtscheu, sagt der Schweizer. Deren Ursache sei noch völlig ungeklärt.

Eine weitere Innovation ist im Kommen: Die LASIK „nach Maß“. Sie soll nicht nur einfache Fehler des Patienten-Auges korrigieren wie die Kurzsichtigkeit oder einen Astigmatismus (dabei ist die Cornea nicht perfekt halbkugelig gewölbt, sondern in einer Richtung leicht in die Länge gezogen). Auch Fehler höherer Ordnung werden beseitigt, also etwa Blendeffekte, wie sie bei geweiteter Pupille durch Unebenheiten in den Randbereichen der Hornhaut entstehen.

Voraussetzung für eine solche maßgeschneiderte Korrektur ist, dass die optischen Eigenschaften der Cornea exakt vermessen werden, besser noch – die des gesamten

*Kurz- oder Weitsichtigkeiten korrigieren Augenärzte immer häufiger mit Laser-Operationen. Standardverfahren ist die hier gezeigte LASIK-Laserchirurgie.*



*Mithilfe von speziellen Operationsmikroskopen können die Ärzte in der plastischen und rekonstruktiven Augen Chirurgie feinste Gewebestrukturen erkennen.*

Auges. Der Heidelberger Physiker Professor Josef Bille hat hier Pionierarbeit geleistet. Sein „Wellenfront-Diagnostiksystem“ schickt Laserstrahlen über 10.000 winzige Spiegel zum Augenhintergrund, das reflektierte Licht wird von 256 kleinen Linsen, den Wellenfront-Sensoren, aufgefangen. Aus den Messdaten wird dann ein Computerprogramm generiert, das bei der „personalisierten LASIK“ den Laser steuert.

Theoretisch können bei solchen maßgeschneiderten Verfahren Sehleistungen erreicht werden, die über die des durchschnittlichen Auges (100 Prozent) hinausgehen; geworben wird mit „Adleraugen“. In der Praxis sieht es momentan so aus: Wenn Augenärzte bei einem Patienten ein Auge nach der Standard- und eines nach der Wellenfront-Methode operieren, können sie hinterher oft überhaupt keinen Unterschied messen. Die Patienten spüren allerdings mehrheitlich, welches Auge besser ist – das maßgeschneiderte.

## Gesucht: die künstliche Cornea

Die Hornhaut kann nicht nur geschliffen werden. Sie wird auch ausgetauscht, wenn sie getrübt oder verletzt ist. Als erster hat der Augenarzt Eduard Zirm im Jahr 1905 die Hornhaut eines Verstorbenen einem Unfallopfer übertragen; heute wird diese Operation in Deutschland rund 4.000 Mal jährlich durchgeführt. Doch da die Wartelisten lang und die Spender knapp sind, suchen Forscher weltweit nach einem Ersatz für die natürliche Cornea. Erfolgsmeldungen kamen zuletzt aus Sacramento (USA), Mestre (Italien) und Erlangen, wo mit Stammzellen experimentiert wird, aus Australien, wo man biokompatiblem Kunststoff verwendet, und aus Kanada, wo eine künstliche Hornhaut mittels Gentransfer im Reagenzglas wuchs. Aber auch die „Aachener Keratoprothese“, entwickelt an der Augenklinik der RWTH, macht von sich reden: Es gibt sie als temporäres Implantat aus Silikon, das ein paar Wochen im Auge bleiben kann. Es gibt aber auch einen Prototyp für den Dauereinsatz. Er verfügt neben dem Silikon-Mittelteil über ein Gestrick aus feinsten Kunststoff-Fäden, welches das Transplantat am Platz hält. Diese Keratoprothese wird derzeit klinisch getestet.

## Neues Testgerät für Sehschärfe

Kurz- und Weitsichtigkeit lassen sich mit einer Brille oder Kontaktlinsen gut korrigieren. Doch zusätzlich können sogenannte Abbildungsfehler höherer Ordnung, die durch Abweichungen von Hornhaut und Linse im Auge hervorgerufen werden, bei einer Sehschwäche eine Rolle spielen. Bislang wurden solche Fehler bei der Anfertigung von Brillen und Kontaktlinsen vernachlässigt. Ein neues Testgerät für die Sehschärfe, der Echtzeit-Phoropter, soll das künftig ändern: Durch ein optimiertes Messverfahren werden die Ursachen einer Sehschwäche präziser als bisher erfasst.

Kernstück des Echtzeit-Phoropters ist ein adaptiver Spiegel, der schon während der Untersuchung die Abweichungen von Hornhaut und Linse ausgleicht, sodass der Patient direkt sagen kann, ob sich sein Sehvermögen bessert. Die Korrektur der Sehschärfe kann so vor der Fertigung einer Sehhilfe simuliert werden. Die Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Jena in einem Forschungsverbund mit dem Kompetenzzentrum der Medizintechnik OphthalmoInnovation Thüringen dieses neuartige Testgerät. Die Entwicklung des adaptiven Echtzeit-Phoropters ist eines von zehn Gewinnerprojekten des Innovationswettbewerbs Medizintechnik 2005 und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

*Abbildungsfehler höherer Ordnung können mit einem Wellenfrontaberrrometer gemessen werden. Dieses Gerät bildet den Grundstock des noch zu entwickelnden Echtzeit-Phoropters.*



*Nach dem Einsetzen einer Intraokularlinse (hier eine Linse mit patentierter Oberflächenstruktur) können Patienten mit Grauem Star (Katarakt) nach der Operation auf die bisher obligatorische Brille verzichten.*

### Linsen mit Sensor

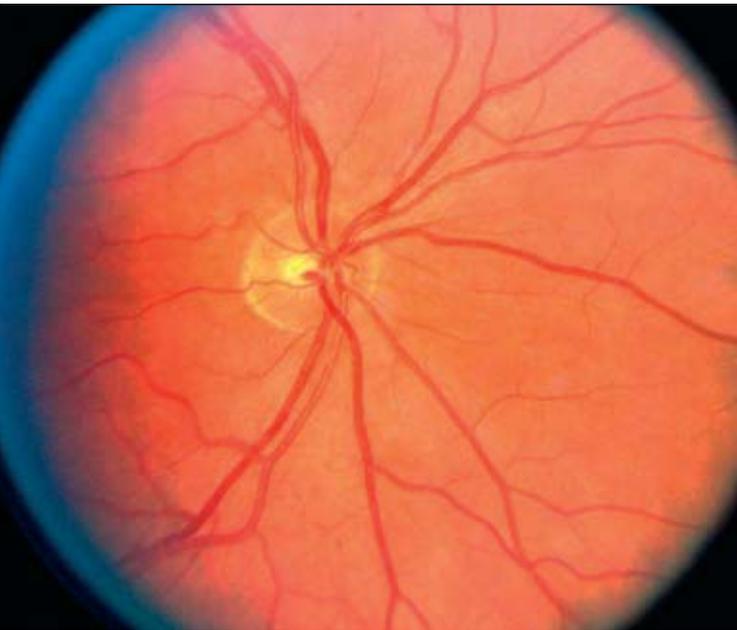
Der Austausch der natürlichen Augenlinse – eine Station weiter hinten im menschlichen Auge – ist ebenfalls längst augenchirurgische Routine. Bei Patienten mit Grauem Star (Katarakt) wird sie in Deutschland jährlich rund 600.000 Mal durchgeführt. Ersatzlinsen gibt es aus verschiedenen harten und weichen Kunststoffen, wobei die weichen faltbar sind und kleinere Operationsschnitte erfordern.

Intensiv wird an einer Linse mit Sensor gearbeitet, die eine andere Augenkrankheit des höheren Lebensalters kontrollieren hilft – den Grünen Star (Glaukom). Bei dieser Krankheit ist der Augeninnendruck erhöht, was zu einer Schädigung des Sehnervs und zur Erblindung führen kann. Entwickelt von der Firma Acri.Tec in Hennigsdorf bei Berlin in Gemeinschaft mit Universitäten und Forschungsinstituten, enthält die neue Linse einen Chip, der permanent den Druck im Auge misst. Die Daten übermittelt er an einen Empfänger, der in eine Brille integriert werden kann. Im Tierversuch hat das Prinzip schon gut funktioniert. Wann allerdings diese Linse auf den Markt kommt, ist noch unklar.

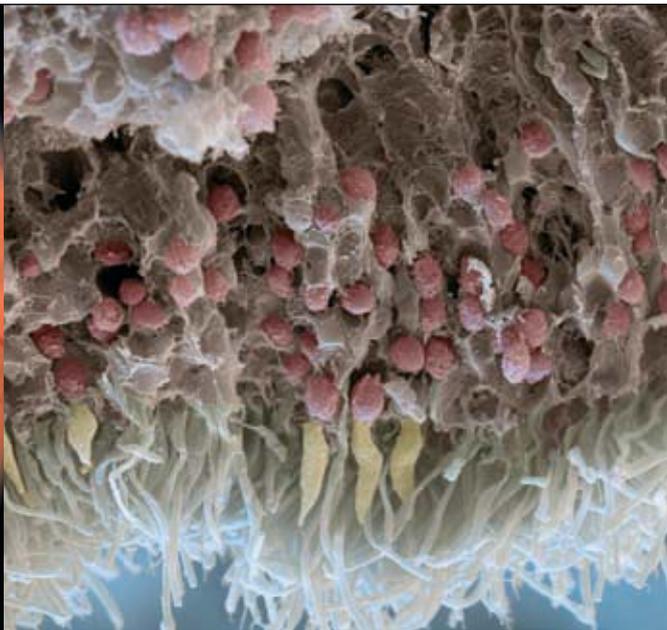
Neu ist auch der Trend, Kunstlinsen zur Korrektur von Fehlsichtigkeiten zu verwenden. Dazu muss die natürliche Linse nicht entfernt werden, man kann eine Zusatzlinse auch vor oder hinter der Regenbogenhaut (Iris) einbauen. Professor Thomas Kohlen von der Augenklinik der Universität Frankfurt empfiehlt solche „phaken Intraokularlinsen“ als Alternative zur Laser-Chirurgie der Cornea, etwa wenn die Patienten zu dünne Hornhäute haben. An seiner Klinik machen solche Operationen bereits 15 Prozent der refraktionschirurgischen Eingriffe aus; an erster Stelle steht freilich auch in Frankfurt die LASIK (80 Prozent).

Bei beginnender Altersweitsichtigkeit und sehr starker Kurz- oder Weitsichtigkeit kommt als dritte Möglichkeit auch ein „refraktiver Linsenaustausch“ infrage – nach derselben Methode, wie sie bei Katarakt-Patienten üblich ist.

Noch Zukunftsmusik ist die Verhinderung der Altersweitsichtigkeit sowie des Grauen Stars – und zwar ebenfalls mit dem Femto-Laser. Beiden Krankheiten liegt nämlich dieselbe biochemische Veränderung zugrunde: Es bilden sich Kollagen-Fasern, also langkettige Moleküle, in der beim jungen, gesunden Menschen noch völlig klaren Linsenflüssigkeit. Die



Eine Schädigung der Augennetzhaut kann die Folge eines schlecht eingestellten Blutzuckerspiegels sein. Diabetiker sollten deshalb regelmäßig ihren Augenhintergrund untersuchen lassen. Das Bild zeigt eine intakte Netzhaut.



Bei diesem Präparat einer menschlichen Netzhaut (Retina) sind neben den Optikus-Ganglienzellen (hellrot), die Kerne der Sinneszellen (rot) sowie die Stäbchenzellen (weiß, am unteren Bildrand) und die Zapfenzellen (gelb) zu sehen.

Fasern nehmen der alternden Linse erst ihre Elastizität und trüben sie schließlich ein. Doch es gibt Hinweise, dass man die Kettenmoleküle mithilfe von Femtosekunden-Laserpulsen gezielt zerstören kann.

Dr. Uwe Oberheide aus Köln geht zusammen mit dem Laserzentrum Hannover e.V. in einer Studie dieser Idee nach. Er konnte jüngst in Versuchen an isolierten Schweine-Augenlinsen zeigen, dass eine Behandlung mit dem Femto-Laser die Elastizität der Linse tatsächlich steigern kann.

#### **Vielseitiger Laser: Diagnose und Therapie der Netzhaut**

Der empfindlichste Teil des menschlichen Auges liegt ganz hinten; dort, wo die Lichtstrahlen, die ins Auge eindringen, zuletzt auftreffen. Es ist die Retina oder Netzhaut. In ihr sind die lichtempfindlichen Fotorezeptoren eingebettet, d.h. die Stäbchen für die Hell-Dunkel-Unterscheidung und die farbempfindlichen Zapfen.

Empfindlich ist die Netzhaut aber auch, weil sie im höheren Alter leicht erkrankt und degenerative Erkrankungen wie Retinitis pigmentosa und Makuladegeneration im Extremfall zur Blindheit führen können. In Europa erblinden jährlich 250.000 Menschen daran.

Damit es gar nicht erst so weit kommt, forscht ein Team um Dr. Dietrich Schweitzer von der Augenklinik der Universität Jena an einem bildgebenden Verfahren zur Früherkennung der altersbedingten Makuladegeneration (AMD). Das Verfahren macht sich die natürliche Fluoreszenz des Augenhintergrunds zunutze. Mit kurzen Laserpulsen werden Netzhautzellen zur Fluoreszenz angeregt; dann wird das extrem schwache Fluoreszenz-Licht mit einer hochempfindlichen Messapparatur aufgefangen. Aus dem Fluoreszenzmuster lassen sich Erkenntnisse über den Stoffwechsel der Netzhaut gewinnen, etwa ob sich dort das gewebeschädliche Pigment Lipofuszin anreichert.

Das Medizinische Laserzentrum Lübeck arbeitet ebenfalls an der Verbesserung einer Therapie, die sich bei der „feuchten Form“ der AMD bereits bewährt hat. Bei dieser Variante der Krankheit bilden sich in der Makula (der Stelle des schärfsten Sehens) kleine Knäuel aus winzigen, unregelmäßig wuchernden Blutgefäßen. Man kann diese Stellen mit einem Laserstrahl gezielt erhitzen, um die Wucherungen zu stoppen. Doch muss bei dieser „transpupillären Thermo-therapie“ die Temperatur so reguliert werden, dass das umliegende gesunde Gewebe geschont wird.

Die Forschergruppe um den Physiker Ralf Brinkmann setzt dazu einen zweiten Laser ein. Dieser schickt während der Behandlung kurze Pulse an die Netzhaut, die wie ein Echo eine leichte Druckwelle auslöst. „Diese können wir über ein Kontaktglas messen, das dem Auge sanft außen aufliegt“, erklärt Brinkmann. Die Stärke des Drucks ergibt ein Maß für die Temperatur.

#### **Kommt der Sehchip für Blinde?**

Die spektakulärsten Experimente in der Augenheilkunde zielen darauf ab, mittels elektronischer Bauteile (Chips) im Auge bereits erblindeten Menschen neue Sehkraft zurückzugeben – eine Idee, die auf die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurückgeht.

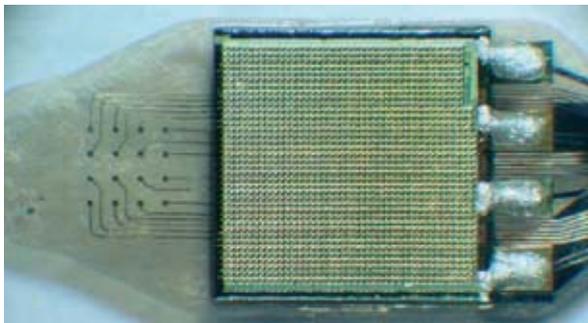
Das BMBF hat in den vergangenen Jahren zwei deutsche Forschergruppen gezielt gefördert, die diese atemberaubende Vision auf unterschiedlichen Wegen verwirklichen wollen. Beide Ansätze, der „subretinale Chip“ aus Tübingen und der „epiretinale Chip“ aus Bonn, befinden sich zurzeit in der klinischen Erprobung an Patienten.

Das einfachere Prinzip liegt dem subretinalen (unter der Netzhaut liegenden) Chip zugrunde, der unter Federführung des Ophthalmologen Professor Eberhart Zrenner entwickelt wurde. Hier ersetzen wie bei einem Kamera-Chip 1.500 winzige

Fotodioden die zerstörten Fotorezeptoren; sie fangen das Licht auf, messen seine Intensität und erzeugen aktiv – wie ein Verstärker – elektrische Signale, die stark genug sind, um die noch intakten Nervenzellen der Netzhaut zu reizen.

Gleichzeitig entwickelte das Bonner Team um den Neuroinformatiker Professor Rolf Eckmiller einen der Netzhaut aufsitzenden (epiretinalen) Chip, der seine Signale nicht durch die Optik des Auges, sondern aus dem Sender einer Kamera empfängt, die der Blinde an einer Brille auf seiner Nase trägt. Erste Verarbeitungsschritte der optischen Information, die normalerweise die Nerven-Zellschicht der Retina leistet, werden dabei umgangen und müssen durch ein lernfähiges Computerprogramm ersetzt werden.

Zwei Herausforderungen stellten sich beiden Teams: Ihre Chips so zu konstruieren, dass sie weder dem Gewebe schaden noch von der biologischen Umgebung selbst geschädigt und somit funktionsuntüchtig werden – letzteres erwies sich als schwieriger.



*Der subretinale Sehchip mit Direktstimulations-Elektroden hat einen Durchmesser von 3 x 3 mm. Das Implantat kann erblindeten Menschen das Sehvermögen zurückgeben.*

*Diese Aufnahme wurde durch Pupille und Netzhaut gemacht und zeigt den unter die Netzhaut eines Patienten implantierten Mikrochip vom oberen Bild.*



*Unter der Federführung des Tübinger Ophthalmologen Professor Dr. med. Eberhart Zrenner wurde ein elektronischer Mikrochip entwickelt, der unter die Netzhaut implantiert wird. Patienten mit einer Netzhautdegeneration kommen so zu künstlichem Augenlicht.*

Inzwischen haben 20 an Retinitis pigmentosa erblindete Patienten das Bonner Implantat ausprobiert. Die dünne Folie wurde ihnen für maximal 45 Minuten ins Auge geschoben. Bei 19 Patienten konnten Sehempfindungen ausgelöst werden. Weitere klinische Studien werden jetzt mit AMD-Patienten durchgeführt. Über die ersten jeweils vierwöchigen Tests an zwei blinden Patienten mit dem subretinalen Chip berichtete Professor Zrenner im März 2006: „Die Implantate wurden gut vertragen, es gab keine Komplikationen.“

Leider funktionierte jedoch der Verstärker nicht, sodass die beiden Blinden nicht mit hoch aufgelösten Originaleindrücken aus der Umgebung gereizt werden konnten, sondern nur mit einem zusätzlich implantierten Stimulator aus lediglich 16 Elektroden. Doch beide konnten damit einzelne und ganze Reihen von Lichtpunkten erkennen. Als „hellen, gelblichen Stab mit abgerundeten Ecken von der Größe eines Streichholzes“ beschrieb einer der Blinden die Reizung durch vier nebeneinander liegende Elektroden.

Einer der Männer, 44 Jahre alt, wollte sein Implantat – so unvollkommen es war – gar nicht mehr hergeben. Die ersten Seheindrücke nach zwei Jahren völliger Dunkelheit waren einfach überwältigend für ihn.

Vielleicht hätte Hermann von Helmholtz, wäre er erblindet, über das menschliche Auge mit all seinen Fehlern milder geurteilt.

# Kurzsichtigkeit – lieber Brille statt Pille



**Professor Frank Schaeffel ist Biophysiker und forscht an der Universität Tübingen zur Entstehung der Kurzsichtigkeit (Myopie). An ihr leidet im Westen jeder Dritte.**

**Für Ihre Experimente setzen Sie Hühnchen Brillen auf. Was lernen Sie dabei über die Entstehung der menschlichen Kurzsichtigkeit?**

Um den Einfluss des Sehens auf das Augenwachstum zu studieren, sind Hühner das optimale Modell. Damit fanden wir 1987 heraus, dass das Längenwachstum des Auges extrem genau gesteuert wird, und zwar durch die Lage der Schärfenebene auf der Netzhaut. Durch das Vorsetzen einer Zerstreuungslinse, die das Bild hinter der Netzhaut auftreffen lässt, wächst das Auge schneller und wird kurzsichtig. Eine Sammellinse stoppt dagegen das Wachstum. Es liegt also ein geschlossener Regelkreis vor, der visuell gesteuert ist, und so funktioniert das im Prinzip auch beim Menschen.

**Kurzsichtigkeit nimmt in den Industrienationen rasant zu. In Singapur und Hongkong brauchen schon 90 Prozent der Studenten eine Brille. Woran liegt das?**

Auf jeden Fall an Umweltfaktoren, denn der genetische Hintergrund ändert sich ja nicht so schnell. In Taiwan beispielsweise hat sich die Rate der achtjährigen Kurzsichtigen innerhalb von zehn Jahren glatt verdoppelt! Diese fernöstlichen Länder wechseln zurzeit sehr rasch von einem wenig industrialisierten in einen hoch industrialisierten Status über. Was eine viel früher einsetzende und umfangreichere Ausbildung mit viel Naharbeit verlangt; vor allem, wenn viel gelesen wird. Dabei passiert genau das, was unseren Hühnchen mit den Zerstreuungslinsen passiert: Bei Naharbeit stellt sich das Auge nicht perfekt ein, das Bild des gelesenen Textes fällt nicht genau auf die Netzhaut, sondern etwas dahinter – und man vermutet, dass darum das Auge wächst.

**Wie kann man da vorbeugen? Sollen Eltern ihren Kindern den Computer wegnehmen?**

Ob Buch oder Rechner ist eigentlich egal. Entscheidend ist der Abstand. Ein Bildschirm mit großer Schrift, der einen Meter vom Auge entfernt steht, schadet wenig. Auch die Dosis ist wesentlich. Durch Unterbrechungen der Naharbeit kann

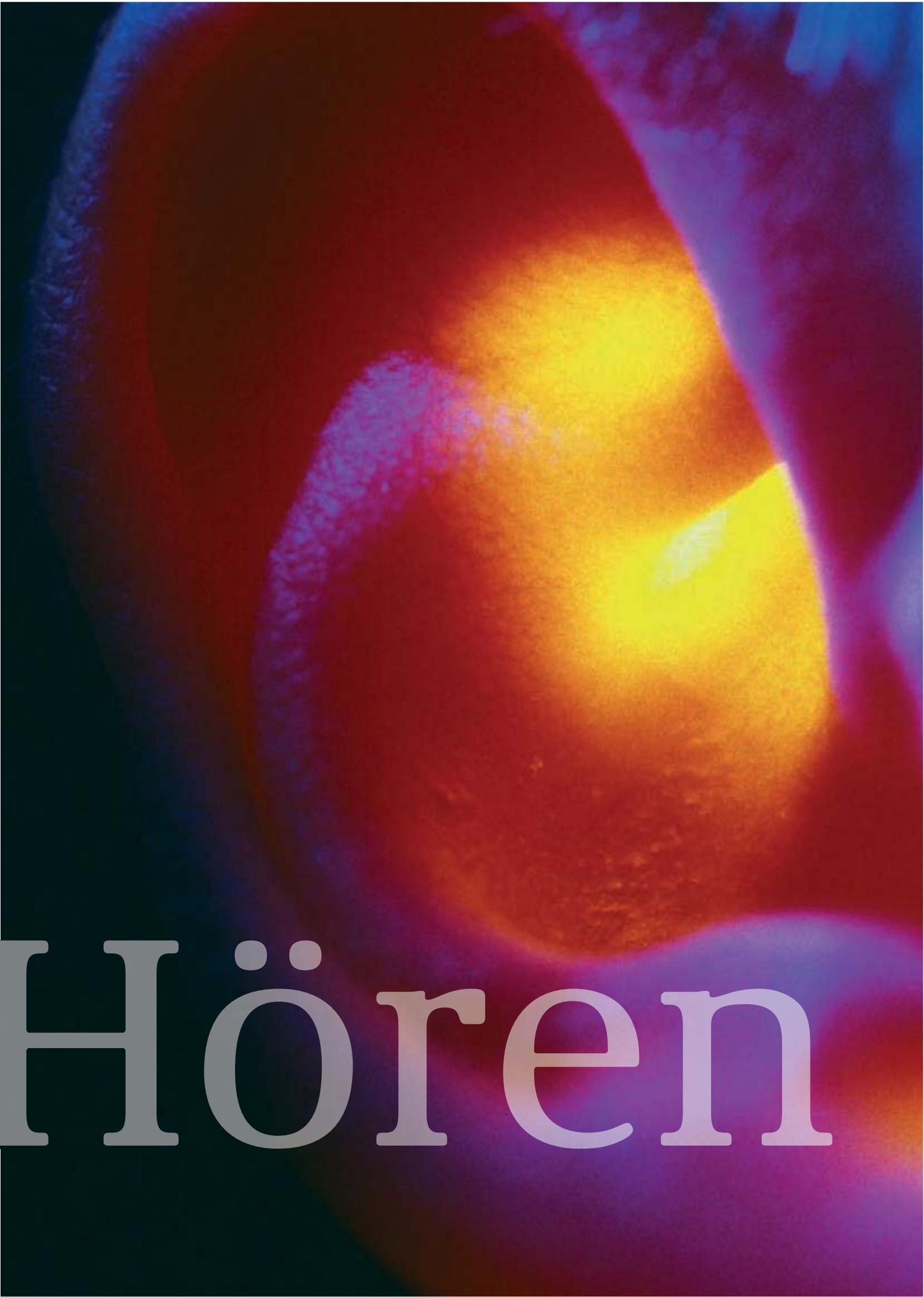


*Wie Sehen das Augenwachstum beeinflusst, untersuchen Tübinger Forscher am Beispiel von Hühnchen, die während der Experimente Brillen tragen.*

man der Myopie-Entwicklung sehr gut vorbeugen, das haben auch unsere Tierversuche gezeigt. Mein Rat lautet also: Alle paar Minuten die Naharbeit unterbrechen und in die Ferne schauen.

**Im Zusammenhang mit Ihren Forschungen ist immer wieder von einer „Pille gegen Kurzsichtigkeit“ die Rede? Gibt es diese Pille schon?**

Leider nein. Die Substanz, die es in klinischen Versuchen am weitesten gebracht hatte, Pirenzepin, hat sich nicht bewährt. Im ersten Jahr war die Kurzsichtigkeitsentwicklung gehemmt, aber die Wirkung ließ dann immer weiter nach. Auch Atropin hilft nicht dauerhaft; vielleicht wurde es bisher auch zu hoch dosiert. Sicherlich macht die Suche nach anderen Wirkstoffen Sinn. Viele Labors, auch unseres, arbeiten daran. Im Moment setzen wir aber auch auf eine raffinierte Brillenkorrektur, um das Augenwachstum zu verlangsamen: auf Brillen, mit denen man nur in der Mitte ganz scharf sieht und die rundherum ein wenig pluskorrigiert sind, sodass man dort etwas kurzsichtig bleibt. Wir vermuten, dass solche Brillen die Myopie weniger vorantreiben würden als die bisherigen Brillen.



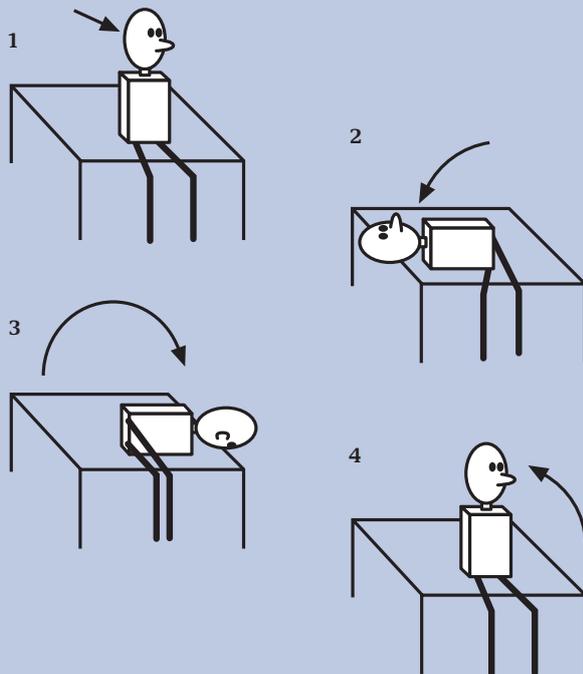
Hören

## Das kleine, aber feine Reich der Töne

„Das Gras wachsen hören“ sprichwörtlich Menschen mit einem ausgezeichneten Hörvermögen. Da unterbricht keine Krankheit oder Gewebeschädigung den Weg von der Ohrmuschel über die Umwandlung der mechanischen Schallwellen in Nervenimpulse und deren Verarbeitung im Gehirn. Wie diese äußerst komplizierten Prozesse im Innenohr ablaufen, haben Forscher in den vergangenen Jahren erkundet. Klar ist inzwischen, dass ein zu hoher Lärmpegel zu nicht mehr heilbaren Hörschäden führen kann. Ertaubte oder massiv schwerhörige Kinder und Erwachsene profitieren von Innenohr-Implantaten, mithilfe derer sie sich wieder unterhalten und sogar Musik hören können. Für Menschen, die nervende Ohrgeräusche (Tinnitus) plagen, suchen Ärzte und Wissenschaftler noch nach den auslösenden Krankheitsursachen und neuen Therapien.

## Übungen für ein neues Gleichgewicht

Schwindelattacken führen bei den Betroffenen oft zu großen Ängsten. Manchmal lässt sich die Ursache aber mit vergleichsweise einfachen Übungen beseitigen oder zumindest lindern.



Manche Gymnastik sieht amüsant aus. Etwa diese (siehe Strichzeichnungen 1 bis 4): Entspannt auf die Bettkante setzen (1), dann blitzschnell mit dem ganzen Oberkörper nach rechts auf den Rücken fallen lassen und unbedingt nach oben gucken (2). Nach zwei Minuten wieder schnell quasi über die Sitzposition hinaus auf die linke Seite stürzen und diesmal mit der Nase platt nach unten auf die Bettdecke gedrückt verharren (3). Nochmals gut zwei Minuten warten, langsam aufrichten (4) und ausruhen. Und jetzt bitte noch mal ...

Wozu das Ganze? „Bei vielen Formen von Schwindel helfen heute gezielte Übungen gut weiter“, weiß Professor Michael Strupp, Leiter der Schwindelambulanz in der Neurologischen Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München. Er trennt präzise zwischen Training für Gesunde und Kranke:

Wer gesund ist, soll Sport machen, sich viel bewegen – und braucht keine Extraübungen für den Gleichgewichtssinn. Strupp: „Den trainieren Sie mit jedem Schritt von Geburt an.“

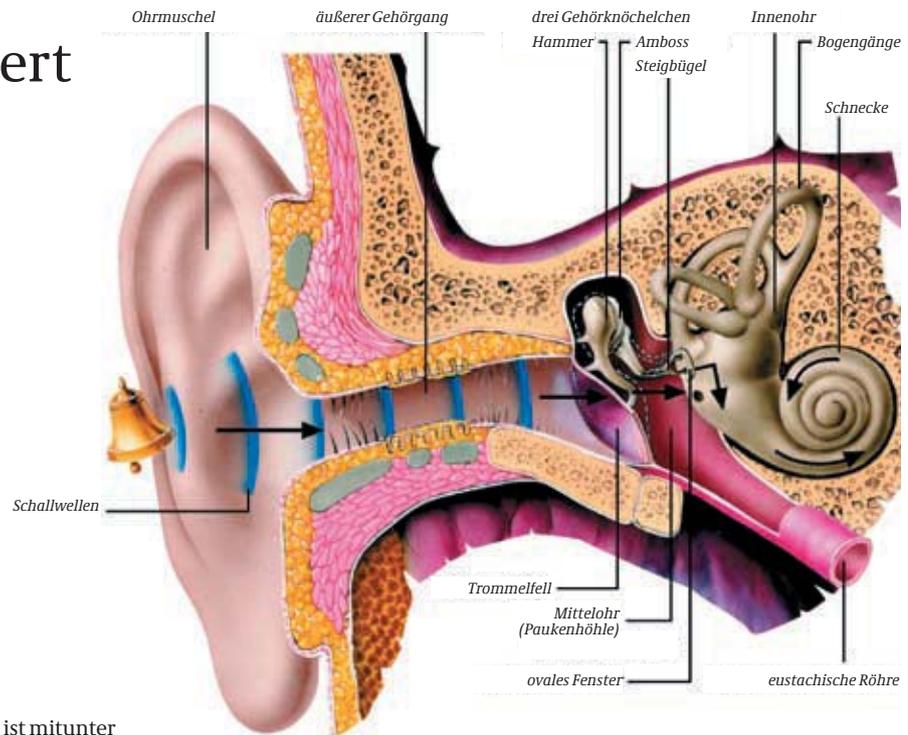
Zu Schwindelattacken kommt es, wenn das Gehirn zu wenig, verwirrende oder falsche Information über unsere Position im Raum bekommt. Dass der eine die Fahrt auf dem Karussell schlechter verträgt als der andere, ist Schicksal, aber harmlos. Schwindel aus dem Nichts mit Sprech- oder Sehstörung ist hingegen ein akuter Notfall, ein Schlaganfall könnte dahinter stecken. Oft liegt die Ursache von reinen Schwindelattacken aber an einer Erkrankung des Gleichgewichtsorgans. Die Diagnose ist heute meist präzise möglich. Aus einem „Sammelsurium“ (Strupp) von 300 Schwindelformen sind rund zehn übrig geblieben, die 90 Prozent aller Schwindelattacken umfassen. Dementsprechend gezielt ist die Behandlung. Bei „phobischem Schwindel“ etwa helfen Psychotherapie und Medikamente gegen die Angststörung.

In vielen anderen Fällen helfen spezielle Übungen. So ist die Gymnastik auf der Bettkante Teil eines Trainings gegen den besonders häufigen, sogenannten gutartigen Lagerungsschwindel. Schuld sind hierbei winzige Gewebeteilchen bzw. Steinchen (Otolithen), die normalerweise im Gleichgewichtsorgan in einer Gallerte auf den Haarsinneszellen der Kupula kleben. Ihre Auslenkung signalisiert den Sinneszellen, dass und wie wir uns gerade bewegen. Bei Lagerungsschwindel haben sie sich gelöst und schwimmen frei in den Bogengängen des Organs herum. Durch spezielle Lagerungsmanöver werden sie wieder hinaus befördert. Strupp: „Fast jeder Betroffene bekommt mit Training die Attacken in den Griff.“

Bei gravierenderen Schäden im Gleichgewichtsorgan können Übungen das Gehirn dabei unterstützen, die fehlende Information durch andere Sinnesinformationen, vor allem von Augen und Tastsinn, zu kompensieren. Bei einem Augentraining gilt es etwa, den Blick an eine Drehtrommel mit vielen wirbelnden Mustern zu gewöhnen. Beugeübungen mit dem Kopf, bei denen der Blick auf einen Punkt fixiert bleibt, helfen einer Restaktivität des Gleichgewichtsorgans auf die Sprünge. Und die Selbstwahrnehmung im Raum lässt sich zum Beispiel trainieren, indem der Oberkörper sacht um die eigene Körperachse hin- und her pendelt. Zu Beginn kann Hilfestellung durch einen Partner nötig sein.

*Eine Kurzfassung von Filmen mit den Übungen ist zu sehen unter: [www.schwindelambulanz-muenchen.de/html/Therapie.htm](http://www.schwindelambulanz-muenchen.de/html/Therapie.htm). Die Filme werden auf Anfrage auch kostenlos verschickt.*

## Wie funktioniert das Ohr?



Das, was wir von einem Organ sehen, ist mitunter noch am ehesten verzichtbar. Beispiel Ohr: Anders als ein Hase, der durch Aufstellen seiner Lauscher die Richtung von Tönen präzise peilt, können Menschen die beiden Ohrmuscheln nicht bewegen. Zum Orten von Schallquellen brauchen aber auch wir vor allem den winzigen Zeitunterschied, den akustische Signale haben, wenn sie um Sekundenbruchteile versetzt zunächst auf das erste und dann auf das zweite Ohr treffen. Notfalls bewegen wir auch einfach ein wenig den Kopf, um die Richtung genauer zu erfassen, aus der zum Beispiel gerade ein Kuckuck ruft.

Beim Hören gewinnen Organismen, vereinfacht gesagt, Informationen aus Schallwellen und den daraus resultierenden Druckänderungen. So drückt die rasche Bewegung der Stimmritzen im Kehlkopf beim Sprechen die Luft für Bruchteile von Sekunden zusammen und wieder auseinander. Mit 340 Metern pro Sekunde breitet sich diese Druckänderung dann in der Luft aus: Das Tempo, mit dem einzelne Luftmoleküle vor und zurück schwingen, macht für uns die Tonhöhe aus. Die Stärke ihrer Bewegung, den Schalldruck, nehmen wir als Lautstärke wahr.

Die erste Aufnahmestation für den Schall liegt bereits im Inneren unseres Schädels. Am Ende des drei bis vier Zentimeter langen äußeren Gehörgangs wird ein aufgespanntes Hautstück, das Trommelfell, in Schwingung versetzt (siehe Grafik). Von hier geht es weiter auf die drei Gehörknöchelchen der Hörkette im Mittelohr: Hammer, Amboss und Steigbügel. Letzterer ist am ovalen Fenster, der Pforte zum Innenohr, aufgehängt. Diese feinsinnige Konstruktion aus Knöchelchen und Membranen hat eine einzige Funktion: den Schall aus der Luft für die Weiterleitung in Flüssigkeit anzupassen. Denn das Innenohr (siehe Grafik) ist mit Flüssigkeit gefüllt. Träfe Schall

aus der Luft direkt auf das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr, würden an die 98 Prozent von ihm reflektiert, weil Wasser einen höheren akustischen Widerstand hat als Luft. Dank Mittelohr landen aber noch 65 Prozent im Innenohr. Möglich wird dies, weil das Mittelohr den Schalldruck auf dem Weg vom Trommelfell mit seiner Fläche von einem halben Quadratmeter bis zum Steigbügel (er hat eine Fläche von gerade noch drei Quadratmillimetern) bündelt und damit enorm verstärkt.

Über die eustachische Röhre, die das Mittelohr mit dem Nasen-Rachen-Raum verbindet, gleichen wir durch Gähnen oder Schlucken den Luftdruck im Mittelohr an den unserer Umgebung an. Verändert sich der sehr rasch, etwa beim Landeanflug eines Flugzeugs, hilft auch ein aktives Öffnen der Röhre: Nase zuhalten und kräftig ausatmen.

Erst das Innenohr ist der entscheidende Ort, wo die Schallschwingungen in elektrische Nervenreize codiert werden. Es besteht aus zwei Teilen: Dem Gleichgewichtsorgan (Bogengänge) und dem zur Schnecke (Cochlea) aufgerollten Hörorgan. In deren Innerem verläuft seitlich das häutige Schneckenorgan. Hier, auf der – ausgestreckt – etwa dreieinhalb Zentimeter langen Basilarmembran, die das Schneckenorgan bis in die Spitze durchzieht, sitzen in vier Reihen jeweils drei äußere einer inneren Haarsinneszelle gegenüber (siehe „Maßnahmen am Innenohr“, S. 36). Sie wandeln vom Schall ausgelöste Vibrationen in elektrische Reize um, die sie an Nervenfasern weitergeben. Insgesamt sind es rund 15.000 Sinneszellen – ein kostbarer Vorrat, denn einmal zerstört, wachsen sie beim Menschen nicht mehr nach.

## Hörschäden – zu viele oder zu wenige Töne im Ohr

**An die drei Millionen Menschen in Deutschland müssen mit einem chronischen Ohrgeräusch leben. Denn die Forschung hat bislang keine echte Erklärung, geschweige denn kausale Therapien gegen Tinnitus. Vielen schwerhörigen und tauben Patienten kann mit Hörgeräten oder mit raffinierten Prothesen geholfen werden.**

Es ist ein Zirpen. „Im Sommer, neben einer Wiese voller Grillen, höre ich es nicht“, sagt sie. Sonst aber ist das Geräusch ihr ständiger Begleiter. Elke Knör hat seit 1991 Tinnitus. Das Geräusch kam von einem Tag auf den anderen, quasi aus dem Nichts – wie so oft bei den Betroffenen. „Ich hatte Stress“, ist das erste, was ihr zur Entstehung einfällt. „Es hat furchtbar geregnet an jenem Abend, als ich überarbeitet von einer Dienstreise zurückkam, um meinen kranken Mann zu pflegen.“ Knör, heute Geschäftsführerin des Selbsthilfeverbands Tinnitus Liga: „Auf einmal hörte ich dieses komische Zirpen.“ Absolute Stille gibt es nicht für Tinnitus-Patienten. Nach

Schätzungen hat jeder vierte Bundesdeutsche schon einmal Ohrgeräusche gehabt. Bei drei Millionen ist es chronisch. Hohe Töne sind häufiger als tiefe, doch es kann auch ein Rauschen sein, ein Zischen, ein Brummen, ein Hämmern, und oft kann sich das Geräusch, vor allem unter Stress, auch ändern, gar lauter werden. Richtig lärmig ist es nach objektiven Kriterien fast nie – oft liegt es mit fünf bis zehn Dezibel nicht weit weg von der Hörschwelle. Handfeste Gründe für Tinnitus sind fast nie auszumachen. Oft entsteht er nach einem Hörsturz, dessen Ursache allerdings bis heute ebenso rätselhaft ist. „Durchblutungsstörungen im Innenohr“ steht in Lehrbüchern als Grund. „Das ist unbewiesen“, meint der Direktor der Tinnitus-Klinik Arolsen, Dr. Gerhard Hesse ([www.tinnitus-klinik.de](http://www.tinnitus-klinik.de), siehe auch das Interview auf S. 35). Fast immer ist Tinnitus Ausdruck eines Hörschadens, denn verblüffenderweise ist die Frequenz eines Tons, den Betroffene hören, oft genau jene, in der sie auch einen Hörverlust haben. Womöglich sind die Geräusche aber auch vergleichbar mit Phantomschmerzen, also eine Reaktion des Gehirns auf fehlenden Input.

*Wenn zu viele Töne, Geräusche und Stimmen auf einen Menschen einströmen, hilft nur eins: Ohren zuhalten oder sich der Lärmkulisse entziehen.*



### Prothesen für lädierte Hörknöchelchen

Dabei ist Tinnitus nur ein prominentes Beispiel für Hörschäden, an denen mit steigender Tendenz rund 16 Millionen Menschen hierzulande leiden. Etwa zwölf Millionen haben eine **Innenohrschwerhörigkeit**, die Verarbeitung des Schalls gelingt nicht mehr richtig. Bei etwa vier Millionen ist die Schallleitung im Mittelohr lädiert. Während es für die letzte Gruppe heute Hilfen in Form raffinierter Prothesen für ausgefallene Hörknöchelchen gibt, bleibt Hilfe für das Innenohr selten. Viel zu wenige, gerade mal drei Millionen Betroffene, nutzen Hörgeräte, beklagt das Informationszentrum „Forum Besser Hören“ der Hörgerätehersteller. Der Grund für die Abstinenz ist allerdings nicht nur das schlechte Image von Hörschäden – jenes ungerechtfertigte, aber zählebende Stigma „Taub gleich dumm“ (*doof* heißt taub im Niederländischen), das immer noch viele dazu bringt, eine **Hörschwäche** möglichst lange zu verbergen.

Menschen mit Defekten im Innenohr hören leiser, was moderne digitale Hörgeräte mit entsprechender Anpassung an den Patienten jedoch gut kompensieren können. Doch bei **Innenohrdefekten** fallen auch wichtige Filterfunktionen des Ohrs aus. Denn das Gehirn nimmt über eine Vielzahl an Nervenbahnen Einfluss auf die Leistung des Ohrs, sorgt zum Beispiel dafür, dass bei massivem Krach gezielt die Sprache des Gegenübers selektiv verstärkt wird. Mit moderner Digitaltechnik versuchen die Hersteller heute in den Hörgeräten solche Prozesse nachzuahmen. „Manche Patienten kommen mit den Geräten, so gut sie auch sind, dennoch nicht besonders klar“, kommentiert Dr. Hubert Löwenheim von der HNO-Klinik der Universität Tübingen.

### Lärm schädigt Sinneszellen im Ohr

Vorbeugen ist auch hier besser als Heilen. Vor allem Lärm schädigt die empfindlichen Haarsinneszellen im Ohr, eine Erkenntnis, die in gesetzliche Grenzwerte gegossen ist – zumindest teilweise. Am Arbeitsplatz gelten seit langem Vorschriften, die durch die EU-Richtlinie „Lärm“ (2003/10/EG) nochmals verschärft wurden. Ab Schalldruckpegeln von durchschnittlich 80 Dezibel ist das Tragen von Ohrstöpseln Pflicht. Doch während die Lärmbelastung während der Arbeit eher rückläufig ist, nimmt der Freizeit- und Verkehrslärm weiter zu. Absolute Stille ist selten geworden. An die 13 Millionen Bundesbürger wohnen nach Erhebungen des Umwelt-



Verkehrslärm und hohe Schalldruckpegel am Arbeitsplatz schädigen die empfindlichen Haarsinneszellen im Ohr. Ohrstöpsel oder Kopfhörer reduzieren die Lautstärke und schützen die Ohren.

bundesamtes hierzulande an so lauten Straßen, dass sie ein Gesundheitsrisiko tragen. Eine Umgebungslärm-Richtlinie (2002/49/EG) der EU soll jetzt dafür sorgen, dass die Belastung in Ballungsräumen und auf Hauptverkehrsrouten kartiert wird, damit Kommunen lärmindernde Maßnahmen planen können.

Schon seit 2000 fordern Umweltbundesamt und Bundesärztekammer auch Grenzwerte für Freizeitlärm – für MP3-Player, in Diskotheken und bei musikalischen Großveranstaltungen. Studien zeigen, dass jeder zehnte Jugendliche beim MP3-Player Beschallungen von bis zu 110 Dezibel mag, die schon nach zehn Minuten zu bleibenden Hörschäden führen können.

Dennoch ist die Gleichsetzung „Immer mehr Lärm, immer mehr Schwerhörige“ zu simpel. Die Zahl der empfindlichen Sinneszellen im Ohr sinkt bei vielen Menschen mit zunehmendem Alter. Damit gibt es in einer alternden Gesellschaft immer mehr Betroffene. Außerdem kann das Hörvermögen nach viralen Infekten oder nach der Einnahme mancher Medikamente nachlassen. Mittlerweile kennen die Forscher an die 200 Gene, deren Ausfall oder nachlassende Aktivität zu Hörschäden und **Taubheit** führen könnte.

In der Praxis bleiben die Ursachen von Hörschäden bis heute für Ärzte und Forscher oft ein Rätsel. „In jedem zweiten Fall finden wir bei Patienten mit plötzlich abnehmender Hörfähigkeit keine Ursache“, bedauert Dr. Joachim Müller von der HNO-Klinik der Universität Würzburg. Hilfe gibt es heute zum Glück dennoch durch ein Cochlea-Implantat, selbst bei völliger **Ertaubung** (siehe „Ersatz für das Innenohr“, S. 37).

Die Verschlechterung der Hörleistung zu stoppen oder gar Hörschäden zu heilen, ist nahezu unmöglich. Auch ein **chronischer Tinnitus** besteht meist ein Leben lang. Akzeptieren und Weghören ist daher Kernpunkt der Therapie. In der Fachsprache heißt das „Wahrnehmungsumlenkung“, das Geräusch soll schlicht in den Höreindruck integriert werden. Elke Knör hat dafür einen besonders wichtigen Tipp: „Lernen, sich etwas Gutes zu tun, dann gelingt der Umgang mit dem Geräusch am besten.“

Weitere Informationen: [www.tinnitus-liga.de](http://www.tinnitus-liga.de)

Kostenlose Erstberatung gibt es unter Telefon 0202/2465274, danach muss man Mitglied werden – auch für weitere ärztliche telefonische Beratung.



In der Sektion Physiologische Akustik und Kommunikation der Tübinger Hals-Nasen-Ohren-Klinik arbeiten die Mediziner nicht nur in den Forschungslaboren, sondern untersuchen und behandeln auch Patienten mit Hörschäden.

Über ein Mikrofon im Ohr hört der Patient bei einer oto-akustischen Emissions-Messung verschiedene Töne. Anhand der Kurven auf dem Bildschirm ist zu erkennen, ob im Innenohr Defekte vorliegen und wie geräuschempfindlich ein Patient ist.

# Tinnitus therapie – Den Filter des Gehirns neu programmieren



**Dr. Gerhard Hesse leitet die Tinnitus-Klinik in Arolsen – das größte deutsche Zentrum für die Behandlung von Menschen, die durch Ohrgeräusche psychische Probleme entwickeln. Hesse gehört dem wissenschaftlichen Beirat der Deutschen Tinnitus-Liga an.**

## Können Sie auch schwer kranken Tinnitus-Patienten helfen?

In 90 Prozent der Fälle: ja. Schwierig ist es, wenn Patienten sagen: „Herr Doktor, ich will eine Pille, damit mein Geräusch verschwindet.“ Das geht nicht.

## Steigt die Zahl der Menschen mit chronischem Tinnitus?

Mit objektiven Zahlen lässt sich das kaum belegen, aber als subjektiv empfundenes Leiden nimmt Tinnitus definitiv zu. Das hat damit zu tun, dass wir älter werden und im Laufe der Jahre einige Krankheiten mehr durchstehen müssen. Und damit, dass wir heute ziemlich gut leben. Ein hungriger Mensch hat gar nicht die Zeit, auf ein Ohrgeräusch zu achten.

## Gibt es einen Zusammenhang zwischen steigender Lärmbelastung und mehr Tinnituspatienten?

Die Spitzenwerte für Lärm in unserem Leben sind eher gesunken. Allerdings steigt die Belastung in der Summe weiter, besonders bei Jugendlichen durch Freizeitlärm. Nehmen Sie die Situation in der Großstadt. Da herrscht heutzutage ein Riesenlärmpegel, der zwar unter den Grenzwerten liegt. Doch der ständige Krach nimmt die Hörwahrnehmung extrem mit. Auch in den Schulen ist es heute sehr, sehr laut.

## Was wissen Sie über die Ursachen von Tinnitus?

Wir haben nur Hypothesen. Am Beginn stehen vermutlich oft Schäden im Innenohr – durch einen Hörsturz oder einen schleichenden Hörverlust. Das Gehirn möchte dann die fehlenden Frequenzen quasi wieder haben und weist das Innenohr an: Liefere mir mehr von dem, was fehlt. 90 Prozent der Patienten haben ein Ohrgeräusch genau in der Frequenz ihres Hörverlusts.

## Gibt es eine Therapie?

Es gibt keine Heilung im eigentlichen Sinne. Leider wird eine Unmenge an teuren und sinnlosen Verfahren mit falschen Versprechen beworben. Akupunktur und Homöopathie haben hier keinen Sinn. Der Nächste rät zu Lasertherapie, zu Ohrkerzen, Reiki-Heilsteinen, Magneten, instabilem Sauerstoff.

## Stichwort Sauerstoff. Als Ursache von Tinnitus gelten Durchblutungsstörungen im Innenohr.

Eine Gefäßverengung könnte höchstens vorübergehend dazu führen, dass es an Lymphe im Innenohr fehlt und Haar sinneszellen falsch arbeiten. Doch das ist unbewiesen.

## Es gibt eine Therapie mit Sauerstoff in der Druckkammer.

Das könnte geschwellenen Sinneszellen helfen. Es fördert die Energieversorgung des Innenohrs, hilft aber höchstens im akuten Stadium, maximal ein bis zwei Wochen nach erstmaligem Auftreten eines Ohrgeräuschs oder einer Hörminderung. Aber wirklich genau weiß das keiner.

## Was sind sinnvolle Behandlungen?

Als Erstes zum HNO-Arzt gehen und einen Hörtest machen. Bei akuter Hörminderung oder akutem Tinnitus kann bei manchen Patienten eine Infusionstherapie mit einem Plasmaexpander gemacht werden. Ein wichtiger Faktor dabei ist aber die Ruhepause, man hat die Chance für einige Stunden vom Stress runter zu kommen. Um mögliche Schwellungszustände von Haarzellen zu behandeln, eignet sich Cortison. Es kann als Tablette gegeben werden.

## Steckt Stress hinter der Erkrankung?

Betroffene berichten zwar immer wieder von einem Zusammenhang. Aber wir müssen uns hüten, da Ursachen hinein zu interpretieren, nur weil wir die eigentlichen Gründe für Tinnitus nicht kennen.

## Wann kommen neue Therapien?

Das wird leider noch dauern und wäre überhaupt nur durch eine Gentherapie denkbar. Die größten Chancen sehe ich derzeit im richtigen Umgang. Das Gehirn hat erstaunliche Fähigkeiten, einen manifesten Tinnitus wieder wegzufiltern. Durch Training können fast alle Patienten lernen, ihren Tinnitus zu überhören.

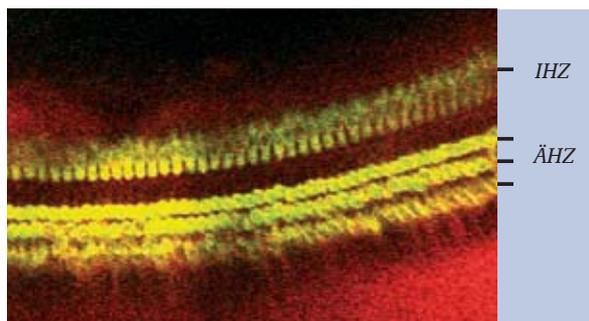
## Aus der Forschung: Maßnahmen am Innenohr

**Das Innenohr wird neu erkundet. Seit einigen Jahren wächst das Verständnis jener hochkomplexen Prozesse, die Schall in Töne und am Ende in Sprache oder Musik umwandeln. Damit wächst auch die Chance auf neue Therapien.**

Jetzt hat er eine getroffen. Auf dem Bildschirm über der Laborbank sieht man, wie eine winzige Nadel unter dem Mikroskop durch einen Zellverband fährt. Dann muss es schnell gehen. Dr. Stefan Münkner wirft ein ganzes Arsenal an elektronischen Geräten an, auf Monitoren nehmen Kurven Bewegung auf. *Patch Clamping* im Hörforschungszentrum der HNO-Universitätsklinik Tübingen. Bei dieser Technik wird mit einer hauchfeinen Glaspipette Kontakt zu einer einzelnen Zelle aufgenommen, um die Aktivität von bestimmten Ionen, also elektrisch geladenen Teilchen, innerhalb der Zelle zu messen.

Die Methode ist eigentlich Laborroutine. Ein echtes Novum aber sind die Zellen, an denen Münkner, Mitglied einer Arbeitsgruppe um Dr. Jutta Engel, gerade misst. Erst seit einiger Zeit gelingt es weltweit ganz wenigen Forschergruppen, die empfindlichen Haarsinneszellen aus dem Ohr zu isolieren und für einige Stunden im Labor am Leben zu halten. Das ist ein erheblicher Fortschritt für die Hörforschung. Egal ob Lärm, elektromagnetische Felder – Münkner untersucht gerade einen möglichen Einfluss von Mobilfunk auf diese Zellen – oder Tests auf neue pharmakologische Substanzen:

*An der Innenwand der Schnecke im Innenohr befinden sich drei Reihen äußere Haarsinneszellen (ÄHZ) und die einzelne Reihe der inneren Haarsinneszellen (IHZ).*



Jetzt können Forscher direkt nach den Ursachen von Schäden an diesen Zellen fahnden.

Das Innenohr ist vor allem ein „Umwandlungsapparat“ für Schall (siehe „Wie funktioniert das Ohr?“, S. 31). Bei einem Ton von 15.000 Hertz schwingen die Membranen in seinem Inneren exakt 15.000 mal in der Sekunde um eine winzige Strecke in der Größenordnung des Milliardsten Teil eines Meters (Nanometer) rasend schnell nach oben und unten, auf und ab. Damit wir etwas hören, muss die Schwingung bzw. Vibration allerdings auch von Zellen registriert und an den Hörnerv geleitet werden. Das können fast ausschließlich die inneren Haarsinneszellen (IHZ). Die äußeren Haarsinneszellen (ÄHZ) sind hingegen so etwas wie eine Art Hörgerät für die inneren Haarsinneszellen und bilden daher das Herzstück des cochleären Verstärkers. Lautstärken unter 40 Dezibel Schalldruckpegel würden wir ohne sie nicht hören. Denn die ÄHZ bewegen sich blitzschnell aktiv im Takt einer einlaufenden Schwingung. Dadurch wird die Vibration um sie herum so stark, dass selbst die trägeren inneren Sinneszellen etwas davon merken. Hinter Hörverlusten steckt oft vor allem der Untergang der äußeren Haarsinneszellen.

### Schall wird in elektrische Signale umgewandelt

Details des Bewegungsmechanismus der ÄHZ sind vor kurzem klarer geworden. Im Jahr 2000 beschrieb ein Team um den US-Forscher Peter Dallos ein Eiweiß in den Membranen der ÄHZ, das hinter den Bewegungen steckt. Prestin (von *presto*, italienisch für schnell) kann sich synchron zu Änderungen der elektrischen Spannung, die bei der Umwandlung der Schallschwingungen in elektrische Signale entsteht, in die Länge ziehen und wieder kontrahieren. Mäuse, bei denen das Gen für Prestin defekt ist, sind taub. Beim Menschen ist solch eine genetische Krankheit bislang allerdings nicht bekannt. Noch versteckt sich bei uns auch jener Ionenkanal in der Anonymität, über den die Sinneszellen überhaupt etwas von den Schwingungen um sie herum erfahren. Bei Zebrafisch und Taufliede sind bereits Ionenkanäle bis in die molekularen Details identifiziert, die sich bei Vibration im Gleichtakt rasend schnell öffnen und wieder schließen, so die eintreffenden Schallschwingungen in Stromsignale umsetzen und den Sinneszellen signalisieren: Hier läuft gerade ein Schallsignal an dir vorbei.

In der Forscherszene herrscht dennoch Optimismus. „Dank enormer Fortschritte in der Messtechnik können wir

heute die Arbeitsweise des Innenohrs im Detail untersuchen“, meint Dr. Manuela Nowotny, Mitarbeiterin in der Sektion von Professor Anthony W. Gummer im Tübinger Hörforschungszentrum. Sie spannt Innenohrpräparate unter ein Laserinterferometer und verfolgt Punkt für Punkt, Nanometer für Nanometer, die Vibrationen im Organ. Jüngstes Ergebnis: Die Vibrationen der äußeren Haarsinneszellen müssen irgendwie als Bewegung bei den inneren Haarsinneszellen ankommen. Und dafür gibt es, anders als noch in manchen Lehrbüchern beschrieben, mehrere Wege. Bei Tönen bis 3.000 Hertz, dem wichtigsten Bereich für das Sprachverständnis, wird die Flüssigkeit um die inneren Haarsinneszellen durch die Längenänderung der ÄHZ in Bewegung gesetzt. „Das Innenohr ist ein sehr komplizierter Apparat“, meint Nowotny, „vielleicht das komplizierteste aller Sinnesorgane überhaupt.“ Bei Hörschäden könnte es womöglich nicht reichen, ausschließlich Ersatz für die Sinneszellen zu finden. Die Gesamtstruktur aus Zellen und vielen feinen Membranen muss intakt sein.

Dabei ist es überhaupt ein enormer Fortschritt, dass die Chance auf Zellersatz in greifbare Nähe gerückt ist. Bis vor zehn Jahren galt die Devise: Vögel und Säugetiere haben keine Zellteilungsaktivität mehr im Innenohr, es gibt damit auch keine Regeneration der Sinneszellen. Das ist überholt. „Bekommt ein Vogel durch zu lautes Zwitschern einen Hörschaden, sind bald alle kaputten Zellen ersetzt und er hört wieder prima“, erklärt Hubert Löwenheim, Leiter einer Gruppe Regenerationsbiologie im Tübinger Hörforschungszentrum. 1999 zeigte jedoch seine Gruppe, dass sich bei Blockade bestimmter Hemmstoffe der Zellteilung, genannt p27kip1, auch bei Mäusen sogenannte Stützzellen im Innenohr wieder zur Teilung anregen lassen. 2003 gelang es einer Gruppe um Stefan Heller von der Stanford University erstmals, bei Tieren Stammzellen zu isolieren und daraus wieder Sinneszellen zu züchten. 2005 berichtete eine Forschergruppe um Masahiko Izumikawa von der University of Michigan (USA) von Erfolgen mit einer Gentherapie – sie hatten ertaubten Meerschweinchen ein Gen in das Innenohr geschleust, das die Regeneration von Haarsinneszellen fördert. Die Tiere entwickelten sogar wieder ein gewisses Hörvermögen.

„Wir haben eine Chance auf Ersatz zerstörter Sinneszellen“, resümiert Löwenheim. Derzeit versucht seine Gruppe aus Stammzellen von Mäuseohren in Laborkultur Haarsinneszellen zu züchten, um an ihnen neue Wirkstoffe zu testen. „Eine echte biologische Therapie von Hörschäden wird einmal möglich werden“, glaubt Löwenheim.



Nur ein Teil des Cochlea-Implantats (CI) ist bei einem CI-Träger zu sehen. Hinter bzw. auf dem Ohr sitzt der Sprachprozessor mit eingebautem Mikrophon.

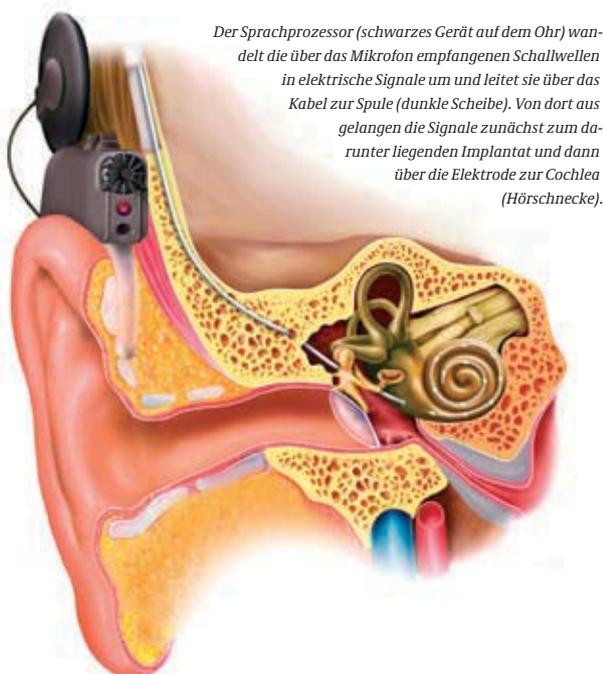
#### Ersatz für das Innenohr – wie Taube heute wieder hören

„Sie können sich nicht vorstellen, was es für mein Leben und für den Beruf heißt, dass ich wieder voll kommunizieren kann“, sagt Frank-Michael Bindel, Jahrgang 1953. Jugendlich-dynamischer Auftritt, modisches Hemd und Aktenkoffer – der Mann ist Anwalt mit eigener Kanzlei in Rheinberg und wirkt ausgesprochen lebensfroh. Er ist zur Anpassung seines zweiten Cochlea-Implantats (CI) in die HNO-Klinik der Universität Würzburg gekommen. Seit 1987 nahm seine Hörfähigkeit stetig ab. Eine Ursache wurde nie gefunden. Bindel half sich mit Hörgeräten, doch 2003 stand er beruflich fast vor dem Aus: „Ich konnte mich nicht mehr verständigen, habe Partys gemieden – ich wollte keinen mehr sehen.“ 2004 drohte das Ende der eigenen Kanzlei. Doch die Ärzte um Dr. Joachim Müller an der HNO-Uniklinik Würzburg versorgten sein rechtes Ohr mit einem Cochlea-Implantat. Bindel: „Ich konnte weiter machen.“

1.000 bis 1.200 CIs werden allein in Deutschland jährlich implantiert, weltweit sind bereits über 100.000 Menschen damit versorgt worden. Die Tendenz ist steigend. Würzburg ist bei den Fallzahlen nach der Medizinischen Hochschule Hannover und vor der Universitätsklinik Freiburg bundesweit das zweitgrößte Zentrum. Anders als konventionelle Hörgeräte wandeln Cochlea-Implantate ein Schallsignal nicht wieder in Schall, sondern in ein elektrisches Signal für den Hörnerv um. Sie ersetzen damit die Leistung des Innenohrs. Prozessor, Mikrophon und Batterien werden außen hinter dem Ohr getragen. Über Funk gelangen die Signale an einen Empfänger, den Chirurgen zuvor in den Mastoidknochen hinter dem Ohr implantiert haben. Von dort geht es weiter per Minikabel an die Elektroden, die in der Cochlea liegen. Seit den ersten Versuchen der Technik in den 1950er Jahren sind die Geräte stetig kleiner und besser geworden. Die Außenelemente wiegen

gerade noch etwa 15 Gramm und sind kaum größer als ein konventionelles Hörgerät.

Normalerweise nutzen die Geräte heute einen Frequenzbereich von unter 250 bis etwa 8.500 Hertz. Der Prozessor analysiert diese Frequenzen in Schallsignalen, wandelt sie um in feinste Stromimpulse und verteilt diese je nach Tonhöhe auf die einzelnen Kanäle in der Elektrode. Zwölf bis 22 Kanäle haben die Geräte heute. Tiefe Töne werden an die hinteren Elektroden gegeben, hohe an die vorderen – so wie auch das gesunde Innenohr Töne verarbeitet. Während die Zahl der Elektroden nach derzeitigen Maßstäben nicht zu steigern ist (siehe „Für wen ist ein Cochlea-Implantat geeignet?“, S. 39), sorgen vor allem immer bessere Signalverarbeitungsstrategien in den Prozessoren für mehr Sprachverständnis. Die meisten Geräte nutzen heute eine CIS-Strategie (*Continuous interleaved Sampling*), die 1991 von einer Gruppe um Blake Wilson vom Research Triangle Institute in North Carolina (USA) entwickelt wurde. CIS brachte vor allem mehr Tempo. Heutige Geräte mit CIS-Strategie geben mindestens 1.500 Stromimpulse je Sekunde auf die einzelnen Elektroden, zuvor waren es höchstens 200. „Das hohe Tempo erlaubt es, viel mehr Informationen über die Art des Schallsignals zu vermitteln“, erläutert Diplom-Ingenieur Stephan Brill, Physiker von der HNO-Klinik der Universität Würzburg.



Der Sprachprozessor (schwarzes Gerät auf dem Ohr) wandelt die über das Mikrofon empfangenen Schallwellen in elektrische Signale um und leitet sie über das Kabel zur Spule (dunkle Scheibe). Von dort aus gelangen die Signale zunächst zum darunter liegenden Implantat und dann über die Elektrode zur Cochlea (Hörschnecke).



Das Labyrinth der Cochlea hat eine spiralförmige Form und 4,5 Windungen. Die knöchernen Wand der Cochlea (Schnecke) wurde bei der Präparation entfernt.

### Neue technische Verfahren verbessern das Sprachverständnis

Derzeit zeichnen sich weitere Verbesserungen ab. Vor allem auf Clemens Zierhofer an der Universität Innsbruck und den US-Amerikaner Don Eddington geht ein Konzept der sogenannten Feincodierung zurück. Dabei werden den Kanälen im Innenohr durch variable Stimulationen auch Informationen über die Frequenz des Ausgangssignals übermittelt. CI-Träger hören mit diesem neuen Verfahren offenbar vor allem im tieffrequenten Bereich besser. „Wir hoffen auf eine weitere Verbesserung beim Sprachverständnis“, sagt Brill. Die HNO-Klinik Würzburg koordiniert eine europaweite klinische Studie, die das untersuchen soll.

Wichtig für den Erfolg eines CI bleibt vor allem die gute Zusammenarbeit von Patient, Ärzten und Ingenieuren. Und ganz wichtig ist ein Hörtraining bei Spezialisten. Erst einige Wochen nach der Implantation wird ein CI aktiviert, ein Ingenieur reguliert dann erstmals die Stromstärke an den Kanälen individuell nach den Bedürfnissen des Patienten.

„Das ist jetzt ein eher heller Ton, und eher so mittellaut“, sagt Bindel gerade. Der Techniker nickt zufrieden – sein Patient kann tatsächlich alle Elektroden gut unterscheiden. Nach einer knappen Stunde ist das Gerät aktiviert. Bindel ist heute mehr als zufrieden. „Beim ersten Gerät war ich zunächst etwas enttäuscht, habe erst nach Wochen damit etwas verstanden“, erinnert er sich. Wer heute mit ihm spricht, merkt allerdings kaum etwas von seiner Erkrankung. Und heute stellt sich obendrein auch der Erfolg schneller ein. Schon eine Stunde nach Aktivierung des Geräts kann Bindel auch auf dem linken Ohr per Handy telefonieren. „Ich werde wieder richtig gut hören, Sie können stolz sein auf das, was Sie den Patienten zurückgeben“, sagt er zu den Ärzten.

## Für wen ist ein Cochlea-Implantat geeignet?



**Dr. Joachim Müller, Leiter des Cochlea-Implant Zentrums an der HNO-Klinik der Universität Würzburg, erklärt, was die Geräte heute leisten.**

**Was hört ein Patient mit einem Cochlea-Implantat (CI), wenn Sie das Gerät erstmals aktivieren?**

Vermutlich das: [Müller piept, krächzt und schnarrt mit der Zunge]

**Und das reicht, um Sprache zu verstehen?**

Schon nach wenigen Wochen verstehen fast alle Patienten diese Signale. Selbst Kinder filtern daraus sehr schnell wieder ein „Nein, jetzt gibt es kein Eis“ der Mutter. Das ist wie Chinesisch für einen Mitteleuropäer. Erst durch Training lernen Sie, aus den Lauten Sprache herauszuhören.

**Wer bekommt heute so ein Gerät?**

Nicht eins, sondern zwei! Die beidseitige Versorgung ist ganz wichtig. Nur das Hören mit beiden Ohren erlaubt es, den von der Natur aus als binaurales System angelegten Hörsinn adäquat zu nutzen und so ein optimales Sprachverständnis zu erzielen. Wir versorgen heute daher in der Regel unsere Kinder und einige erwachsene Patienten mit zwei Geräten, auch wenn es immer wieder Probleme mit den Krankenkassen gibt.

**Wie teuer sind die Geräte?**

Die Versorgung eines Ohrs kostet etwa 29.000 Euro. Das ist eine Investition, die sich nicht nur für das Leben eines Menschen, sondern auch für die Gesellschaft mehr als bezahlt macht. Stellen Sie sich vor, was es heißt, wenn ein 40-jähriger Lehrer dank der Geräte in seinem Beruf bleiben kann.

**Aber für wen kommen die Geräte in Betracht?**

Sie sind unverzichtbar für Kinder, die taub oder massiv schwerhörig zur Welt gekommen sind. Sie sollten so früh wie möglich, idealerweise vor dem ersten Geburtstag, versorgt sein. Daher brauchen wir in Deutschland auch dringend ein flächendeckendes Hörscreening für alle Neugeborenen. Außerdem versorgen wir heute immer mehr Erwachsene, die ertauben. Eine Indikation für ein CI ist ungefähr dann gegeben, wenn Sie trotz Hörhilfe nicht mehr telefonieren können.



*Mithilfe von zwei Cochlea-Implantaten kann der vierjährige Paul wieder hören. Der Junge bekam sein erstes Implantat im Alter von einem Jahr, das zweite im Jahr darauf.*

**Zur Technik: In den Geräten sind heute maximal 22 Elektroden. Das scheint sehr wenig Trennschärfe zu sein, verglichen mit dem gesunden Innenohr, das rund 20.000 Frequenzen bzw. Kanäle, differenzieren kann.**

Theoretisch wären 100 Elektroden natürlich besser. Aber das ist bislang technisch nicht zu realisieren. Studien zeigen, dass das Sprachverständnis mit mehr als zehn Elektroden bei der heutigen Gerätetechnik nicht mehr zunimmt. Mehr und dann enger gesetzte Elektroden führen rasch zur Überlappung der Signale und können so auch Störungen produzieren. CI-Träger erreichen deshalb auch nicht die Frequenzunterscheidung eines Gesunden. Für ein gutes Sprachverständnis ist dies aber auch nicht so entscheidend.

**Und wie steht es mit dem Hören von Musik?**

Taube Kinder singen und klatschen bei einem Lied wenige Wochen nach der Implantation mit. Wir haben auch schon Musiker versorgt, die weiter ihr Instrument spielen.

**Gibt es Unterschiede in der Qualität der Geräte verschiedener Hersteller?**

Das ist auch für Experten oft kaum zu unterscheiden. Insgesamt ist die Qualität bei den drei großen Herstellern am Markt heute aber erfreulich hoch. Ich persönlich, auch wenn das nicht von allen gerne gehört wird, sehe schon Unterschiede zwischen den Herstellern. Aber das ist natürlich auch eine gute Grundlage für Wettbewerb und Ansporn für Weiterentwicklungen.

**Wird das Hören mit einem CI im Laufe der Jahre schlechter?**

Nein, CI-Träger zeigen noch Jahre nach der Implantation leicht ansteigende Leistungen. Vermutlich ist das ein Trainingseffekt, vielleicht aber auch ein Hinweis darauf, dass die elektrische Reizung den Hörnerv ganz gut schützt.



Fühlen



## Empfindungen der besonderen Art

Ein Händedruck oder eine zärtliche Geste reicht manchmal aus, um sich wie im siebten Himmel zu fühlen. Föten können Berührungen schon ab der 7. Schwangerschaftswoche im Mutterleib wahrnehmen, da sich der Tastsinn beim Menschen als erster Sinn entwickelt. Willentlich unterdrücken lässt sich die Wahrnehmung über die Haut nicht, selbst im Schlaf ist sie aktiv. Wer kein Gefühl in den Fingerspitzen oder sogar in ganzen Gliedmaßen hat, muss auf viele Empfindungen und positive Stimulierungen verzichten und hat oft noch große Schmerzen. Nicht für alle Hautpatienten gibt es optimale Behandlungsmöglichkeiten. Bei der Entwicklung von künstlichem Hautersatz, therapeutischen Verfahren bei Nervenläsionen und „gefühlvollen“ Prothesen etwa für Unterarme sind die Forscher aber ein Stück weiter gekommen.

## Was Berühren und Spüren so angenehm macht

Nie werde ich die schönste Berührung der Welt vergessen.

Ich war mit meinem Mann und unserem Sohn spazieren, als sich eine kleine Hand in meine schob. Es war das erste Mal, dass der Kleine von sich aus meine Hand nahm. Erst nach ein paar Momenten hatte ich mich wieder gefasst und sah, dass da noch jemand stand wie vom Donner gerührt, mein Mann. Den hatte unser Sohn nämlich an die andere Hand genommen.



Warum es keine schönere Berührung als diese gibt? Eltern wird man das nicht erklären müssen, Nicht-Eltern wird man es nur schwer erklären können. Das hat sehr viel mit der besonderen Art der Elternliebe zu tun. Mit Vertrauen und mit der Selbstverständlichkeit, mit der dieser Knirps uns beide an die Hand nahm. Wahrscheinlich gibt es aber einfach auch kein schöneres Bild für Elternschaft: Groß und Klein, Hand in Hand.

### Die Art der Berührung ist entscheidend

Ob und wann eine Berührung angenehm ist, wird jeder immer wieder für sich selbst entscheiden müssen. Standards gibt es nicht. Entscheidend ist vor allem, wer berührt und in welcher Situation sich der Berührte befindet. Wer kurz davor steht, „aus der Haut zu fahren“, möchte vielleicht nicht einmal vom Partner liebevoll angefasst werden. Aber auch die Art der Berührung spielt eine große Rolle. Denn fast jeder Körperkontakt kann als angenehm empfunden werden – bis hin zum Schmerz, der bei manchen Menschen sexuelle Lust auslöst.

Die universelle Einheit der angenehmen Berührung ist aber wohl das Streicheln. Wie die Forschung vor einiger Zeit gezeigt hat, ist unser Körper dafür sogar besonders empfänglich. Ein Team um den schwedischen Neurophysiologen Hakan Olausson von der Universitätsklinik Sahlgrenska in Göteborg untersuchte eine Patientin mit einer ganz ungewöhnlichen Erkrankung. Das Leiden hatte bei ihr im Erwachsenenalter von der Nase abwärts die wichtigsten Tastnerven zerstört. Nur eine Art von Nervenzellen war erhalten geblieben, die taktilen C-Fasern, die zusammen das CT-Netzwerk bilden. Sie kommen beim Menschen in allen behaarten Körperarealen und auch bei Tieren vor. Von diesen Nervenzellen war nur bekannt, dass sie Signale mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde und damit ausgesprochen langsam in das Gehirn transportieren.

Die Patientin konnte wegen der zerstörten, schnell leitenden Neuronen keine Berührung mehr bewusst wahrnehmen. Als die Forscher aber mit einem Pinsel über ihren Unterarm strichen, empfand sie das trotzdem als angenehm. Sie konnte dabei aber nicht die Richtung oder andere Merkmale der Berührung angeben. Magnetresonanz-Untersuchungen bei gesunden Probanden zeigten, dass bei einer entsprechenden Berührung zwei Zentren im Gehirn aktiviert werden: die Wahrnehmungsbereiche und der sogenannte Inselkortex,

der auf Wärmereize reagiert, aber auch auf visuell romantische Szenen und sexuelle Erregung. Bei der Patientin lösten die Pinselstriche nur eine Aktivierung des Inselkortex aus. Dazu kam, dass die taktilen C-Fasern nur auf langsame Berührungen ansprachen. Schnelle oder abrupte Bewegungen wurden dagegen nicht registriert.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass das CT-Netzwerk eher für affektive, also auch emotionale Aspekte einer Berührung zuständig ist und diese Reize an das Gefühlszentrum des Gehirns übermittelt. Die schnell leitenden Nervenzellen liefern bei einem gesunden Menschen gleichzeitig die dazu gehörenden Details, etwa die Stärke oder Richtung einer Berührung. Sie liefern also in gewisser Weise die Fakten, während die taktilen C-Fasern Gefühle übermitteln – und noch etwas mehr: Feuern die langsamen Nerven, kommt es nämlich auch zur Ausschüttung von Oxytozin. Dieses Hormon mit opiat-ähnlicher Wirkung ist wichtig für die Geburt, das Stillen und den Aufbau einer emotionalen Beziehung zwischen Mutter und Kind. Oxytozin soll aber auch die Beziehung zwischen Paaren stabilisieren helfen – und wird beim Orgasmus produziert.

### Hautkontakt kann Leben retten

Die überragende Bedeutung des Streichelns sollte keine Überraschung sein. Denn schon lange ist bekannt, dass Hautkontakt lebenswichtig ist und Leben retten kann. Ende der 1970er Jahre sah sich eine Intensivstation im kolumbianischen Bogota mit einer schweren Notsituation konfrontiert. Die Sterblichkeit und die Krankheitsfälle bei den zu früh oder zu leicht geborenen Kindern stiegen an, weil nicht genügend Brutkästen und auch nicht ausreichend Personal zur Verfügung standen. Also gingen die Krankenschwestern dazu über, die Kinder jeden Tag für mehrere Stunden auf die Brust eines Elternteils zu legen – mit soviel Hautkontakt wie möglich.

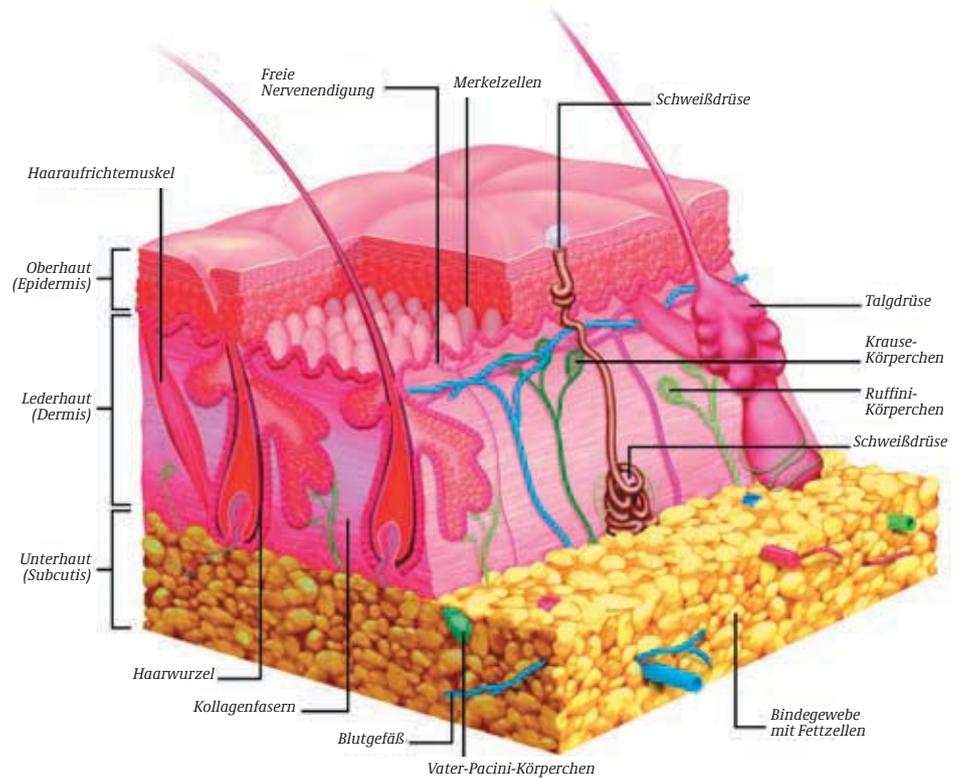
Diese aus der Not geborene Känguruh-Methode hatte mehr Erfolg als erwartet. So konnten die Kinder in vielen Fällen früher entlassen werden, weil es sehr viel weniger Erkrankungen gab. Auch die Sterblichkeit der Frühchen sank deutlich. Mittlerweile wird die Känguruh-Methode deshalb weltweit praktiziert und zwar nicht nur bei Frühchen. Gesunde Neugeborene profitieren ebenso davon wie die Eltern. Dank des intensiven Körperkontakts können Mütter – und besonders Väter – schneller und leichter eine emotionale Bindung zu ihren Kindern aufbauen.



*Nicht nur Kinder lassen sich ungern Spritzen geben. Auch viele Erwachsene empfinden diese Art der Körperberührung als äußerst unangenehm.*

Als unser Sohn vor mehr als zwei Jahren geboren wurde, wussten mein Mann und ich noch nichts von der Känguruh-Methode. Trotzdem haben wir den Kleinen, sooft es ging und so lange wie möglich, in den Armen und auf der Brust liegen, ruhen und schlafen lassen – nicht nur bei uns, sondern auch bei seinen Großeltern. Intensiver Körperkontakt ist nicht die einzige Methode, eine enge Verbindung zu einem Kind aufzubauen. Es gibt aber sicher keine schönere. Das Band, das wir alle damals nicht nur, aber auch wegen der vielen Stunden enger Berührung mit unserem Kleinen geschlossen haben, kann man nicht sehen. Es durchzieht die ganze Familie aber noch heute. Fühlbar.

## Wie funktioniert die Haut?



Mindestens einmal im Monat fährt jeder von uns aus der Haut – und das hat rein gar nichts mit dem persönlichen Charakter zu tun. Rund 27 Tage dauert es nämlich, bis sich die Zellen unserer obersten Hautschicht komplett erneuert haben. Dafür werden ein bis zwei Gramm Hautschuppen pro Tag von unserer Oberhaut oder Epidermis abgestoßen. Alle ihre fünf Schichten bestehen vornehmlich aus Keratinozyten. Diese Hautzellen werden in der zuunterst liegenden Basalzellschicht gebildet und wandern von dort zur Oberfläche der Haut. Auf dem Weg dahin sterben die Keratinozyten allerdings langsam ab. Bevor sie ganz abgestoßen werden, verkleben sie noch miteinander zu Hornplättchen und bilden so eine äußerst effektive Schutzschicht. Dabei werden sie von einer gegen Bakterien und Pilze wirkenden Wasser-Fett-Schicht unterstützt, die von den Talg- und Schweißdrüsen ausgeschieden wird.

Unter der Epidermis liegt die sehr viel dickere, aber nur zweischichtige Lederhaut oder Dermis. Diese Schicht ist reich an elastischen Fasern und Kollagenfasern. Die Lederhaut enthält die Talg- und Schweißdrüsen sowie die Haarwurzeln. Sie ist durchzogen von Blutgefäßen, die auch die Oberhaut versorgen. Die innerste Schicht ist die Unterhaut oder Subcutis. Sie enthält neben Blutgefäßen und Nerven vor allem Bindegewebe, in das Fettzellen eingelagert sind. Der Subcutis

verdanken wir also die ungeliebten Fettpolster an Hüfte, Po und anderen „Problemzonen“.

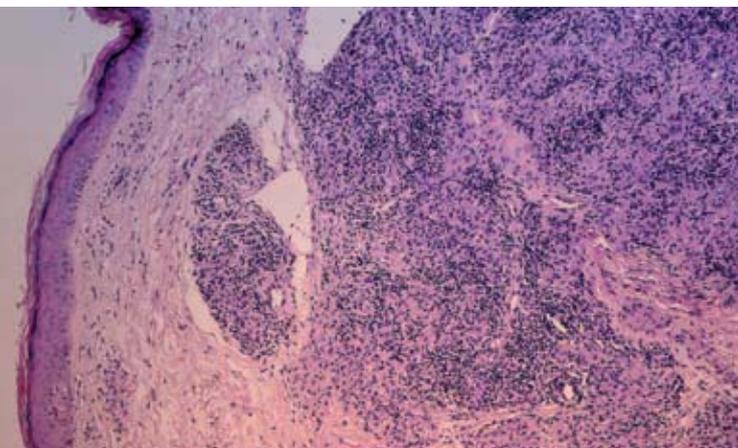
In allen drei Hautschichten liegen Sinneszellen, die jeweils unterschiedliche Reize über Nervenfasern an das Gehirn melden. So erkennen die Vater-Pacini-Körperchen in der Unterhaut Vibrationen besonders gut, während die freien Nervenendigungen in der Lederhaut als Schmerzrezeptoren auf unterschiedliche Reize reagieren. Andere Nervenfasern sind um Körperhärchen gewunden und reagieren auf Berührungen des Haares. In unbehaarten Regionen übernehmen die auf Reizänderungen spezialisierten Meissner-Körperchen diese Rolle. Sie sitzen unter anderem in den Fingerkuppen besonders dicht und verleihen uns sprichwörtlich „Fingerspitzengefühl“. In der Epidermis schließlich dienen die Merkelzellen als zusätzliche Druckrezeptoren. Für Dehnungsreize wiederum sind vor allem die Ruffini-Körperchen in der Lederhaut zuständig. Die Krause-Körperchen dagegen werden durch Kälte aktiviert. Zusammen mit anderen Thermosensoren, die jeweils nur auf Kälte oder Wärme spezialisiert sind, liefern sie Temperaturwerte an das Gehirn, das bei Abweichungen die Körpertemperatur wieder auf etwa 37 Grad Celsius einstellen kann.

## Unter Hautkrankheiten leiden Patienten besonders

**Hautkrankheiten setzen den Betroffenen ganz besonders zu. Manche haben nur wenig oder gar kein Gefühl mehr in den Körperteilen, andere leiden unter starkem Juckreiz oder unerträglichen Schmerzen. Medikamente und Therapien helfen nur bedingt. Die Folge: Viele Patienten ziehen sich zurück.**

Seit Jahrtausenden ist die Infektionskrankheit **Lepra** bekannt. Mittlerweile kann sie zwar dank einer modernen Kombinationstherapie gut behandelt werden. Aber auch heute noch macht sie die Betroffenen zu „Aussätzigen“ in der Gesellschaft. Viele Patienten ziehen sich zurück oder werden isoliert. Ein großer Teil der Betroffenen hat keinen Zugang zu den Medikamenten. So findet die Lepra immer noch ihre Opfer – nach Schätzungen von Experten sind mehr als zehn Millionen Menschen mit dieser Krankheit infiziert. Das *Mycobacterium leprae* befällt unter anderem die Nervenzellen und kann dann in den Händen, Füßen und anderen Körperteilen **Sensibilitätsstörungen** bis hin zur völligen **Gefühllosigkeit** verursachen. Darum nehmen Patienten Wunden nicht mehr wahr; sie spüren sie nicht und erleiden deshalb häufig schwere Verletzungen und Verbrennungen.

*Die Mikroskopaufnahme zeigt den Hautausschnitt eines leprakranken Patienten (vgl. dazu gesunde Haut auf S. 49 unten).*

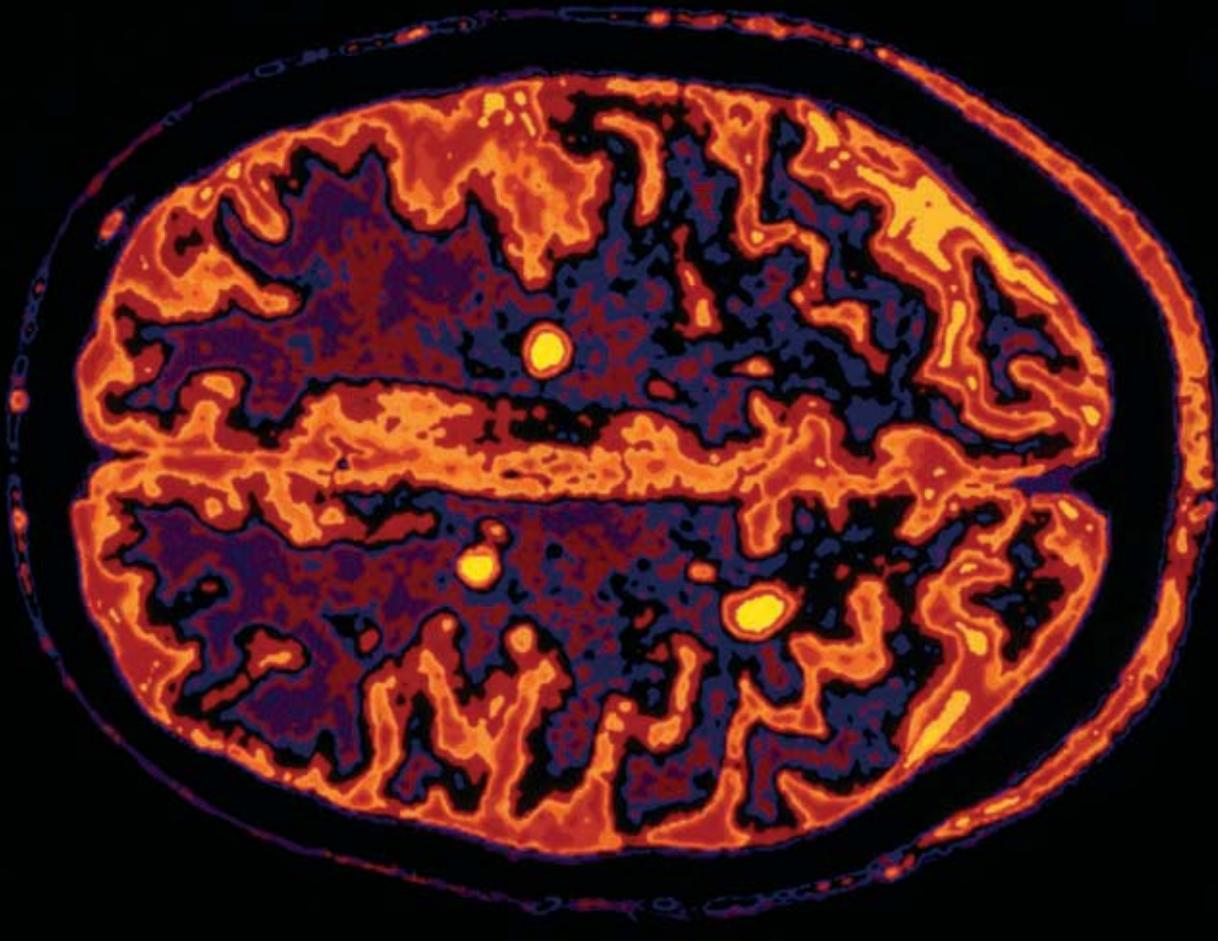


### Erhöhte Blutzuckerwerte können Nerven schädigen

Damit hat das Leiden eine gemeinsame Folgeerkrankung mit dem Diabetes mellitus. Im fortgeschrittenen Stadium dieser Wohlstandskrankheit können nämlich erhöhte Blutzuckerwerte Nerven schädigen. Auch in diesem Fall drohen schwere Verletzungen – und Schlimmeres. So müssen die Chirurgen alleine in Deutschland jedes Jahr bis zu 30.000 Amputationen durchführen. **Polyneuropathie** ist der Sammelbegriff für derartige Erkrankungen des peripheren Nervensystems, bei denen mehrere Neuronen außerhalb von Gehirn und Rückenmark gleichzeitig betroffen sind. Diabetes, Lepra und die durch den Erreger *Borrelia burgdorferi* vermittelte Borreliose sind nur drei von mehreren hundert bekannten Ursachen der Polyneuropathie. Borreliose wird über den Speichel von infizierten Zecken übertragen, wenn diese beim Menschen Blut saugen. Nur selten sind Polyneuropathien angeboren. Behandelt wird bei den erworbenen Formen des Leidens – soweit bekannt – die Grunderkrankung. Ansonsten bleibt nur die Schmerztherapie. Genau diese versagt wiederum bei einer **Trigeminusneuralgie**. Denn die gängigen Schmerzmittel wirken nicht bei dieser außerordentlich qualvollen Erkrankung. Die unerträglichen Schmerzen haben bei manchen Patienten sogar zu Selbsttötungen geführt. Bei einer Neuralgie treten die Schmerzen im Ausbreitungsbereich eines Nervs auf, in diesem Fall im Gesicht. Denn der Trigeminusnerv versorgt weite Teile des Kopfes. Zur Neuralgie kann es unter anderem

*Infizierte Zecken übertragen den Borreliose-Erreger mit ihrem Speichel auf den Menschen.*





kommen, wenn Druck auf den Nerv ausgeübt wird oder etwa eine **Multiple Sklerose** vorliegt. Das ist die häufigste chronisch verlaufende Entzündungserkrankung des Nervensystems. Oft breiten sich dabei anfängliche Missempfindungen in den Fingerspitzen oder Füßen auf die Arme und Beine aus. Das Leiden gilt als Autoimmunerkrankung und ist nicht ursächlich heilbar. Die Trigeminusneuralgie ist nur eine mögliche Folgeerkrankung.

Charakteristisch dafür sind Schmerzattacken, die meist nicht lange dauern, aber schon durch eine leichte Berührung, Kauen, Schlucken, Sprechen oder einen kalten Luftzug ausgelöst werden können. Erstes Therapieziel bei einer Trigeminusneuralgie ist es deshalb, die Häufigkeit der Anfälle zu reduzieren – auf die Intensität des Schmerzes hat dies allerdings keinen Einfluss.

Eine weitere Sonderform der Neuralgie kann nach einer **Gürtelrose** auftreten. Dieses Leiden, auch **Herpes zoster** genannt, wird ebenso wie die Windpocken durch das Variella-Zoster-Virus verursacht. Nach überstandener Kinderkrankheit kann sich der Erreger in manchen Nervenzellen einnisten und vor allem in späteren Lebensjahren reaktiviert werden. Oft ist es Stress, der die typischen Symptome wie brennende Schmerzen, Empfindungsstörungen und Hautveränderungen mit Bläschen am Körperstamm auslöst. Klingen die Schmerzen auch nach Monaten nicht ab oder kehren sie immer wieder, spricht man von einer **Post-Zoster-Neuralgie**. Die Betroffenen leiden dann auch schon bei leichten Berührungen und können selbst die Kleidung auf der Haut kaum ertragen.



Bei der tomographischen Untersuchung des Schädels sind Läsionen im Gehirn (gelbe Punkte) zu sehen, die von einer Multiplen Sklerose (MS) verursacht worden sind. Viele MS-Patienten sind in fortgeschrittenem Krankheitsstadium auf einen Rollstuhl angewiesen.

Rote Flecken und Bläschen, die sich bandartig ausbreiten, sind Vorboten einer Gürtelrose. Der schmerzhafteste Hautausschlag wird durch Herpes-Zoster-Viren ausgelöst.

Auch bei **Neurodermitis** reagiert die Haut häufig auf leichte Reize – allerdings weniger mit Schmerzen als mit unerträglichem Juckreiz. Kratzen sich dann die Patienten die oft trockene, rissige oder schuppige Haut, kann sich ein **Ekzem** entwickeln. Diese entzündliche und manchmal nässende Hautveränderung wiederum ist ein guter Nährboden für Infektionen. Psychisch belastend ist für viele Neurodermitiker zudem, dass meist das Gesicht und der Hals betroffen sind. Weil sich diese Stellen kaum vor der Umwelt verbergen lassen, führt auch dieses Leiden – wie die Lepra – nicht selten zu einer Stigmatisierung und Ausgrenzung der Patienten.



*Patienten mit Polyneuropathie haben brennende und stechende Schmerzen in den Füßen und/oder Händen.*

## Polyneuropathie – Keine Kontrolle über die Füße

Kribbeln, „Ameisenlaufen“ auf der Haut, Brennen und ein gestörtes Temperaturempfinden sind einige der typischen Symptome dieser Krankheit. Zu den Patienten, die zudem das Gefühl in den betroffenen Gliedmaßen verloren haben, gehört Rozalia Costiuc. Die Sachbearbeiterin aus München leidet seit mehr als 20 Jahren an einer Polyneuropathie. Deren Ursache kennt sie bis heute nicht, obwohl ihr Vater, ein Bruder, eine Tante und deren Kinder ebenfalls an Polyneuropathie erkrankt sind. „Ich habe brennende und stechende Schmerzen in den Füßen bis zu den Knien und den Händen“, berichtet die 49-Jährige. „Das Laufen wird immer schwieriger, weil ich in den Fußsohlen fast kein Gefühl mehr und kaum noch Kraft habe. Das fühlt sich an wie eine Schicht zwischen meinen Füßen und dem Boden. Ich habe keine richtige Kontrolle über meine Füße und muss ständig nach unten sehen, wenn ich gehe. Jeder Schritt wird als bewusster Befehl vom Kopf an die Füße gegeben.“

## Aus der Forschung: Ein neues Gefühl für den Patienten

**Geschädigte Haut, verletzte Gliedmaßen und lädierte Nerven: Wissenschaftler sind mithilfe modernster Verfahren, etwa dem Tissue Engineering, auf der Suche nach adäquaten Therapien und Behandlungsformen für Patienten mit langwierigen Hautkrankheiten wie chronischen Wunden. Auch an modernen, „gefühlvollen“ Unterarmprothesen wird in den Laboren getüftelt.**

*Im Leibniz-Laboratorium für künstliche Organe (Hannover) werden künstliche Herzklappen für Menschen gezüchtet. Basis einer solchen Herzklappe ist das Bindegewebsgerüst (Kollagen) einer Schweineherzklappe. Patienten, die an chronischen Wunden leiden, werden ebenfalls mit außerhalb des Körpers gezüchtetem Gewebe (Hautersatz) versorgt.*



Einen griffigeren Namen wird man sich schon noch einfällen lassen müssen. Schließlich ist die „Käseschmiere“ die wahrscheinlich beste Hautcreme der Welt, auch wenn sie vorerst noch nicht im Labor hergestellt werden kann. Die Käseschmiere oder Vernix caseosa ist ein echtes Naturprodukt. Von der 17. Schwangerschaftswoche an produziert die Haut des Fötus diesen weißlichen Belag. Analysen haben mittlerweile gezeigt, dass die Käseschmiere Fette und antibakterielle Proteine enthält, ansonsten aber zu etwa 80 Prozent aus Wasser besteht. Das scheint die perfekte Kombination zu sein, um die unreife fötale Haut vor dem Fruchtwasser, vor Austrocknung, vor Infektionen und aggressiven Substanzen zu schützen. Von eben diesen Fähigkeiten der Käseschmiere könnten Frühgeborene und Patienten mit Hautkrankheiten oder Verbrennungen vermutlich profitieren – wie gesunde Menschen wahrscheinlich auch. Deshalb versuchen Labors weltweit, die genaue Zusammensetzung des Originals zu entschlüsseln und hoffen dabei auf ein außergewöhnliches Pflegeprodukt für die gesunde und die kranke Haut.

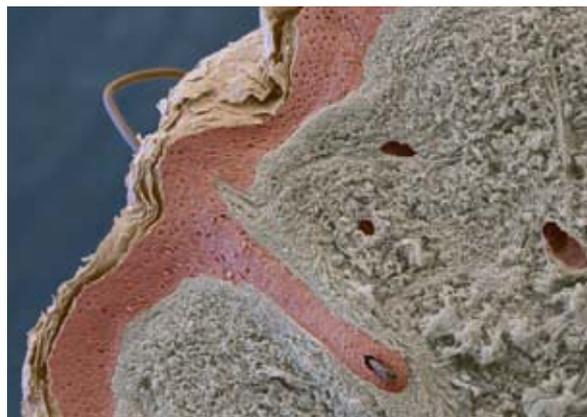
Auch in der Hautforschung gilt das *Tissue Engineering* (Gewebezüchtung) als Hoffnungsträger, der sein Versprechen in den vergangenen Jahren schon oft eingelöst hat. Bei diesem Verfahren werden Zellen, Gewebe oder ganze Organe für eine spätere Transplantation außerhalb des Körpers gezüchtet. Als Ausgangsmaterial werden vorzugsweise Zellen des Patienten verwendet, um Abstoßungsreaktionen weitgehend zu vermeiden. Schließlich ist dieses Gewebe auf molekularer Ebene identisch mit dem des Patienten. Keratinozyten beispielsweise, der häufigste Zelltyp in der Oberhaut, können bereits gezüchtet werden, um etwa die Haut von Verbrennungsoffern bei der Regeneration zu unterstützen. In einem speziellen Fall aber, bei chronischen Wunden, versagt diese Methode wie auch alle vergleichbaren Verfahren. Bei chronischen Wunden heilt ein Wunddefekt auf Dauer nicht vollständig ab. Ursachen dafür gibt es viele. Sehr oft tragen Stoffwechselstörungen oder eine mangelhafte Durchblutung etwa bei Diabetes mellitus dazu bei. Weil sich die Wunde nicht schließt, können Infektionen dazukommen. Die Therapie konzentriert sich zunächst immer darauf, die Ursache zu beseitigen. Ist eine Wundheilung dann grundsätzlich möglich, wird in manchen Fällen ein körpereigener Hautlappen transplantiert. Diese belastende Prozedur ist aber aufwendig und verursacht bei der Hautentnahme eine zweite Wunde mit entsprechenden Risiken.

### Hautersatz für chronische Wunden

„Chronische Wunden sind ein großes sozioökonomisches Problem“, berichtet Professor H. Peter Rodemann, Leiter der Sektion Strahlenbiologie und Umweltforschung der Universität Tübingen. „Etwa 2,5 Prozent aller Bundesbürger leiden daran. Die Behandlung der Wunden ist mit enormen Kosten verbunden. Außerdem müssen die Betroffenen eine Einschränkung ihrer Lebensqualität hinnehmen. Momentan gibt es nichts, was eine chronische Wunde wirklich heilen kann.“ Deshalb versucht er zusammen mit Professor Hans-Oliver Rennekampff, Leiter der Sektion für Verbrennungschirurgie und Hautregeneration an der BG Unfallklinik Tübingen, aus den Zellen von Patienten einen autologen, zweilagigen Hautersatz zu züchten. Ziel ist ein Transplantat aus Epidermis, einer darunter liegenden dermalen Komponente sowie einer wie in einem Sandwich dazwischen liegenden Basalmembran mit Stützfunktion.

In dem BMBF-geförderten Projekt züchten die Tübinger Forscher Hautzellen, die Keratinozyten der Oberhaut (Epidermis), und auch die Fibroblasten der darunter liegenden Lederhaut (siehe „Wie funktioniert die Haut?“, S. 44). Denn die Fibroblasten beeinflussen die Differenzierung der Keratinozyten, was wichtig für die Strukturbildung der Oberhaut ist. Zwei Typen von Fibroblasten gibt es. Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass beim Menschen in jedem Alter zwei Vorläuferfibroblasten auf einen Funktionsfibroblast kommen. Deshalb setzen sie eben diese Kombination mit Erfolg ein. „In vitro haben wir eine strukturierte Epidermis und sehr gute Daten erhalten“, so Rodemann. „Wir denken, dass möglicherweise schon Ende 2006 die nächste Stufe der Erforschung mit Tierversuchen anlaufen könnte.“

Ebenfalls vom BMBF gefördert wird ein Verbundprojekt zur „Zellbasierten, regenerativen Medizin“, an dem Lübecker, Münchner und Berliner Forscher beteiligt sind. Sie versuchen unter der Leitung von Professor Ralf Paus (Klinik für Dermatologie an der Universität Lübeck) neue Haut zu züchten. Ihr Ausgangsmaterial sind Stammzellen, die sich – potenziell – zu jedem möglichen Zelltyp entwickeln können. Das Ausgangsmaterial stammt aus der Kopfhaut. Denn aus den menschlichen Haarfollikeln, das sind kleine Ausstülpungen nahe der Haarwurzel, lassen sich Stammzellen gewinnen. Sie können sogar relativ einfach entnommen und mittlerweile auch außerhalb des Körpers kultiviert werden. Die Steuerung der Differenzierung von Stammzellen in einen bestimmten



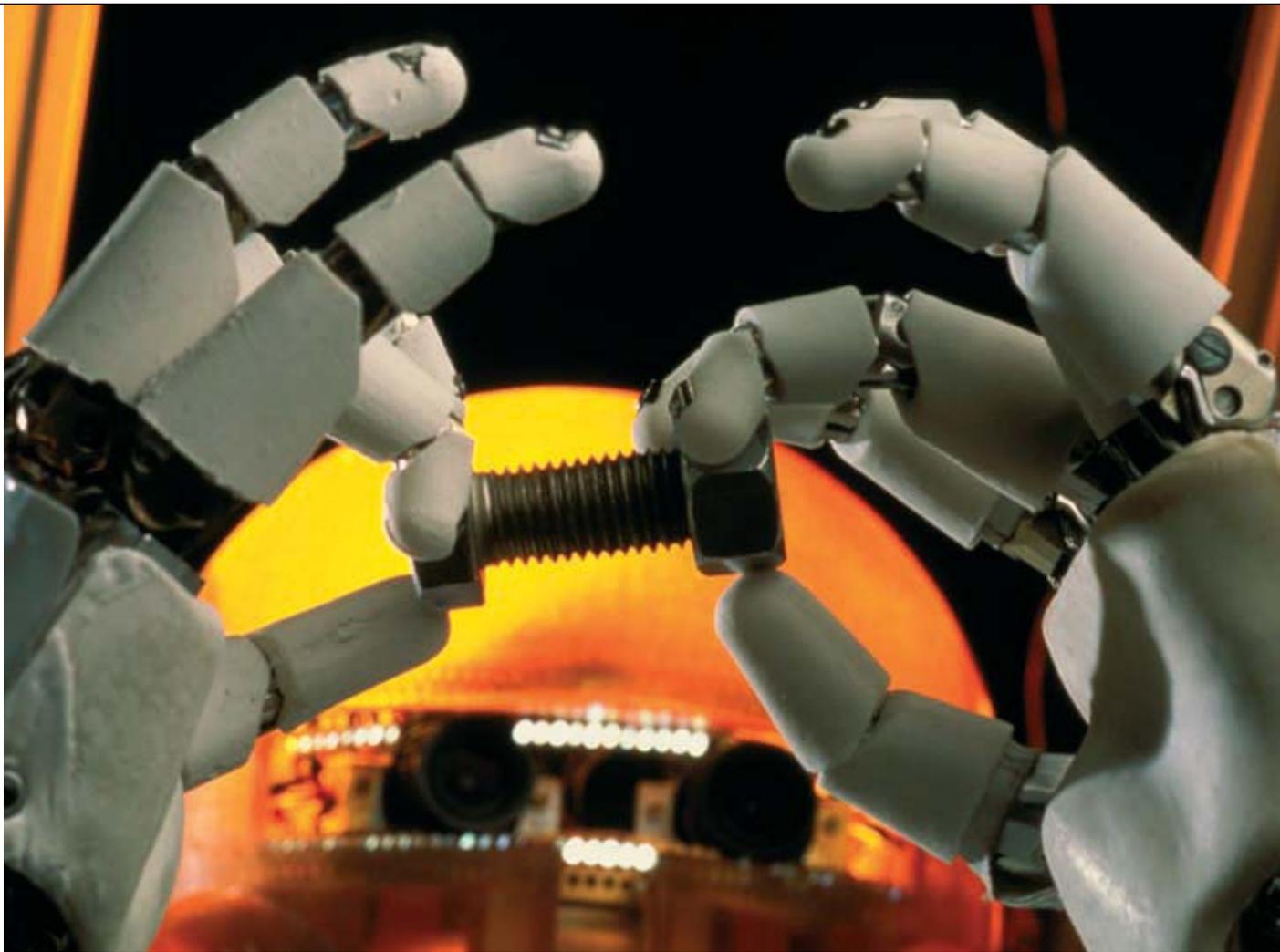
Die Dreiecksfelder sind typische Erkennungsmerkmale für die Hautoberfläche an Armen und Handrücken.

Querschnitt durch die menschliche Haut: Außen ist die Epidermis mit abgestorbenen, verhornten Hautzellen und einem Haar zu sehen, darunter liegt die Wachstumsschicht (rot) mit dem Haarschaft. Grau eingefärbt ist die aus Bindegewebe bestehende Lederhaut mit Blutgefäßen, Talg- und Schweißkanälen.

Zelltyp kann aber nur gelingen, wenn die dafür nötigen Bedingungen im Körper bekannt sind. Deshalb untersuchen die Wissenschaftler auch das Umfeld der Zellen im Haarfollikel. Zunächst zielt das Projekt darauf ab, aus den Stammzellen verschiedene Arten von Hautzellen wachsen zu lassen. Denn das ergäbe einen Regenerationspool für Gewebe bei ganz unterschiedlichen Hautdefekten. Ein weiter gestecktes Ziel der Forscher besteht darin, dreidimensionale Hauttransplantate zu züchten. Bei einer künftigen Anwendung würden Stammzellen aus den Haarfollikeln des Patienten eingesetzt, um dann autologes Gewebe transplantieren zu können.

### Nerven vertragen keinen Druck

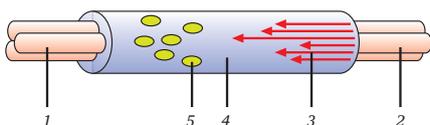
Auf die Selbstheilungskräfte des Körpers bei Nervenläsionen setzt dagegen Professor Burkhard Schloßhauer vom Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Institut an der Universität Tübingen. Schloßhauer und andere Forscher arbeiten an Verfahren, die Läsionen überbrücken und so den verletzten Nervenenden die Wuchsrichtung vorgeben. Denn ohne Hilfe wachsen verletzte Nerven oft gar nicht oder nur ungerichtet. In Frage kommen die Verfahren bei Schäden, die durch Schnittverletzungen auftreten können oder auch beim Zähne ziehen. Bislang wird bei derartigen Läsionen meist am



Roboterhände, die am Johnson Space Center in Houston (USA) entwickelt worden sind, können eine Mutter auf eine Schraube drehen.

Bein ein Stück Nerv entnommen, um die betroffene Stelle zu überbrücken. Dadurch entsteht aber an der Entnahmestelle eine weitere Läsion und der Patient trägt ein zweifaches Operationsrisiko.

„Mittlerweile sind aber auch schon fünf verschiedene synthetische Hohlröhren als Verbindungsstück zwischen den verletzten Nervenenden zugelassen“, berichtet Schloßhauer. „Das Problem dabei ist, dass sie nur bei einfachen Schäden helfen und nur maximal drei Zentimeter überbrücken können. Früher verwendete man nicht-abbaubare Implantate, worauf in manchen Fällen die Regeneration nachträglich



Aufbau eines Nervenimplantates: Aus den noch vorhandenen Stümpfen mit Nervenbündeln (1,2) wachsen feine Nervenfasern (3) in die Nervenleitschiene (4). Die Regeneration verläuft wesentlich besser, wenn zuvor spezielle Gewebezellen (5) in die Nervenleitschiene eingebracht wurden, da diese Gewebezellen Wachstumsfaktoren freisetzen. Die Nervenleitschiene ist abbaubar und löst sich nach der Regeneration der Nervenfasern auf.

wieder verloren ging. Da haben sich dann Hilfszellen an die neuen Nervenstücke angelagert, und in der Röhre wurde es zu eng: Druck vertragen Nerven gar nicht.“ Er selbst setzt deshalb auf Hohlröhren aus abbaubaren Materialien und ein präzises Timing. Denn die stützende Röhre darf nicht zu früh abgebaut werden, muss aber rechtzeitig für die Hilfszellen Platz machen. „Man muss auch verhindern, dass Fibroblasten aus der Umgebung einwandern, weil sie Narbenbildung und Wucherungen verursachen können“, so Schloßhauer. „Auf der anderen Seite ist der Nerv aber auf die Versorgung von außen angewiesen, besonders wenn er über lange Strecken wachsen muss. Ganz klar, das Nonplusultra-Material gibt es noch nicht. Aber unsere erste Variante hat im Tierversuch schon sehr gut funktioniert.“ Im Idealfall würden bei einer Nervenregeneration dann Motorik und Sensorik wiederhergestellt.

#### Armprothese mit Feedbacksystem

„Gefühlvoll“ zupacken, das kann auch die von Dr. Stefan Schulz und seinen Mitarbeitern am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Unterarmprothese. Das bedeutet, dass sie dank eines eigens entwickelten Feedbacksystems



*Karl-Heinz Ammon hat bei einem Arbeitsunfall seinen linken Arm verloren und trägt jetzt eine Armprothese. Mit der künstlichen Hand, die er mit seinen eigenen Muskelsignalen steuert, kann er sogar filigrane Dinge halten, ohne sie zu zerdrücken.*

und vieler aktiver Gelenke mit wenig Kraft Gegenstände sehr formschlüssig greifen kann. Außerdem verfügt sie über außergewöhnliche Beweglichkeit. Zylindergriff, Lateralgriff, Pinzettengriff, Hakengriff, ausgestreckter Zeigefinger – das ist kein Problem für die lebenssecht aussehende Hand. Kernstück des Systems ist eine Miniaturhydraulik. Sie besteht aus hydraulischen Antrieben, den flexiblen Fluidaktoren, die in den Fingergelenken sitzen. Sie werden über eine Hochleistungs-Miniaturpumpe mit Flüssigkeit befüllt, was eine geschmeidige und individuelle Bewegung der Finger erlaubt. „Insgesamt haben wir schon viele Details der fluidischen Handprothese gut gelöst“, erklärt Schulz. „Für eine dauerhafte Patientenversorgung ist es aber noch etwas zu früh. Trotzdem führen wir bereits mit mehreren Kliniken zusammen Patiententests durch.“ Die Steuerung der Hand erfolgt, wie bei allen gängigen Prothesen, durch Muskelbewegungen am Armstumpf. Langfristig könnte die Prothese auch durch Signale gesteuert werden, die direkt an entsprechenden Nerven gemessen werden. „Die dafür nötigen ‚Nervenstecker‘ sind aber noch in der Grundlagenforschung“, berichtet der Forscher. „Eines der Probleme besteht darin, dass Nerven sich zurückbilden, wenn sie nicht in einem geeigneten Gewebe, etwa in Muskulatur, enden.“

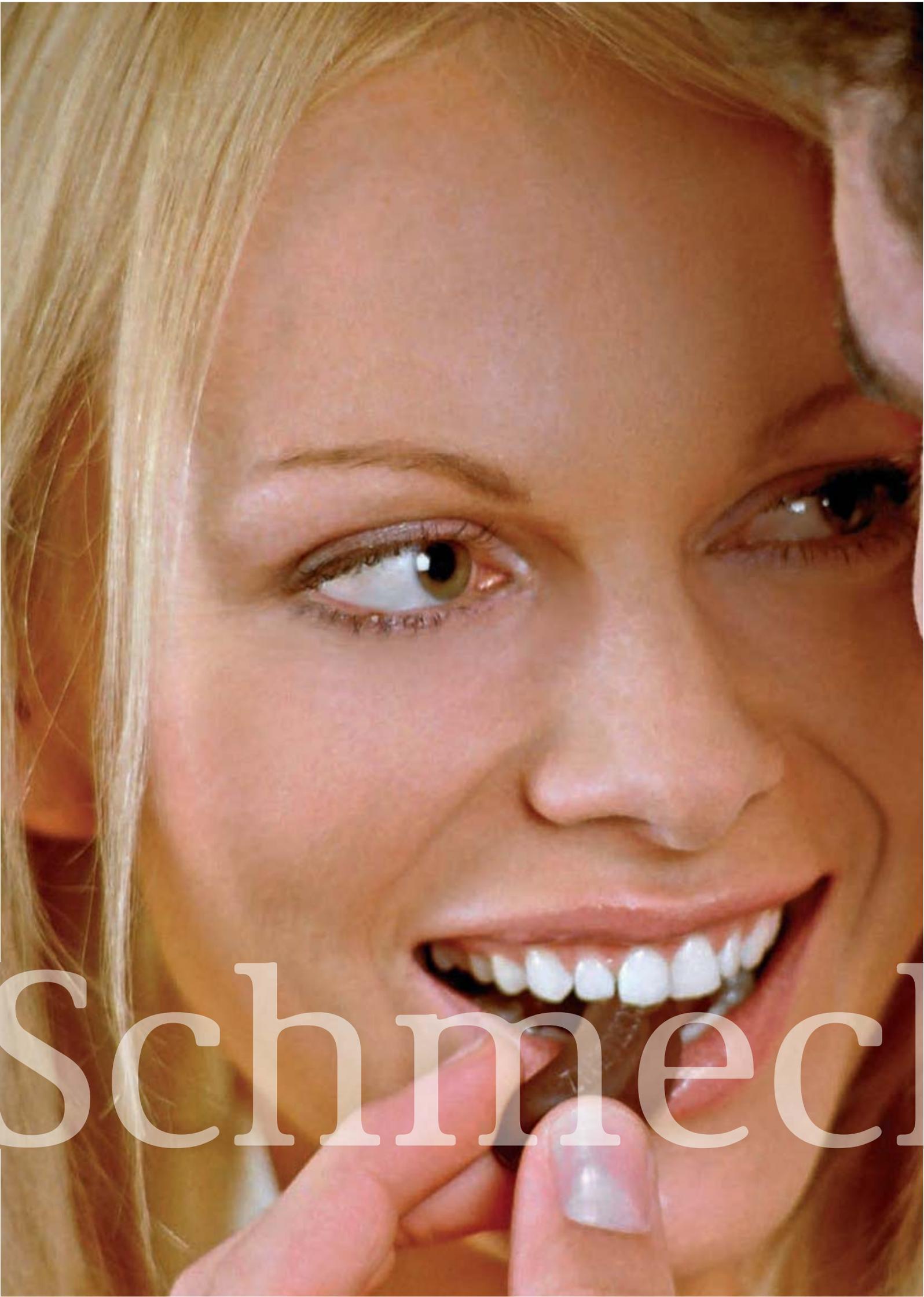
### Viel Körperkontakt, richtiges Körperschema

Zu wenig Stimulierung des Tastsinns kann möglicherweise die Gehirnaktivität verändern. „Wir haben vor Jahren Versuche zur Tastwahrnehmung gemacht“, berichtet Dr. Martin Grunwald, Leiter des Haptik- und EEG-Forschungslabors der Universität Leipzig. „Bei einem Test hat sich herausgestellt, dass nur eine Teilnehmerin damit große Schwierigkeiten hatte. Erst später haben wir herausgefunden, dass sie an Anorexia litt, also Magersucht.“ Bei dieser schweren Erkrankung hungern die Betroffenen, meist junge Mädchen, in manchen Fällen sogar bis zum Tode. Auch aufwendige Therapien verzeichnen oft nur mäßige Erfolge, unter anderem wegen der gestörten Körperwahrnehmung der Patientinnen und Patienten. Selbst bei starkem und sogar lebensbedrohlichem Untergewicht empfinden sie sich als unförmig dick.

„Wir haben dann EEGs bei Anorexia-Patientinnen gemacht, also ihre Gehirnströme gemessen“, so Grunwald. „Dabei hat sich gezeigt, dass die Aktivität im rechten Parietallappen bei ihnen deutlich reduziert ist. Dieser Bereich des Gehirns ist für die Integration körperlicher Reize zuständig und spielt wohl eine zentrale Rolle bei Körperschemastörungen.“



Die extremsten Veränderungen im EEG und bei den Tastsinnesleistungen haben wir bei den Todeskandidaten gefunden. Ich vermute, dass man nur dann ein richtiges Körperschema entwickeln kann, wenn man als Kind auch viel Körperkontakt hat. Bei uns aber gibt es heutzutage sehr viel Distanz.“ Nachholen lässt sich der fehlende Körperkontakt wahrscheinlich nur schwer. Trotzdem gelang Grunwald bei einer Patientin ein erstaunlicher Erfolg. Er ließ die 19-Jährige 15 Wochen lang dreimal täglich eine Stunde einen Neoprenanzug tragen, der gleichmäßigen Druck auf die Tastsensoren ausübt – und die Patientin nahm tatsächlich zu. „Der Effekt hielt leider nur ein paar Monate. Aber der Versuch hat gezeigt, dass man was machen kann. Wahrscheinlich sind die Chancen auf eine wirkliche Besserung bei jüngeren Betroffenen sehr viel größer.“



Schmeck

## Eine Frage des Geschmacks

„Geschmäcker sind verschieden“, sagt der Volksmund und hat damit vollkommen Recht. Die einen mögen Spargel, Brokkoli oder Kohl, andere meiden solches Gemüse. Ob die Vorliebe für oder die Abneigung gegen bittere Speisen und Getränke genetisch bedingt sind, darauf haben Wissenschaftler noch keine eindeutige Antwort gefunden. Dabei ist der Geschmackssinn relativ einfach strukturiert: Denn die auf der Zunge liegenden Geschmacksknospen können nur das Quintett Süß, Salzig, Bitter, Sauer und Umami erkennen und unterscheiden. Aber das reicht aus, um genießbare Nahrung von ungenießbaren Lebensmitteln zu unterscheiden. Anders als beim Hörverlust gibt es kein künstliches Schmeckgerät – dafür aber immer mehr Fachleute, die Lebensmittel ganz nach dem Geschmack der Verbraucher gestalten.



ken

## Wie funktioniert die Zunge?

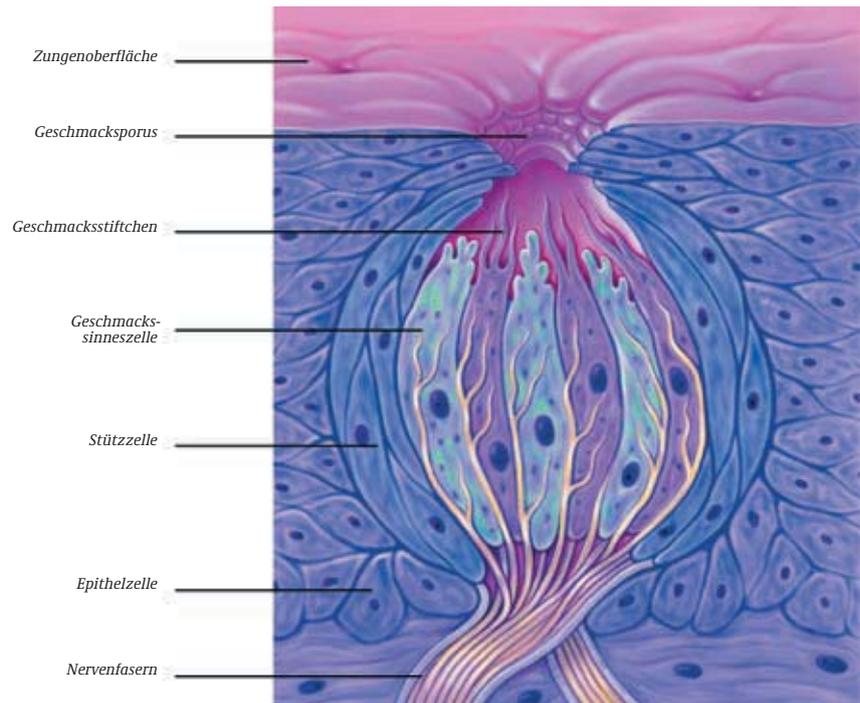
Welch süßes Lächeln, welch saure Miene – wir wissen, wie sehr Gaumenkitzeln unser Befinden steuern. Dabei kann der Mund nur fünf Geschmacksqualitäten erfassen: Süß, Salzig, Bitter, Sauer und *Umami*. *Umami* ist japanisch und bedeutet soviel wie fleischig und herzhaft. 1908 beschrieb der japanische Forscher Kikunae Ikeda (siehe auch „Wie die Zunge die Nahrung prüft“, S.61) erstmals die Geschmacksqualität von *Umami*, das proteinreiche Nahrungsmittel charakterisiert. Neben den fünf genannten und nachgewiesenen Geschmacksqualitäten werden einige weitere in der Wissenschaft diskutiert.

„Schmecken“ können spezialisierte Epithelzellen, die in rund 2.000 Geschmacksknospen über die Zunge verstreut sind und alle zehn Tage erneuert werden.

In jeder Geschmacksknospe liegen zehn bis fünfzig Sinneszellen sowie Stütz- und Stammzellen wie Orangenschnitze dicht nebeneinander. Über einen mit Flüssigkeit gefüllten Geschmacksporus ganz oben können Geschmacksstoffe Rezeptoren auf Fortsätzen, sogenannten Geschmacksstiftchen (Mikrovilli), der Sinneszellen erreichen. Manche Zellen sind auf Bitter, andere auf Süß, wieder andere auf Umami spezialisiert. Wie wir Salzig erfassen, ist noch offen (siehe „Wie die Zunge die Nahrung prüft“, S. 60).

Auf Bitterstoffe reagiert die Zunge besonders sensibel – wir schmecken schon sechs Milligramm bitteren Chinins in einem Liter Tonic Water. Bei Süß, Salzig und Sauer, bei natürlichen Zuckern, Kochsalz und Essig müssen die Konzentrationen 1.000-fach höher sein, damit wir sie bemerken. Werden die Sinneszellen aktiviert, reichen sie die Transmitter an benachbarte Ausläufer von Nerven. Und ab dann, auf der Nervenbahn ins Gehirn, herrscht beim Geschmackssinn ziemliches Chaos – unterschiedliche Geschmacksqualitäten nutzen offenbar die gleichen Wege.

Beteiligt sind vier große Nervenstränge. Fasern eines Seitenzweigs des VII. Hirnnervs, des Nervus facialis, verarbei-

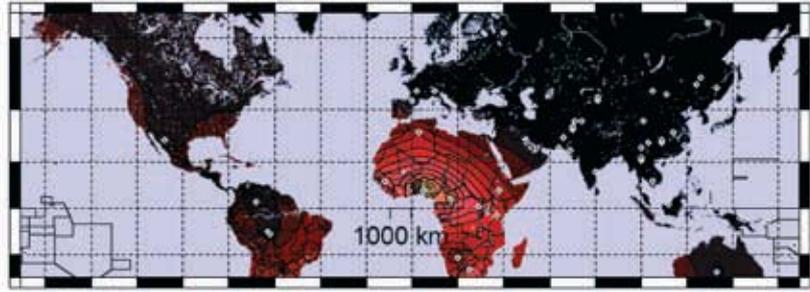


ten vor allem die Reize der Pilzpapillen vorne auf der Zunge. Fasern des XI. Hirnnervs leiten Signale von den hinteren Wall- und Blätterpapillen weiter. Fasern des X. sowie des V. Hirnnervs, des Nervus trigeminus, registrieren Reize von eher seltenen Geschmacksknospen auf Gaumen und Rachen. Der Rachen detektiert dabei obendrein überall in Mund, Hals und Nase die Form von Speisen, ihre Konsistenz, ihre Temperatur und ihre Schärfe. Das Gehirn muss später aus einem vielfältigen Reizmuster herausrechnen, was die Zunge gerade probiert.

Über die Zunge verstreut liegen die rund 2.000 Geschmacksknospen, eingebettet in drei verschiedenen geformten Papillen: Pilzpapillen gibt es überall auf der Zunge, die Blätterpapillen sind am hinteren Seitenrand zu finden und die sieben bis zwölf Wallpapillen liegen im hinteren Bereich der Zunge.

Zwischen Gehirn, Zunge und Gaumen gibt es vielfältige Wechselwirkungen. Steigen zum Beispiel die Pegel des Sättigungshormons Leptin, nimmt die Empfindlichkeit für Süß auf der Zunge ab. Nur logisch, denn wir sind ja schließlich satt.

# Die Küche des Frühmenschen



**Im Gegensatz zum modernen, heute lebenden Menschen hatte der Frühmensch einen empfindlicheren Sinn für Bittergeschmack. Das zeigen neueste Studien zur Wahrnehmung von Bitterstoffen.**

„Signal von TAS2R16, Variante N172, ist doppelt so hoch ...“ Man muss nicht Fachchinesisch können, um den Sinn solch kryptischer Labornotizen zu verstehen. Allerdings gibt der Blick in einen Arbeitsraum der Abteilung für Molekulare Genetik am Deutschen Institut für Ernährungsforschung (DIFE) in Potsdam-Rehbrücke zunächst auch kaum eine Vorstellung davon, wie spektakulär die Messungen sind, die hier stattfinden. Hier und da stehen Mikroskope auf den Tischen, darum herum die üblichen Werkzeuge der Molekularbiologie: Reagenzien, Pipetten, Brutschrank und Zentrifugen.

Der Gruppe um Professor Wolfgang Meyerhof gelingt es hier, Rezeptoren für Bitterstoffe, die sonst auf den Geschmackszellen in der Zunge vorkommen, in spezielle Nierenzellen zu schleusen. In diesem künstlichen System lässt sich untersuchen, wofür dieser und jener Rezeptor eigentlich da ist und was er misst. 20 bis 30 Stunden, nachdem das Gen für den Rezeptor in Zellen eingeschleust ist, werden sie mit einem speziellen Farbstoff beladen und bekommen dann einiges zu schmecken. Amygdalin beispielsweise, eine giftige Substanz, die im Bittermandelextrakt vorkommt. Vorsichtig pipettiert Dr. Bernd Bufo genau abgestimmte Mengen der Bitterstoffe in die Petrischalen. Dann schaltet er eine Kamera über dem Mikroskop ein. Sie misst die Fluoreszenzsignale, die in den Zellen entstehen, sobald sie einen der Bitterstoffe an ihrer Oberfläche detektieren. Wenig später liefert der Computer die Auswertung: „Die Fähigkeit dieser Rezeptorvariante, Bitterstoffe wie Amygdalin besser wahrzunehmen, war nach unseren Erkenntnissen ein wichtiger Schritt in der Frühgeschichte des Menschen“, erklärt Bufo.

2002 konnten die DIFE-Forscher den ersten menschlichen Rezeptor für Bitterstoffe charakterisieren. TAS2R16 (TAS steht für *taste*, R für *receptor*, dieser hat die Nummer 16) detektiert eine Großgruppe von Bitterstoffen, zyanogenen Beta-Glucopyranosiden. An die 2.500 Pflanzen weltweit bilden solche Stoffe, der Begriff zyanogen deutet das Giftpotenzial an. Denn bei der Verdauung entsteht aus ihnen das Atmungsgift Blausäure. Ein empfindlicher Sinn für Bittergeschmack konnte in

*Fast 98 Prozent aller Menschen haben heute die neu entwickelte Genvariante mit dem Kürzel N172 (schwarze Bereiche der Weltkarte). Nur in Afrika (rot gefärbt) kommt eine ältere, zweite Variante (K172) bei durchschnittlich 15 Prozent der Bevölkerung vor. Menschen mit der älteren, klassischen Rezeptorvariante K172 reagieren nur halb so empfindlich auf Bitterstoffe wie Menschen mit der „moderneren“. Aus der „afrikanischen“ K172-Variante hat sich vor 800.000 bis 80.000 Jahren die empfindlichere Form N172 entwickelt.*

früheren Zeiten lebensrettend sein, denn 50 Bittermandeln sind für einen Erwachsenen tödlich.

Geschmack hat man – oder auch nicht. Homo sapiens sapiens, der moderne Mensch, hat offenkundig in seiner Evolution unterschiedliche Geschmacksvorlieben besessen. 2005 lieferte die Zusammenarbeit von Forschergruppen des University College London, des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) und des Deutschen Instituts für Ernährungsforschung dafür einen faszinierenden Beleg. Die Forscher aus London und Cambridge analysierten in Blutproben von fast 1.000 Menschen weltweit das Gen für den Bitterrezeptor TAS2R16. Das Ergebnis: Die Menschheit hat 16 Varianten dieses Gens, die meisten davon kommen sehr selten vor. Fast 98 Prozent aller Menschen haben heute eine Genvariante mit dem Kürzel N172. Nur in Afrika kommt eine zweite Variante, K172, bei knapp 15 Prozent der Bevölkerung vor. K172 ist die ältere, quasi die klassische Variante, aus der sich N172 irgendwann vor 800.000 bis 80.000 Jahren entwickelt hat.

Die Analysen in Potsdam zeigten, dass die „afrikanische“ Variante des Rezeptors nur etwa halb so empfindlich auf die Bitterstoffe reagiert wie die „modernere“. „Die Fähigkeit, blausäurebildende Substanzen in pflanzlicher Nahrung besser zu schmecken, war offenkundig für den Frühmenschen von Vorteil“, kommentiert Wolfgang Meyerhof. „Denn der neue Rezeptortyp ist entstanden, bevor der moderne Mensch von Afrika aus den Rest der Welt besiedelte und findet sich heute weltweit.“ Nur in Afrika hat sich mancherorts die Ursprungsvariante bis heute erhalten. Das könnte an der Malaria liegen. Wer blausäurehaltige Nahrung zu sich nimmt, hat zwar ein erhöhtes Risiko für eine Sichelzellanämie bei den roten Blutkörperchen. Doch diese eigentlich gefährliche Krankheit bietet andererseits gegen manche Malariaerreger einen Vorteil. „Es ist denkbar, dass der Verzehr größerer Mengen zyanidhaltiger Pflanzen einen gewissen Schutz vor Malaria geboten hat“, erläutert Wolfgang Meyerhof. So finden die modernen Molekularbiologen des Geschmacks sogar Fährten bis in die Küche des Frühmenschen zurück.

## Manche mögen einfach keinen Spinat



**Wenn jemand Kohl, Broccoli und Spinat nicht leiden kann, stecken vielleicht auch genetisch unterschiedliche Geschmackspräferenzen dahinter. Professor Wolfgang Meyerhof, Leiter der Abteilung für Molekulare Genetik am Deutschen Institut für Ernährungsforschung (DIFE) in Potsdam-Rehbrücke, warnt dennoch vor voreiligen Schlüssen.**

**Können Sie Präferenzen oder Abneigungen bei Spinat, Spargel oder anderem eher bitteren Gemüse generell an den Genen für Geschmacksrezeptoren dingfest machen?**

Derzeit kaum. Wir können Korrelationen zwischen Genvarianten bei Bitterrezeptoren und deren Empfindlichkeit darstellen. Und ein Unterschied in der Empfindlichkeit um den Faktor 1.000, wie bei einem Rezeptor beschrieben (siehe „Wie die Zunge die Nahrung prüft“, S. 60 ff.), hat sicherlich Auswirkungen auf die individuellen Geschmackspräferenzen. Ich bin dennoch überzeugt, dass eine simple Eins-zu-eins-Verknüpfung à la 'dieser Rezeptor, jener Geschmack' nicht



geht. Manche mögen Campari, andere hassen ihn. Manche trinken starken Kaffee, manche nur mit viel Zucker und Milch. Da kommt mehr zusammen als nur die Vorliebe oder Abneigung gegen bestimmte Bitterstoffe.

**Gibt es nicht schon Arbeiten, die sogar einen Zusammenhang zwischen der Empfindlichkeit für Bitterstoffe und einem erhöhten Alkoholkonsum finden?**

Ich bleibe dabei: Ein einzelner Rezeptor allein bestimmt auch nicht über den Alkoholkonsum.

**Stecken denn wenigstens genetische Gründe dahinter, wenn manche Kinder keinen Spinat mögen, andere ihn aber gerne essen?**

Wir vermuten solche Zusammenhänge. Ja, durchaus. Menschen mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Bitterstoffen könnten eine Tendenz haben, Gemüse wie Kohl und Broccoli zu meiden. Wir brauchen aber für gesicherte Aussagen erst saubere, kontrollierte Studien. Sie können, wie in der Vergangenheit schon passiert, bei Studien nicht einfach Spinat verfüttern und dann auf den Einfluss des Bittergeschmacks schließen. Sie müssen gezielt einzelne Substanzen und Rezeptoren testen. Spinat hat sehr viele Bitterstoffe.

**Lassen sich Bitterrezeptoren gezielt mit Hemmstoffen blockieren?**

Dazu laufen bei einigen Firmen bereits Projekte. Es wird sicherlich einmal möglich werden, mit Bitterblockern die Einnahme von Medikamenten leichter zu machen. Jetzt, wo wir die Rezeptoren für Bitter besser verstehen.

**Bleibt die angeborene Abneigung gegen Bitter ein Leben lang bestehen?**

Sie wird mit den Jahren eher schwächer. Wir alle mögen doch irgendwo etwas Bitteres – Bitterschokolade, Kaffee oder auch Bitterstoffe im Orangensaft. Es könnte sein, dass eine Abnahme der Aversion vor Bitter im Lauf des Lebens einen gewissen Schutz vor Krebs bietet, weil manche Bitterstoffe anti-karzinogen wirken. Ob da etwas dran ist, bliebe zu untersuchen.

*Keinen Spinat bitte! Wenn Kinder und Erwachsene dieses Gemüse meiden, könnte ihre Abneigung mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Bitterstoffen zusammenhängen.*

# Bittere statt süßer Erdbeertorte

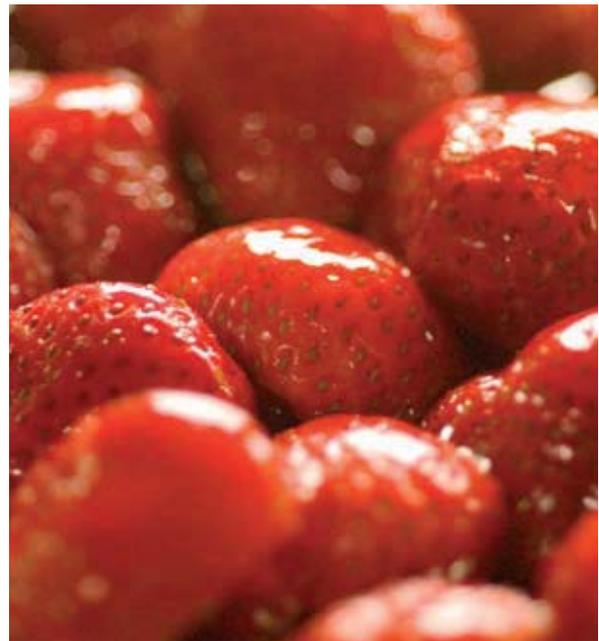
Eine Therapie von Schmeckstörungen ist schwierig. Zum Glück zeigen sie sich jedoch oft nur einseitig, manche verschwinden von ganz alleine.

Auch Experten haben nur Schätzungen. Eine halbe Million Menschen könnten hierzulande an Schmeckstörungen leiden. Frauen scheinen häufiger betroffen zu sein als Männer. Weil die Sinnesempfindung oft nur auf einer Zungenseite ausfällt, wird sie von vielen Betroffenen lange Zeit gar nicht gemerkt. „Der Leidensdruck ist aber bei chronischen Formen für die Betroffenen genauso groß wie bei schweren Riechstörungen“, meint Professor Hilmar Gudziol, Direktor der HNO-Klinik der Universität Jena. Überzeugende Erklärungen sind ebenso selten wie erfolgreiche Therapien.

Die Diagnose von Schmeckstörungen ermöglichen heute standardisierte Tests für die Wahrnehmungsschwelle und das Identifikationsvermögen. Das geht mit Tropfen, die ein Arzt auf die Zunge träufelt, oder süßen, bitteren, salzigen Teststreifen, sogenannten *taste strips*.

Die häufigsten Schmeckstörungen sind Parageusien und Phantogeusien. Bei **Parageusien** schmecken Betroffene falsch, sie empfinden beispielsweise ein Stück Erdbeertorte als bitter. Patienten mit **Phantogeusien** hingegen schmecken ständig etwas, ohne dass sie einen Bissen im Mund haben. Die Ursachen können Entzündungen auf der Zunge sein, Probleme an Nerven, die Geschmacksreize vom Mund in das Gehirn leiten, bis hin zu Schäden im Gehirn, etwa als Folge eines Schlaganfalls. Relativ häufige Ursachen von Schmeckstörungen sind Probleme im Mittelohr. Knochenentzündungen im Bereich des Mittelohrs, sogenannte Choleastome, können eine dort entlang laufende Faser der Nervus facialis schädigen. Die Folge ist meist der einseitige Ausfall des Süßgeschmacks im vorderen Zungenabschnitt, gekoppelt mit Fehlwahrnehmungen, zum Beispiel einem metallischen Geschmack. Zum Glück verschwindet die Fehlwahrnehmung oft im Laufe eines Jahres.

Therapien sind hier Mangelware. Das Team um Thomas Hummel von der Universität Dresden und Siegfried Heckmann von der Universität Erlangen berichtete 2005 von Erfolgen mit Zinkbehandlungen. Bei Patienten mit geschmacklichen Fehlwahrnehmungen, die drei Monate lang Zinktabletten eingenommen hatten, waren die Symptome gegenüber einer Placebogruppe vermindert. Zink könnte die



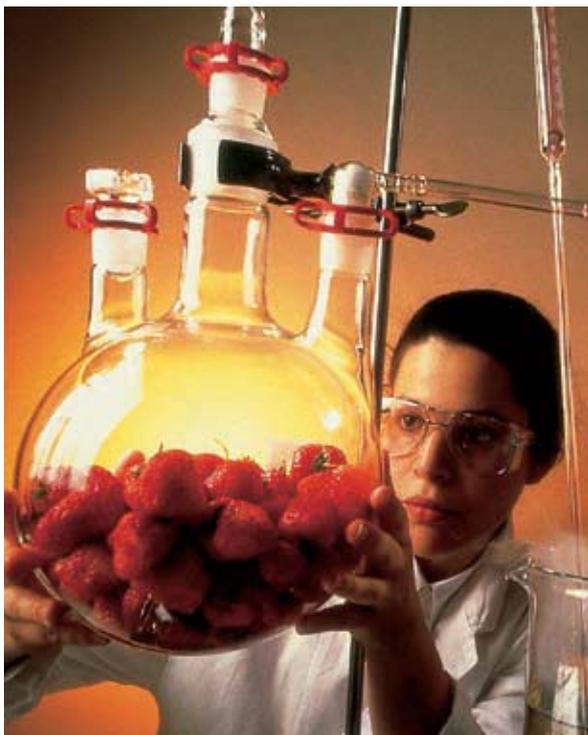
Ein Stück Erdbeerkuchen kann ein Parageusie-Patient beispielsweise nicht als fruchtig und süß empfinden, sondern als bitter. Der Betroffene schmeckt falsch.

Regeneration der Sinneszellen auf der Zunge unterstützen. „Eine Behandlung mit Zink kommt aber nur bei Zinkmangel infrage“, meint Hilmar Gudziol. Auch **Ageusien**, der partielle oder völlige Ausfall des Schmecksinns, haben viele Ursachen. Manche Medikamente, Diabetes- oder Schilddrüsenerkrankungen können die Sinneszellen schädigen. Und es gibt Hinweise auf genetische Defekte: Manchen Menschen fehlt der Umami-Geschmack offenbar von Geburt an.

Besonders rätselhaft bleibt das **burning mouth syndrome**. Betroffene haben ein chronisches Brennen auf Zunge und Gaumen. Die Erklärungsansätze reichen von hormonellen Störungen – überdurchschnittlich oft sind Frauen nach der Menopause betroffen – bis zu Nervenfehlleitungen. In schweren Fällen hilft eine Betäubung der Zunge mit Lokalanästhetika als Spray oder Dragee. Betroffene müssen oft Zutaten beim Kochen exakt mit der Briefwaage abwiegen. „Sonst steigt bei fehlendem Sinn für Salz und versalzenem Essen das Risiko für einen Bluthochdruck“, betont Gudziol. Es gebe, anders als beim Hörverlust, leider kein künstliches Schmeckgerät. Gudziol: „Helfen kann eher eine biologische Zunge, etwa die Ihres Partners.“

# Geschmack und noch mehr Geschmack

Sensorikforscher und Flavoristen gestalten heute Lebensmittel ganz nach den Geschmacksvorlieben der Konsumenten. Die Kundenwünsche sind weltweit allerdings ziemlich unterschiedlich.



Deutschland, sagt einer, der viele Kulturen kennt, sei „hyperkonservativ“. Gemeint sind allerdings keine politischen Ansichten. „Deutsche Konsumenten kriegen Sie bei Chips mit Paprika und nochmals Paprika“, weiß Dag Piper. „Das ist hier Tradition und das bleibt wohl auch so.“ Der Mann ist Chef der Sensorik- und Konsumentenforschung der weltweit operierenden Firma Symrise in Holzminden, Südniedersachsen. Mit 5.100 Mitarbeitern und 1,15 Milliarden Euro Jahresumsatz ist Symrise in Europa die Nummer eins und weltweit die Nummer vier bei Aromen und Düften. Piper leitet ein globales Team, das genau misst, was König Kunde gerade wünscht. Lebensmittelhersteller erfahren so, welches Aroma ihre Produkte haben müssen, um am Markt zu bestehen. Aus Umfragen und Studien entstehen in Holzminden Landkarten des europäischen und weltweiten Geschmacks. „Wir untersuchen die Nuancen und schauen uns an, wo man welches Aroma einsetzen könnte“, erklärt Piper.

Mindestens 15 Prozent aller Lebensmittel werden heute aromatisiert. An die 4.000 Aromastoffe sind bekannt. Experten unterscheiden natürliche von naturidentischen Aromastoffen. Dazu zählt beispielsweise Vanillin, eine Komponente der Vanilleschote. Naturidentische Stoffe werden heute meist synthetisch oder biotechnologisch produziert. Nur 15 künstliche, rein synthetische Aromastoffe sind hierzulande zugelassen, darunter das Ethylvanillin für Puddingpulver. Es schmeckt wie Vanillin, aber doppelt bis dreimal so intensiv. Fest steht: Der Verbraucher will Geschmack und noch mehr Geschmack. Erdbeeraroma besteht aus mindestens 350 Einzelsubstanzen, schätzt Piper. Doch reicht Erdbeermus alleine für einen Erdbeeryoghurt fast nirgends mehr aus. Den Fruchtnoten wird mit Aromen nachgeholfen. Dabei sind die Konsumenten allein bei Erdbeergeschmack in bis zu sieben Richtungen segmentiert. Ein größerer Teil hierzulande mag im Joghurt „konfitürigen“ Erdbeergeschmack, was eher für süß und fruchtig steht. Ein anderer gibt „grünen Noten“ den Vorzug – Erdbeergeschmack mit einem Hauch des Dufts von frisch gemähtem Gras.

*Foodcreation* – „bitte nicht *Designfood*, das klingt so negativ“, sagt Piper – ist Arbeit an vielen Fronten. Geschmack an sich ist bereits eine Mixtur aus verschiedenen Wahrneh-

*Mit der Vakuum-Headspace-Technik können die chemischen Bestandteile von Flüssigkeiten wie Fruchtsäften (oberes Bild), aber auch von festen Stoffen wie etwa Erdbeeren (unteres Bild) bestimmt werden.*



mungen. Da ist das Aroma von Speisen, der Duft, (engl. *flavor*), den uns das retronasale Riechen vermittelt. Dann der Geschmack, (engl. *taste*), mit gerade mal fünf Hauptrichtungen: Süß, Sauer, Salzig, Bitter und Umami. Hinzu kommt das *mouth feeling*, das, was der Tastsinn im Mund von der Nahrung erfasst – allem voran die Textur von Speisen, etwa wie cremig ein Joghurt dem Gaumen schmeichelt oder wie genüsslich die Chips beim Zubeißen krachen.

#### Deutsche bevorzugen Chips mit reichlich Paprika

Stichwort Chips. Wohl jeder ahnt beim Kauf, dass seine Vorliebe für eine, vielleicht auch zwei von über einem halben Dutzend bekannter Marken nicht nur an der Qualität der Kartoffelchen liegt, die der Hersteller gerade verwendet. Wie viele Aromen Firmen wie Symrise bei der Chipsherstellung beisteuern, verrät Dag Piper nicht. Dass allerdings reine, frittierte Kartoffelscheibchen, im Fachjargon die „Naturbase“, nicht gut schmecken, daran besteht kein Zweifel. Fünf, sechs Wochen, vielleicht auch schon mal ein viertel Jahr vergehen, bis die Flavoristen eines Unternehmens ein Aroma ausgetüfelt haben. Pipers Leute testen an Probanden, was die von einem neuen Geschmack halten. Eventuell muss der Flavorist danach erneut ran, hie und da die Richtung noch etwas ändern, weiter feilen. In Deutschland landet in Chips regelmäßig reichlich Paprika. Schon in Frankreich, so Piper, sei damit allerdings kaum Furore zu machen: „Es gibt große Unterschiede nach Ländern und Kulturkreisen. Franzosen mögen Chips vor allem mit Salz und nicht viel mehr.“

Generell driften die Vorlieben weltweit beträchtlich auseinander, die Konsumentenforscher ermitteln eine Fülle divergierender Trends. Die Szene reicht von *healthy food* (fettarm, kalorienarm – vor allem in Ländern mit zu üppig

gedecktem Tisch und Übergewichtsproblemen, einschließlich Deutschlands) über *eat on the move* (der schnelle Happen, der mal eben im Laufschrift von einem Termin zum nächsten goutiert werden will) bis zu *ethnic food* – im Vormarsch sind da zum Beispiel die „Spicy-Noten“: scharfe Gewürzkombinationen, etwa Limone mit Chili oder Erdbeere mit Pfeffer. Im Vormarsch ist in einigen Marktsegmenten auch *ethic food* – Lebensmittel, die unter Einhaltung ethischer Standards produziert werden. Dafür steht etwa das Transfair-Siegel, aber auch das *slow food movement*, bei dem gerade besonders langsames Essen und Genießen üblich ist.

Diesen vielfältigen Ansprüchen, gelegentlich gar Zielkonflikten, müssen Hersteller heute genügen, dabei hilft ihnen die richtige Aromenmischung. So leidet bei fett- und salzreduzierten Lebensmitteln schnell der Geschmack, denn Fett und Salz sind die Geschmacksförderer schlechthin. Doch anders als noch in den 1980er Jahren, meint Piper, gelänge es heute dank „moderner Technologien“ fettarm, salzarm und geschmackvoll in Einklang zu bringen. Nicht nur bei Chips. „Auch fettarmer Joghurt schmeckt heute gut. Bei den ersten Produkten, Anfang der 80er Jahre, hatte man noch ein Gefühl von pelzig im Mund, haarig und völlig ungenießbar.“

Und wohin geht die Reise beim Geschmack in der nächsten Generation? Die Antwort des dreifachen Vaters Dag Piper überrascht. Denn er rät zur Vielfalt und zum Besuch des Wochenmarkts. Kinder dürften keine eingefahrenen Essgewohnheiten entwickeln; wichtig sei, immer wieder etwas Neues vorzusetzen. Und manche müssten heute wieder lernen, dass Spinat und Fisch eigentlich nicht viereckig sind, dass Erdbeeren und Himbeeren beide rot sind, aber ganz unterschiedlich duften und schmecken. „Viele Konsumenten sollten Nase und Gaumen mehr schulen, mehr frische Ware kaufen“, sagt der Chefforscher eines großen Aromenherstellers.

## Aus der Forschung: Wie die Zunge die Nahrung prüft

Der Geschmackssinn gilt als schlicht, weil er nach heutiger Kenntnis nur fünf Sinnesqualitäten unterscheiden kann. Doch neue Einblicke in seine Verschaltung zeigen nicht nur eine extreme Komplexität. Die Genetik des Geschmackssinns lässt Rückschlüsse auf die Evolution des Menschen zu.



*Geschmackstest im Sensoriklabor des Deutschen Instituts für Ernährungsforschung: Eine Probandin verkostet verschiedene Orangensäfte (oben). Wie die Zelloberflächen-Expression von Geschmacksrezeptoren aussieht, analysiert der DIFE-Forscher Dr. Bernd Bufe an einem speziellen Mikroskop.*

Brei mit Gemüsegeschmack ist nicht jedermanns Sache. Wenn das Baby nicht will, sieht der Küchentisch schnell scheußlich grün, rot oder gelblich aus. Doch können sich Mütter die Arbeit beim Füttern offenbar ein wenig erleichtern, wie Studien von Forscherinnen um Julie A. Mennella vom Monell Chemical Senses Center in Philadelphia (USA) andeuten. Der Nachwuchs soll Möhren mögen? Lässt sich schaffen: Mutter muss vor der Geburt und während der Stillphase nur ordentlich Möhrensaft trinken!

Knapp sechs Monate nach der Geburt baten die Wissenschaftler 46 Mütter und Kinder ins Studio. Die eine Hälfte der Mütter hatte im letzten Drittel der Schwangerschaft oder in den ersten zwei Monaten nach der Geburt kräftig Möhrensaft getrunken. Die andere Hälfte trank Wasser. Während Muttern dem Nachwuchs erstmals Brei mit Möhrengeschmack fütterte, hielten die Wissenschaftler die Reaktion der Säuglinge auf Video fest. Das Ergebnis: Kinder, deren Mütter zuvor Karottensaft getrunken hatten, verspeisten den Brei mit deutlich mehr Vergnügen als wenn es nur Wasser gegeben hatte. Schon im Mutterleib, so das Fazit, prägt die Ernährung der Mutter unsere späteren Vorlieben bei Tisch. Vielleicht, so die Autorinnen der Studie, liegt hier gar der Grund für kulturelle Vorlieben. Dafür, dass Mexikaner zeitlebens Tortillas und Chili mögen, Bundesdeutsche jedoch eher Schinken bevorzugen.

Allerdings handelt die Studie eigentlich nur am Rande vom Geschmack. An die 90 Prozent dessen, was wir „schmecken“, beruht auf der Leistung der Nase. Egal ob wir Karotten oder Rotwein zu uns nehmen: Mit jedem Bissen und jedem Schluck strömen Hunderte Duftstoffe der Nahrung vom Mund zu den Riechsinneszellen. Der Geschmackssinn unterscheidet hingegen lediglich fünf Qualitäten. Bewiesen ist seine Differenzierung von Bitter, Süß, Sauer, Salzig und Umami. Doch das reicht für seine Funktionsfähigkeit. „Schmecken ist anders als Riechen ein Nahsinn, mit dem Organismen die Speisen auf ihre Verträglichkeit prüfen“, erklärt Professor Wolfgang Meyerhof, Leiter der Abteilung Molekulare Genetik am Deutschen Institut für Ernährungsforschung (DIFE) in Potsdam-Rehbrücke. Bitter dient zur Detektion von giftigen Stoffen. Jede zehnte Pflanze bildet giftige Bitterstoffe – chemisch eine sehr heterogene Gruppe mit Tausenden von Substanzen. Süß signalisiert uns hingegen: „Gut verträglich, mehr davon!“ Süße zeichnet kalorienreiche Kohlenhydrate oder Proteine aus. Auch Umami signalisiert Organismen „Weiteressen!“; denn dabei handelt es sich um eiweißhaltige, kalorienreiche Nahrung. Der Sinn für Sauer könnte sich

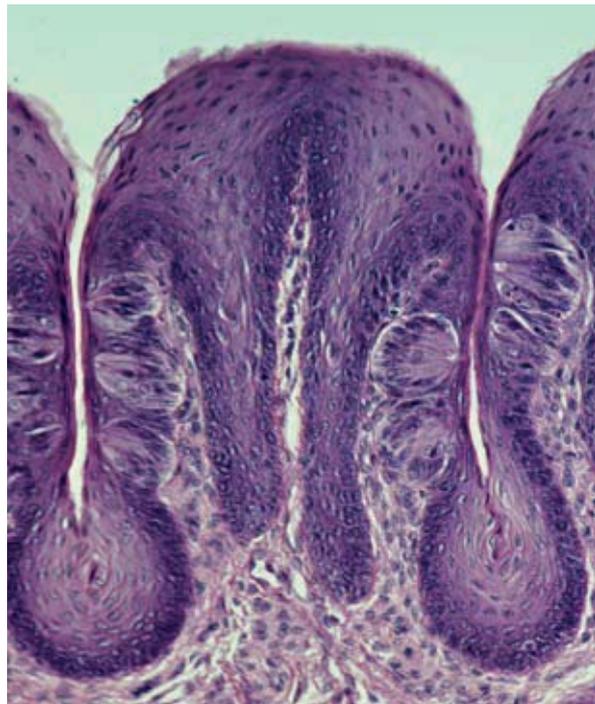


*Um eine gleichmäßige Ionenkonzentration im Körper aufrecht zu erhalten, braucht der menschliche Organismus Salze. Ist zuviel Kochsalz im Essen, erkennt das die Zunge sofort.*

wiederum entwickelt haben, um unreife Früchte zu erkennen. Salze brauchen Organismen, um eine gleichmäßige Ionenkonzentration im Körper aufrecht zu erhalten. Nicht nur Kochsalz, auch andere Salze, wie Lithiumchlorid oder Calciumchlorid, schmecken für uns salzig und attraktiv. Versalzene Speisen kann die Zunge hingegen rechtzeitig erkennen und meiden.

### Rezeptoren erkennen tausende von Bitterstoffen

Gegenüber den Riechforschern liegen die Geschmacksforscher zeitlich etwas zurück. 1991 wurden die ersten Riechrezeptoren identifiziert, 1999 der erste Kandidat für einen Geschmacksrezeptor präsentiert – von zwei in der Geschmacksforschung führenden US-amerikanischen Forschergruppen, der um Charles S. Zuker an der University of California in San Diego und der um Nicholas J. Ryba von den National Institutes of Health (NIH) in Bethesda. Ein Jahr später konnte eine Gruppe um Linda B. Buck bei der Maus die ersten Bitterrezeptoren sequenzieren. Heute steht fest: Im Mund befindet sich eine ganze Familie von ihnen, genannt TAS2R (für *taste 2 receptors*). Menschen haben 25, manche sogar 26 funktionsfähige Rezeptoren für Bittergeschmack, die tausende von Bitterstoffen erkennen können. 2001 identifizierten gleich sechs Gruppen die Komponenten des Rezeptors für Süßgeschmack, genannt TAS1R2 und TAS1R3. Zwar gibt es in der Nahrung ebenso viele süß schmeckende wie bittere Substanzen, doch kommen

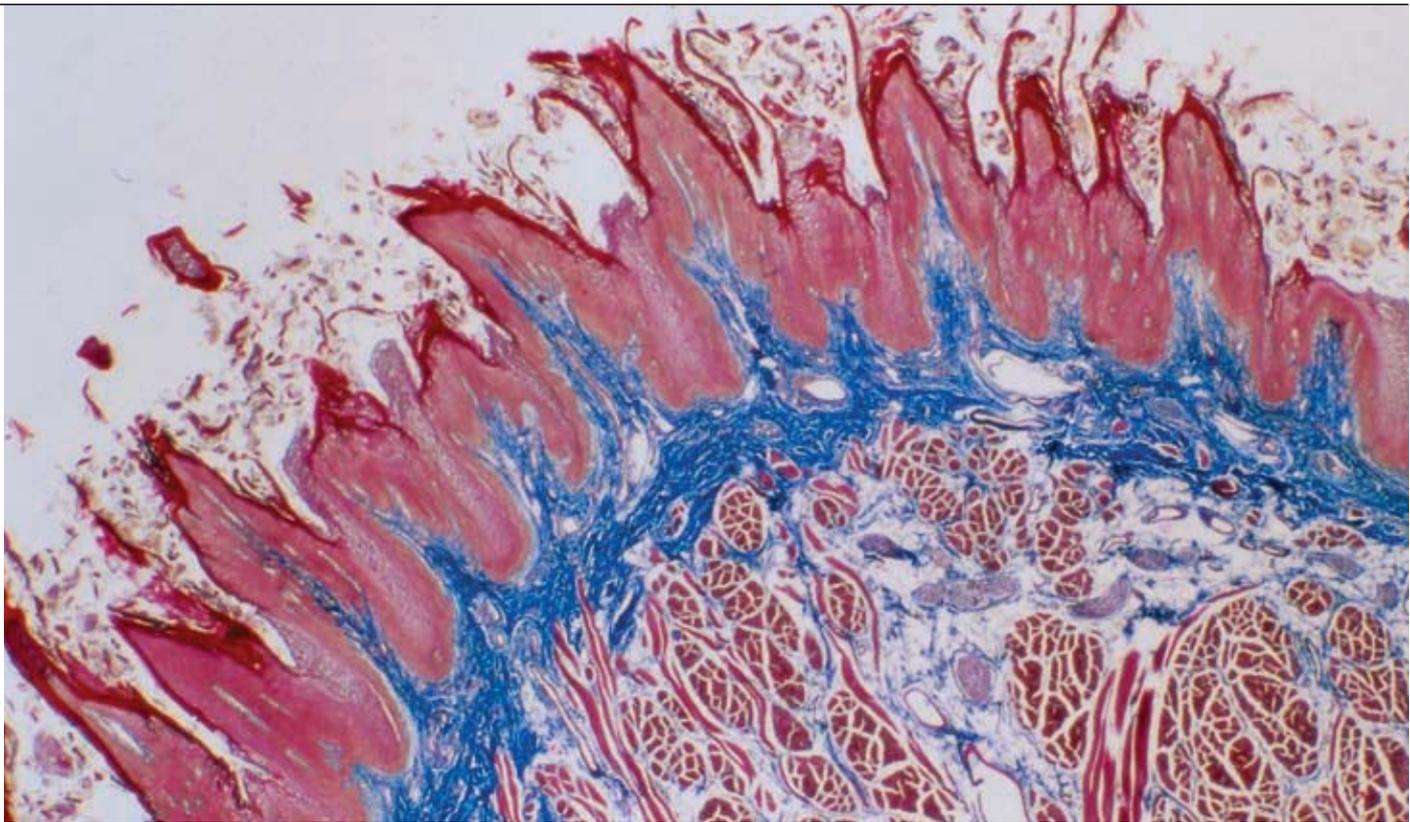


*Auf der Schleimhaut der Zunge sind die Zungenpapillen als kleine Erhebungen zu erkennen. In den Seitenwänden der Papillen liegen die länglichen Geschmacksknospen.*

Organismen überraschenderweise beim Süßgeschmack und bei Umami mit einem einzigen Rezeptor aus.

2002 hatten Forscher um Zucker und Ryba auch den Rezeptor für Umami dingfest gemacht, ein TASR1/TASR3-Heteromer. Damit bewies die Molekularbiologie, dass es den Sinn für Umami wirklich gibt. Bereits 1908 hatte Kikunae Ikeda, Professor an der Tokyo Imperial University, das Salz einer Aminosäure, das Natrium-Glutamat, als Urheber für den feinen Würzgeschmack in getrocknetem Seetang ausgemacht. Natrium-Glutamat ist heute weltweit als Geschmacksverstärker im Einsatz.

Bei den Rezeptoren für Bitter, Süß und Umami gibt es eine Parallele zum Riechen. Für diese drei Geschmacksqualitäten setzt auch die Zunge auf G-Protein-gekoppelte Rezeptoren. „Wie bei Duftstoffen geht es auch auf der Zunge um den Nachweis relativ großer Moleküle, die eine Zelle nicht aufnimmt, sondern draußen auf der Oberfläche detektiert“, erklärt Meyerhof. Sauer hingegen wird nach jüngsten Erkennt-



Die Papillen (rot) auf der Zungenoberfläche geben der Zunge ihr typisches mikroskopisches Relief.

nissen der Gruppe um Zuker und Ryba durch einen Ionenkanal vermittelt. Das sogenannte PKD2L1-Protein ist dafür verantwortlich. Es schleust die kleinen Wasserstoffionen in die Zelle ein. Vieles spricht dafür, dass auch beim Salzgeschmack Ionenkanäle in den Geschmackszellen beteiligt sind. Womöglich ist der epitheliale Natriumkanal aktiv (ENaC von *epithelial sodium channel*). In der Niere sorgt er dafür, dass Natriumionen in den Körper resorbiert werden. Dieser Kanal kann mit dem Wirkstoff Amilorid blockiert werden. Nierenkranke erhalten ihn als Medikament, um die Harnausscheidung (Diurese) zu fördern. Nagetiere, die Amilorid erhalten, verlieren weitgehend die Fähigkeit, Salz zu schmecken. Der definitive Nachweis für diesen Salzrezeptor steht aber aus.

#### Manche Menschen schmecken giftiges PTC

Besonders spannend sind erste Detailergebnisse beim Bittergeschmack. Dessen Erforschung beim Menschen begann Anfang der 1930er Jahre in einem Labor der Firma Du Pont de Nemours in Wilmington (USA). Der Chemiker Arthur L. Fox füllte eines Tages ein weißes Pulver in eine Flasche und „etwas flog in der Luft herum“, wie er 1932 in den *Proceedings* der National Academy of Sciences berichtete. Während Fox nichts weiter bemerkte, beschwerte sich ein Kollege über den bitteren Geschmack des Staubs. Die Substanz war das giftige Phenylthiocarbamid (PTC). PTC ist eine synthetische Verbindung, die in der Natur nicht vorkommt. Rasch wurden Genetiker auf Foxs Bericht aufmerksam. Einige Dutzend Studien zeigten schon in den 1930er Jahren, dass sich die Menschheit offenbar, genetisch bedingt, generell in

sogenannte PTC-Schmecker und -Nichtschmecker spaltet. In Europa liegt das Verhältnis bei 70 Prozent Schmeckern zu 30 Prozent Nichtschmeckern. Der Grund dafür blieb jahrzehntelang unbekannt.

Erst 2003 konnte eine Gruppe um David Drayna und Unkyung Kim von den NIH in Rockville (USA) das Gen für jenen Bitterrezeptor auffindig machen, der uns PTC schmecken lässt. Er heißt TAS2R38. Mehr noch: Meistens stecken Mutationen in diesem Gen dahinter, wenn Menschen PTC nicht schmecken können. Die Empfindlichkeit der verschiedenen Rezeptorvarianten variiert um den Faktor 1.000. Dies zeigen Versuche der Gruppe um Wolfgang Meyerhof, der es als einer der ersten weltweit gelungen ist, Geschmacksrezeptoren in spezielle Zellkulturen zu schleusen und genau zu vermessen (siehe „Die Küche des Frühmenschen“, S. 55).

Jetzt wird es möglich, nach den Bitterstoffen zu fahnden, die dieser Rezeptor eigentlich identifiziert. TAS2R38 erkennt eine bestimmte chemische Gruppe, in der Fachsprache eine Thioamidgruppe (-N-C=S). Sie kommt in vielen Bitterstoffen (Isothiozyanaten), in Gemüsesorten wie etwa in Kohl, Broccoli und Raps vor. Damit werden auch erstmals Hypothesen möglich, warum sich unterschiedliche Empfindlichkeiten beim Bittergeschmack so lange genetisch erhalten haben. Beides, eine feine und eine grobe Zunge für Isothiozyanate, muss Vorteile gehabt haben. Andernfalls hätte sich eine genetische Variante in der Bevölkerung durchgesetzt. Für die Fähigkeit, Isothiozyanate zu schmecken, gilt, was generell für Bittergeschmack gilt: Menschen mit hoher Sensitivität waren vermutlich schon immer besser vor einem Verzehr von giftigen Pflanzen geschützt. Die mutierten TAS2R38-Rezeptoren bei



*Die Vorliebe für bittere, alkoholische Getränke hängt vermutlich mit dem genetischen Profil der Bitterrezeptoren zusammen. Wer Bitteres schwächer schmeckt, konsumiert mehr Bier und Whiskey.*

Nichtschmeckern können hingegen vielleicht andere, bislang unbekannte Bitterstoffe detektieren, spekuliert Stephen Wooding, Genetiker an der University of Utah in Salt Lake City (USA). Dr. Bernd Bufo vom DIfE sieht eine weitere Möglichkeit. In Gegenden mit Jodarmut erhöht ein Verzehr von zu viel Isothiozyanaten das Risiko für Schilddrüsenkrankheiten und Kropf. PTC-Schmecker sind dann im Vorteil. „Andererseits“, so Bufo, „haben Kohlsorten auch viele anti-kanzerogene Stoffe.“ In Gebieten mit genügend Jod könnte es von Vorteil gewesen sein, viel davon zu essen. Das sind erste Versuche, um die genetisch unterschiedliche Prägung unseres Bittergeschmacks zu deuten.

Womöglich hat selbst die Vorliebe für Alkohol mit dem genetischen Profil von Bitterrezeptoren zu tun. 2004 fand eine Gruppe um Valerie B. Duffy von der University of Connecticut in Storrs (USA), dass PTC-Nichtschmeckern auch Ethanol weniger bitter schmeckt und ihr Konsum von Whiskey und Bier entsprechend höher ist. Auch bei den Rezeptoren für Süß und Umami sind bereits erste genetische Unterschiede beschrieben worden. Bislang waren solche Ernährungsstudien allerdings widersprüchlich. Die Kenntnis der Rezeptoren erlaubt es jetzt, Geschmacksvorlieben beim Menschen systematisch zu untersuchen (siehe „Manche mögen einfach keinen Spinat“, S. 56).

Bei Mäusen bauen Forscher den Geschmackssinn sogar schon gezielt um. In den Labors von Charles S. Zuker und Nicholas J. Ryba gibt es Tiere, für die Bitteres süß schmeckt. Die Forscher koppelten einen Rezeptor für bestimmte Bitterstoffe an Kontrollelemente. Sie sorgen dafür, dass der Rezeptor bei gentechnisch veränderten Tieren in Sinneszellen

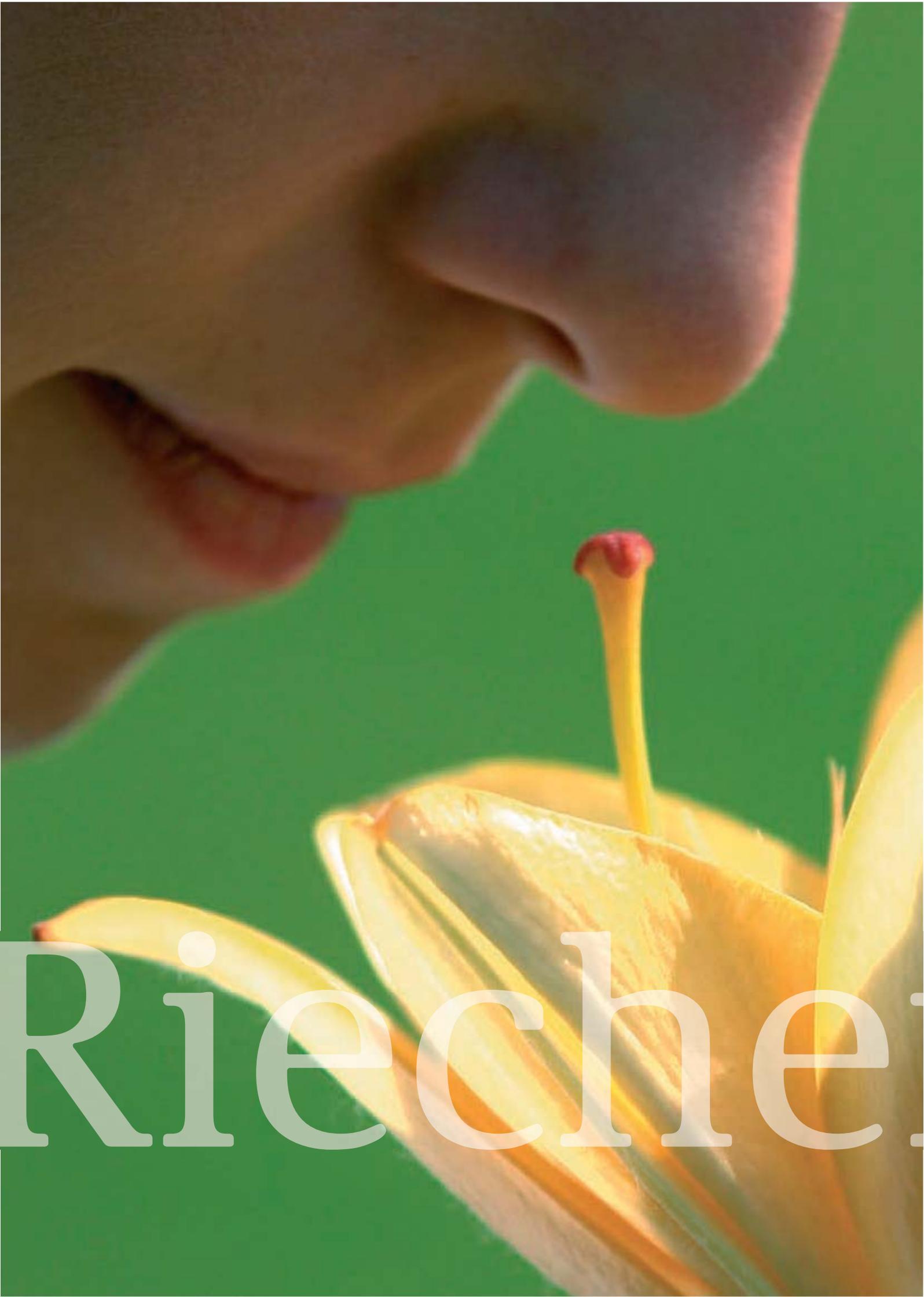
gebildet wird, die sonst den Eindruck Süß vermitteln. Prompt fanden die Mäuse Bitterstoffe ausgesprochen wohlschmeckend. Das Experiment zeigt, dass Aversion und Attraktion auf der Zunge von den Sinneszellen und nicht den Rezeptoren vermittelt wird. Sinneszellen, die Süßreize vermitteln, stehen generell für angenehme Geschmacksempfindungen, Sinneszellen für Bitter stehen für Ablehnung.

Ähnliche Versuche zeigen auch, dass Sinneszellen für Bitter eine Vielzahl unterschiedlicher Bitterrezeptoren produzieren – erneut ein Gegensatz zur Ordnung auf dem Riechepithel, wo jede Sinneszelle nur einen Rezeptortyp aufweist. Es wäre eine Erklärung dafür, warum unserem Gaumen eine Differenzierung in verschiedene Bitterformen kaum gelingt. Süß, Bitter, Umami, vermutlich auch Salzig und Sauer – dem Geschmackssinn reicht es meist, wenn er nur die Qualität entdeckt. Eine feinere Differenzierung scheint seine Sache nicht.

#### Forscher suchen nach einem Fetblocker

Fest steht, dass der moderne Mensch nicht mehr den Selektionszwängen wie noch unsere Vorfahren vor wenigen tausend Jahren unterliegt. Wir haben eher andere Sorgen, unsere Ernährung ist zu süß, zu vitaminarm und zu fett. Maximal 30 Prozent der Kalorien sollten aus Fett bestehen, de facto sind es in den Industriestaaten aber 40 Prozent. Doch seit Ende 2005 hoffen einige Mediziner auf neue Fetblocker. Die Kunde von wohlschmeckendem Fett im Mund wird uns vor allem vom Trigeminusnerv vermittelt. Er signalisiert uns, wenn gerade ein Stückchen Butter angenehm auf der Zunge zerschmilzt, mit Schinken und Baguette im Mund.

Ende 2005 berichteten Forscher um Fabienne Laugerette von der Université de Bourgogne in Dijon von einem möglichen weiteren Fettsensor. Das Molekül CD36, auf Zellen in Mund, Muskel- und Fettgewebe lokalisiert, ist schon länger bekannt; es ermöglicht Fettsäuren die Passage durch die Zellmembranen. Die Forscher konnten jetzt zeigen, dass Mäuse ohne CD36 ihre Vorliebe für Fettsäuren im Futter weitgehend einbüßten. Das ist kein definitiver Beweis für einen Fettsensor im Mund, schließlich fehlte das Molekül den Tieren überall im Körper. Sollten aber weitere Arbeiten den Verdacht erhärten, dass CD36 es ermöglicht, Fett im Mund zu schmecken, hätten Pharmakologen einen Ansatz für eine Blockade und damit eine neue Antifettpille. „Ich rechne damit, dass in den nächsten Jahren weitere Rezeptoren identifiziert werden, vermutlich auch für Fett“, sagt Wolfgang Meyerhof.



Rieche

## Tausende Düfte lebenslang speichern

Die menschliche Nase ist ein tausendfacher Geruchsfänger – und ein äußerst subjektiver, emotionaler, Erinnerungsfähiger dazu. Was der eine gern riechen und leiden mag, wirkt auf den anderen eher widerlich. Selbst bei feinen Essenzen wie Parfüm scheiden sich die Geister. Eine besonders gute Nase und viel Training brauchen Parfümeure, um die winzigen Duftmoleküle und einzelne Nuancen etwa von Jasmin zu erkennen. Menschen, die ihren Geruchssinn verloren haben, können verschiedene medikamentöse und operative Behandlungsmöglichkeiten helfen. Von etablierten Diagnoseverfahren und einem neuen Trainingsprogramm profitieren Patienten mit Riechstörungen. Doch auch Kinder und Erwachsene sollten ihre Nasen schulen und sie einfach mal wieder in den Wind halten.



m

# Orangenblüten kurz nach dem Regen

**Düfte in der Warenwelt, das heißt längst mehr als nur Parfüm. Große Markenhersteller suchen heute generell nach unverwechselbaren Düften für ihre Produkte.**

4711 ist Eau de Cologne ist Kölnisch Wasser und ist weltweit ein Begriff. Doch die Assoziation ist historisch falsch. Die Geschichte dieses Parfüms war immer auch eine um Rechte an Markennamen. Das Original wird noch heute in Köln von der Firma Farina Gegenüber produziert und heißt Farina Eau

de Cologne. „Wir sind ein Luxusartikel“, macht Tina Farina, Leiterin eines Duftmuseums in Köln, klar. Johann Maria Farina (1685 – 1766) kreierte um 1709 in Köln den neuen Duft. Aus Italien hatte er die Technik importiert, fast reinen Alkohol zu destillieren. Das war die Voraussetzung, um auch feinere Essenzen zu nützen – etwa von Zitrusfrüchten, die keine Fuselöle im Alkohol vertragen. Bis dahin dominierten in Europa die schweren Düfte wie



Johann Maria Farina

Moschus oder Ambra. Und bis weit in das 19. Jahrhundert diente Parfüm vor allem zum Übertünchen von Gestank. Johann Maria Farina wollte etwas anderes: „Ich habe einen Duft gefunden, der mich an einen italienischen Frühlingmorgen erinnert, an Bergnarzissen, Orangenblüten kurz nach dem Regen. Er erfrischt mich, stärkt meine Sinne und Phantasie.“ So hat er es aufgeschrieben. Orangen, Pampelmusen und Bergamotte gelten als Ingredienzien, das Rezept blieb geheim.

Ein anderer Kölner, Wilhelm Mühlens, produzierte 1803 ebenfalls ein Duftwasser unter dem Namen Farina. Er musste ihn aber nach Rechtsstreitigkeiten abgeben und wählte im Jahr 1875 die Nummer seines Hauses 4711 in der Kölner Glockengasse als Warenzeichen.

Düfte sind längst ein Markt für Millionen. 60 bis 80 Neuheiten präsentiert die Branche allein hierzulande jedes Jahr. Der deutsche Konsument gab 2004 nach Angaben der Fragrance Foundation allein für Parfüms der Luxus- und Prestigeklasse 790 Millionen Euro aus, der Gesamtumsatz der Parfümerien war drei Mal so groß. Hinzu kommt der „Konsummarkt“ in Drogerien und Kaufhäusern. Tausende Düfte hat ein Parfümeur heute für neue Kreationen zur Auswahl,



viele davon sind synthetisch. Die Berufsbezeichnung ist ungeschützt, erfordert nicht nur eine angeborene gute Nase, sondern auch mächtig Training. „Parfümeure fallen schon als Kind auf, nerven Ihre Familie durch permanente Klagen über Gerüche“, weiß Tina Farina, die auch eigene Düfte kreierte: „Sie üben täglich, vor dem Frühstück, Düfte zu identifizieren – das macht nicht immer Spaß.“ Es geht um Feinheiten: etwa die Unterschiede in 30 verschiedenen Jasminproben aus verschiedenen Jahrgängen und einzelnen Anbaufeldern. Ein guter Parfümeur kennt tausende Düfte: Blüten, Gewürze, Früchte, Harze, Gräser, Flechten und „Gourmand“-Noten wie Schokolade und Mandel.

Vielleicht 30 bis 80 verschiedene Duftstoffe machen am Ende ein Parfüm aus. „Sie müssen zunächst allein im Kopf eine Vorstellung des Dufts entwickeln“, erklärt Farina. Erst dann schreibt der Parfümeur Rezepte, die früher Mitarbeiter umgesetzt haben, heute erledigt das oft der Computer. In der Fachsprache arbeitet man sich langsam von einem ersten Akkord vor zu den passenden Kopf-, Herz- und Basisnoten. Der eigene Körpergeruch behindert die Arbeit, denn der Duft muss objektiv stimmen. Ein Parfümeur hält den Körpergeruch beim Erschnuppern fern, indem er den Kopf eigens in eine Betonschablone legt. Erst wenn die Kreation steht, wird sie an Probanden getestet; denn die Haut eines jeden Individuums gibt dem Parfüm eine eigene Note. Kunden, rät Farina, sollten Düfte auf einem Streifen Papier testen und diesen erst dann, wenn er zusagt, auf die Haut legen, später erneut an ihm riechen, um zu erfassen, ob auch die Kombination aus Eigengeruch und Duft passt. Und prinzipiell gelte: Guter Duft ist teuer.



97 Prozent aller neuen Kreationen sind binnen zwei Jahren wieder vom Markt verschwunden, viele sind auch nur Abwandlungen eines bewährten Dufts. Manche Düfte sind hingegen zu festen Begriffen avanciert wie Chanel No. 5 – der Legende nach war es der fünfte von sechs Flakons, die der Parfümeur Ernest Beaux der Modedesignerin Gabrielle Bonheur Coco Chanel zur Auswahl unterbreitete. Oder das ob seiner lasziven Werbekampagne 2000 skandalumwitterte Opium von Yves Saint Laurent. Längst sind Mode und Duft eine feste Symbiose eingegangen. Chanel und Yves Saint Laurent, Lagerfeld, Dior oder Boss stehen für Textilien – und für Düfte. Schon sehen manche Konsumforscher in Düften die Kaufhausmusik des 21. Jahrhunderts. „Firmen diskutieren weltweit, wie sie Marken mit Düften ausstatten, die positive Emotionen wecken“, weiß Dr. Patrick Hehn vom Göttinger Institut für Sensorikforschung und Innovationsberatung.

Hie und da wird der Kunde bereits subtil an der Nase herumgeführt. Die inflationäre Zunahme von Aufbackstuben in Supermärkten und Einkaufszentren soll durch frischen Backduft den Umsatz steigern. Untersuchungen von Hehn zeigen, dass Kunden Sportfachgeschäften mehr Kompetenz zuschreiben, wenn dort eine Brise Meeresduft weht. Dabei gelingt die positive Assoziation längst nicht immer eindeutig. „Warentragende Verkaufsförderungsdisplays“ nennen Marketingstrategen die Beistellstände im Supermarkt, in denen Extraofferten liegen. Ein Versuch, Kunden mittels Schokoladenduft zusätzlich zum Kauf von Schokolade an solchen Displays zu animieren, schlug fehl, berichtet Hehn. Vermutlich wurden Kunden skeptisch, da verpackte Schokolade normalerweise nicht riecht. „Wir planen einen zweiten



Wie das Farina-Haus in Köln vor über 200 Jahren aussah, zeigt der Stich aus dem 18. Jahrhundert. Im Essenzraum des Duftmuseums bekommen Besucher einen Eindruck von der Vielfalt der Düfte.

Versuch mit geöffneter Schokolade auf einem Probierteller, das löst die paradoxe Situation vielleicht auf“, erklärt Hehn. Vollends eine Gratwanderung bleibt die Kreation komplett neuer Düfte für eigentlich nicht riechende Produkte. Ein angenehmer Duft alleine reicht auf keinen Fall. Lilienduft, aufgebracht auf Packungen mit Blumendünger, wurde von Probanden eher positiv bewertet, da er wohl zum Umfeld Garten passt. Auf Sprudelflaschen hingegen schlug er fehl. Hehn: „Ein Duft muss inhaltlich unbedingt zum Produkt passen.“

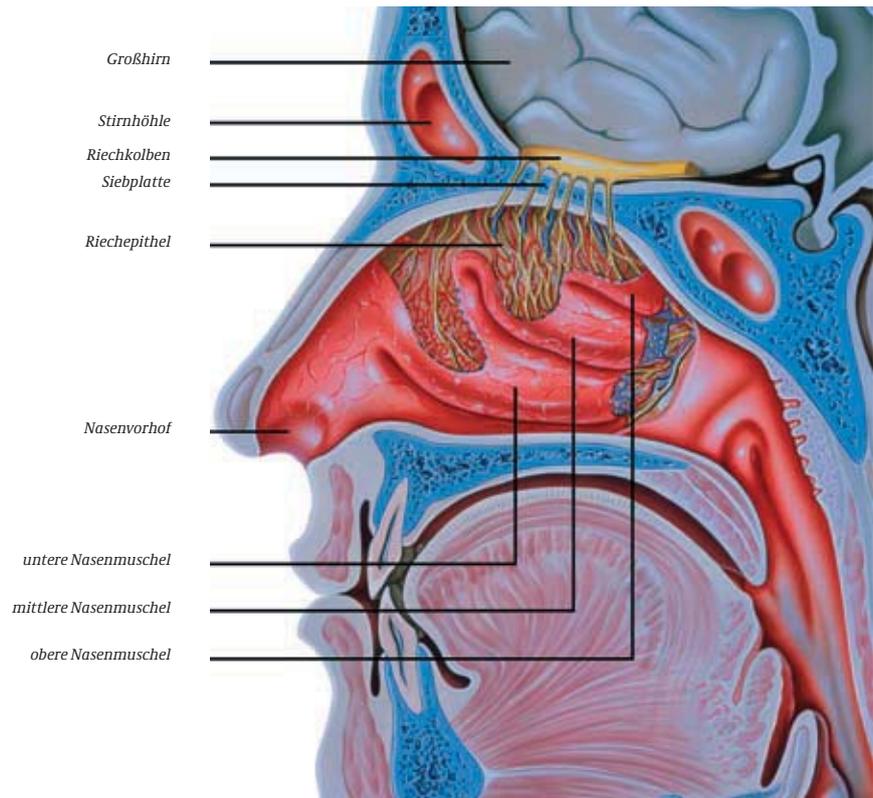
Duftmuseum der Firma Farina gegenüber, der – nach eigenen Angaben – ältesten existierenden Parfümfabrik der Welt. Kontakt unter: [www.farinagegenueber.de](http://www.farinagegenueber.de)

4711  
[www.4711.com](http://www.4711.com)

## Wie funktioniert die Nase?

Wie Schmecken ist Riechen eine Sache der Chemie. Es sind winzige Duftmoleküle, die wir erkennen, sobald sie an spezielle Zellen in der Nase andocken. Die Nasenhöhle besteht aus drei Nasenmuscheln (Conchen). Auf der oberen liegt das etwa fünf Quadratzentimeter große Riechepithel, in dem sich jene zehn bis 100 Millionen Riechsinneszellen befinden, die Düfte registrieren können. Dies sind einzigartige Sinneszellen in unserem Körper; denn es sind Nervenzellen, die sich etwa alle 60 Tage komplett erneuern. Jedes Mal neu schicken sie dann Nervenfortsätze, lange Axone, durch Öffnungen des darüber liegenden Knochens, der Siebplatte, bis in einen Vorposten des Gehirns, den Bulbus olfactorius oder Riechkolben. Dort geben sie ihre Signale weiter an die Mitralzellen. Die Kontaktpunkte bilden kleine Kügelchen, die Glomeruli. Die Zellknäuel ähneln einer Relaisstation, die die Riechinformationen an das Gehirn weitergibt. Jede Sinneszelle trägt einen bestimmten Rezeptor für Duftstoffe an der Oberfläche winziger Wimpern, den so genannten Zilien.

Duftmoleküle müssen an die Rezeptoren so anbinden können, wie ein Schlüssel in ein Schloss passt. Docken genügend Duftmoleküle an, leitet die Sinneszelle ein Signal in Richtung Gehirn. Dabei landet in jedem Glomerulus immer die Information aller Riechzellen mit ein- und demselben Rezeptor. Das ist die Grundlage für Duftkarten im Gehirn, die Forscher in den vergangenen 15 Jahren aufgeklärt haben (siehe „Die Karten der Düfte“, S. 70 ff.). Menschen gehören zu den Mikrosmaten – also zu den Säugetieren, bei denen der Geruchssinn zurückgebildet ist. Immerhin aber können auch unsere Nasen sogar ein zehnmilliardstel Gramm stinkigen Ethylmercaptans in einem Liter Luft wahrnehmen, das Flüssiggas als Warnung vor Lecks zugemischt wird. Viele Säugetiere haben zur Wahrnehmung von Pheromonen ein zweites Riechorgan, das Vomeronasalorgan. Pheromone sind



Substanzen, die unbewusst die Sexualität oder das Territorialverhalten steuern. Auch bei etwa 60 Prozent der Menschen findet es sich noch, als ein Zentimeter lange Einstülpung neben der Nasenscheidewand. Dass dieses Organ aber auch noch funktioniert, wurde bis heute nicht nachgewiesen.

Riechen gilt als der emotionalste aller Sinne. Und tatsächlich werden Gerüche im Kopf besonders schnell mit Emotionen aufgeladen. Vom Riechkolben zieht ein dickes Nervenbündel, der Riechstrang, zunächst in ältere Teile unseres Großhirns (Riechcortex). Von hier nimmt die Information zwei Wege. Einer geht zur Großhirnrinde, die mit dafür sorgt, dass wir Düfte wahrnehmen, manchen auch Namen zuordnen können. Eine zweite Leitung führt, ähnlich wie beim Geschmackssinn, direkt in verschiedene Hirnareale (limbisches System, Mandelkerne, Hypothalamus). Dort werden Sinneseindrücke massiv mit Emotionen verbunden. Der Satz „Ich kann Dich nicht riechen“ ist also tatsächlich eine sehr emotionale, aber auch ehrliche Auskunft.

# Anosmie oder „Mir fehlt eine Welt“

**Susanne Alertz verlor ihren Geruchssinn durch einen Unfall von heute auf morgen. Die 44-jährige Lehrerin aus Bad Neuenahr erzählt, was es bedeutet, nicht mehr richtig riechen zu können. Rosen duften nicht mehr und Essen schmeckt immer gleich.**

Es war ein plötzlicher Abschied. Waldarbeiter im Aachener Wald passten nicht auf, und so stürzte der Spaziergängerin ein zum Glück noch junger Ahornbaum auf den Kopf. „Als ich im Krankenwagen wieder aufwachte, war ich noch froh, dass das Erbrochene nicht roch“, erinnert sich Susanne Alertz. Das war im April 2005. Erst nach einer Woche im Aachener Uniklinikum wurde ihr klar, dass ihr etwas fehlte: „Ich habe mich gewundert, warum die Rosen der Zimmernachbarin nicht dufteten.“ Dann merkte sie, dass auch der Fencheltee nach nichts mehr schmeckte. „Und beim Deospray der Nachbarin habe ich noch gedacht – Mensch, das ist aber angenehm, dass es nicht riecht. Ich mag nur geruchlose Deos.“

„Posttraumatische Anosmie“ erklärten die Ärzte ihr später (siehe „Riechstifte helfen Krankheiten erkennen“, S. 74). Die Diagnose bedeutet, dass Susanne Alertz Riechsinn fast völlig erloschen ist. „Mir fehlt eine Welt, ein Drittel meiner Sinneseindrücke ist weg. Ich habe vorher sehr gut riechen können“, bedauert die 44-Jährige. Der Garten, den sie eigens mit vielen duftenden Blumen angelegt hatte, bleibt jetzt nur noch für die Augen ein Erlebnis: „Von den vielen geliebten Düften nehme ich nichts mehr wahr.“ Nach zwei Wochen kommt sie aus der Klinik, Schmecken muss sie neu üben. Unterscheiden kann sie noch, was ihr die Zunge verrät: Essig erkennt sie an der Säure, Salz ist noch salzig, ein Kuchen noch süß. Doch schon unbekannte Kekse „sind eigentlich nur krümelig“. Fleisch, Blumenkohl, Spaghetti, Apfelkompott – es riecht alles gleich. „Ich sehe, was ich esse und habe zumindest eine Vorstellung davon, wie es schmecken sollte.“ Die geliebten Tees in allen Varietäten schmecken wie warmes Wasser, von Aroma kann keine Rede mehr sein.

Wochen später stellt sich ein übler Geruch ein, der sie Tag und Nacht begleitet. „Das hörte zum Glück nach einiger Zeit wieder auf“, erinnert sich die Pädagogin. Gelegentlich kommt es aber heute noch vor, dass sie sehr lange braucht, um von intensiven Gerüchen etwas wahrzunehmen. „Ich bin Stunden

nach der letzten Mitarbeit auf dem Weihnachtsbasar unserer Schule durch meine Wohnung gelaufen und hab' gedacht: Mensch, da ist irgendetwas in meiner Nase.“ Glücklicherweise hat sie Humor: „Zumindest rieche ich nichts von der Gülle, wegen der mein Bruder letztes auf einem Spaziergang ziemlichen Stress hatte“, lacht sie. Allerdings bleibt die Angst davor, schutzlos giftigen Gasen ausgeliefert zu sein. Lästig ist der Verlust des Riechsinn mitunter im Beruf. Die Studienrätin (Deutsch und Religion) in einem Ahrweiler Gymnasium muss sich von Kollegen oder Schülern informieren lassen, wenn da wieder einer geraucht hat.

Ein Riechtest in der Klinik förderte unlängst zutage, dass Susanne Alertz hohe Konzentrationen mancher Düfte registrieren kann – auch wenn sie nicht weiß, welcher Duft es ist. Ab und an gibt es auch im Alltag Spuren von Erinnerungen. Zwar kann sie keine Weine mehr erkennen. Wirklich guten Rotwein differenziert sie aber heute noch daran, dass er „gut“ schmeckt, „irgendwie fruchtig“. Täglich macht sie jetzt ein Riechtraining, schnuppert an Himbeeren, versucht etwas von Äpfeln wahrzunehmen. Vielleicht, meint Susanne Alertz, kehrt doch noch etwas zurück.

*Wenn der Geruchssinn verloren ist, bieten selbst stark duftende Blumen den Betroffenen nur noch einen optischen Genuss.*



## Aus der Forschung: Die Karten der Düfte

**Riechen umfasst nicht nur das Wahrnehmen von Düften, es steuert auch Verhalten und lenkt Emotionen. Forscher haben die Grundlagen dafür enträtselt. Riechen heißt, Duftkarten im Gehirn aktivieren.**



*Bei der Entwicklung von Lebensmitteln werden erst verschiedene Geschmackskomponenten im Gas-Chromatographen analysiert. Anschließend beurteilt die geschulte Nase eines Spezialisten, wie die Komposition riecht.*

Der Duft einer Rose, der Geruch feuchter Erde nach einem Regenguss, dampfende Spaghetti Bolognese auf dem Teller oder die Benzinschwaden in einer Tiefgarage: 10.000 Düfte soll der Mensch unterscheiden können. „Eigentlich eine reine Hausnummer. Wir wissen nur, dass es eine sehr hohe Zahl sein muss“, meint Professor Heinz Breer, Riechforscher am Institut für Physiologie an der Universität Hohenheim.

Die vergangenen zwei Jahrzehnte haben enorme Fortschritte bei der Erklärung dieses Sinns gebracht. „Wir kennen jetzt die Grundlagen dieses Systems, vielleicht gelingt es uns damit auch, neue Therapien für Patienten mit Riechstörungen zu entwickeln“, hofft Breer (siehe „Anosmie oder Mir fehlt eine Welt“, S. 69 sowie „Riechstifte helfen Krankheiten erkennen“, S. 74). Fest steht auch, dass der Körper nicht nur mit der Nase riecht. Rezeptoren für Düfte gibt es selbst auf Spermien, in Zellen von Lunge, Prostata, Haut und im Gehirn. Ob der Mensch allerdings, wie viele andere Tiere, auch wirklich unbewusst über Sexuallockstoffe (Pheromone) etwa bei der Partnerwahl gesteuert wird, ist immer noch ein ungelöstes Rätsel.

Der Riechsinn ist ein Kartenspieler, er hat mehrere Tricks auf Lager. Trick Nummer eins heißt Vielfalt. Sie beginnt mit speziellen Rezeptoren auf der Oberfläche der Riechsinneszellen in der Nase. Einen Paukenschlag in der Riechforschung brachte das Jahr 1991, als es Linda B. Buck und Richard Axel von der Columbia University in New York (USA) endlich gelang, einzelne, lange gesuchte Rezeptorgene für das Riechen bei Säugetieren zu identifizieren. Es waren 18 Gene. 2004 bekam das Forscherduo für seine Arbeiten zur Riechforschung den Nobelpreis für Medizin.

### **Jeder Duft aktiviert ein einzigartiges Muster**

Aus den 18 Rezeptorgenen wurden unterdessen viel mehr: Ratte und Maus haben rund 1.200 Gene für Riechrezeptoren, von denen knapp 1.000 aktiv sind. Beim Mensch funktionieren etwa 350. Auch bei uns stellen Gene für Riechrezeptoren mit über einem Prozent Anteil an unserem Genom die größte Genfamilie – noch vor der Gruppe der gleichfalls extrem variablen Antikörper des Immunsystems. Denn wie das Immunsystem braucht die Nase eine möglichst große Zahl unterschiedlicher Strukturen, damit sie die enorme chemische Vielfalt der Duftstoffe erfassen kann. Jede Riechzelle bildet dabei nur einen einzigen Rezeptortyp.

Trick Nummer zwei heißt Kombinieren. Duftstoffe aktivieren meist mehrere Rezeptoren in der Nase, einige stärker, andere schwächer – je nachdem, wie gut sie jeweils in die Rezeptoren passen. Für jeden Duft wird so schon in der Nase ein einzigartiges Muster an Rezeptoren aktiviert. „Dass der Geruchssinn auch noch auf Kombinatorik setzt, war für uns eine besonders verblüffende Erkenntnis“, erklärt Heinz Breer. Theoretisch sind damit 350 hoch 350 Düfte codierbar. „Eigentlich unendlich viele“, urteilt Professor Hanns Hatt, Zellphysiologe an der Ruhr-Universität Bochum.

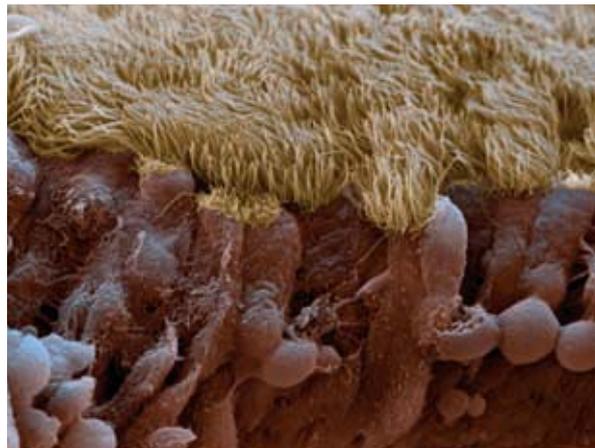
Sortiert werden die Aktivierungsmuster erst im Gehirn. Während Zellen mit jeweils gleichen Rezeptortypen auf dem Riechepithel gleichmäßig verteilt sind, treffen sich deren Axone alle auf der nächsten Neuronenebene in ein- und demselben Zellknäuel (Glomerulus), das die Signale „vorsortiert“ (siehe „Wie funktioniert die Nase?“, S. 68). Die so etablierte Ordnung stellt sicher, dass im Gehirn spezifische Aktivitätsmuster entstehen können. Denn jeden Duft, so haben es Arbeiten von weltweit einem halben Dutzend Forschergruppen gezeigt, registriert das Gehirn anhand der kurzfristigen Aktivität einer einzigartigen Duftkarte – einem

Verbund von Nervenzellen, die nur dann gemeinsam aktiv werden, wenn ihr zugehöriger Riechstoff gerade an der Nase vorbeikommt. Und noch verblüffender ist: Diese Karten sind bei jedem Menschen von Geburt an prinzipiell gleich angelegt. „Der Duft von Orangen, von einem Spülmittel oder von Benzin aktiviert bei Ihnen und mir prinzipiell immer genau die gleichen Glomeruli“, erläutert Hanns Hatt. Allerdings hat jeder Mensch feine genetische Unterschiede in den Riechrezeptoren, so dass sich individuell kleine Abweichungen im Aktivierungsmuster ergeben. Dennoch steckt hier eine Grundlage dafür, dass wir uns über Gerüche verständigen können und beispielsweise unter Orangenduft alle etwas Ähnliches verstehen.

Anfang 2006 gelang Zhihua Zou und Linda B. Buck der Aufschluss über ein weiteres Phänomen bei der Duftwahrnehmung. Oft führt die Kombination zweier Gerüche zu einem ganz neuen Duft. Eine Mischung von Gewürznelke und Rose nehmen wir als Geruch von Nelkenblumen wahr. Bei Versuchen an Mäusen demonstrierten die beiden Forscher, dass eine „Duftmischung“ im Cortex tatsächlich Neurone zusätzlich aktiviert, die von den Ursprungskomponenten allein nicht aktiviert werden. Eins und eins ist somit nicht zwei, sondern etwas Neues, vielleicht eine Drei, vielleicht aber auch eine Fünfzehn. Jeder Duft aktiviert seine ganz eigene Karte im Gehirn.

### Riechen sollte ein Unterrichtsfach werden

Die Arbeit für das Gehirn beginnt damit allerdings erst, meint Hatt: „Sie müssen lernen, die Karten auch zu nützen, einen Duft zu identifizieren, ihn mit einer Quelle zu assoziieren, vielleicht gar einer Szene aus Ihrem Leben, die dazu gehört.“ Training und nochmals Training macht erst den guten Parfumeur (siehe „Orangenblüten kurz nach dem Regen“, S. 66) oder den Weinkenner. „Riechen sollte Unterrichtsfach wie Fremdsprachen, Musik oder Sport werden“, findet Hatt. Fatal für das eigene Ernährungsbewusstsein sei auch, dass viele Konsumenten gar nicht mehr riechen könnten, worin sich Lebensmittel qualitativ unterscheiden. Angelernt ist oft auch, welche Düfte wir als appetitlich und welche als abstoßend einstufen. „Kinder haben noch keine Abneigung gegen ihre Ausscheidungen“, nennt der Bochumer Wissenschaftler ein Beispiel. Erst wenn Eltern wiederholt klar gemacht haben, dass die „bäh“ sind, lernen die Kleinen, die Finger davon zu lassen.



*Die Mechanismen der Duftwahrnehmung erforscht der Bochumer Zellphysiologe Professor Hanns Hatt. Er entdeckte den Riechrezeptor für Maiglöckchenduft und stellte fest, dass die Rezeptoren mit neutralisierenden Gegengerüchen gehemmt werden können. Dann riechen Maiglöckchen nicht mehr nach Maiglöckchen.*

*Sowohl die Nasenschleimhaut als auch die Nasennebenhöhlen sind mit Flimmerepithel ausgekleidet. Die gelben Flimmerhaare (Zilien) transportieren den mit Schmutz beladenen Schleim zum Nasenausgang.*

Arbeit bleibt den Riechforschern genug. Rätselhaft ist immer noch, wie einzelne Sinneszellen immer nur einen der 350 Rezeptortypen bilden. Ein Mechanismus wie bei Antikörpern, deren Gene in Immunzellen quasi durch Wegschneiden von Zwischenabschnitten individuell maßgeschneidert entstehen, scheidet aus. Riechzellen fehlt kein genetisches Material. Aus einer einzigen Riechzelle kann durch Klonen eine komplette Maus mit gut funktionierendem Riechsinn entstehen, wie zwei US-Teams 2004 zeigten. Faszinierend, aber noch immer ungeklärt ist, wie die sich ständig erneuernden Riechsinneszellen (siehe „Wie funktioniert die Nase?“, S. 68) immer wieder genau die richtige Verschaltung ausschließlich mit den zugehörigen Glomeruli ausbilden. Offenbar fungieren auch hier die Rezeptoren als Pfadfinder. 2004 zeigte eine Gruppe um Heinz Breer, dass Riechzellen auch an ihren Nervenendigungen, den Axonen, die Rezeptoren tragen. „Sie könnten als Erkennungsmerkmale für die anderen Nervenzellen im Glomerulus dienen, mit denen korrekt verschaltet werden muss“, spekuliert Breer. Denkbar sei auch, dass sich im Gehirn die Axone aller Riechzellen am jeweils gleichen Rezeptor „erkennen“ und dann gemeinsam ihren Weg fortsetzen.



*Die Nase in den Wind halten und frische Meeresbrise schnuppern, bedeutet für viele Erholungssuchende ein Vergnügen. Um die Brise wahrnehmen zu können, müssen genügend Duftmoleküle an die Riechsinneszellen in der Nase andocken.*

### Erste Riechrezeptoren beim Menschen charakterisiert

Noch ist es auch nicht gelungen, eine stimmige Ordnung in die Gerüche zu bringen. Auf den britischen Physiologen John Earnest Amoore geht eine Einteilung in sechs Primärdüfte zurück. 1952 schlug er diese Kategorien vor: Blumig, Ätherisch, Moschusartig, Campherartig, Faulig und Stechend. Heute wird das Schema meist noch um schweißig ergänzt. Doch schon der würzig fettige Geruch von Butter passt nicht in das Schema: „Das mit den Primärgerüchen ist eine schöne Idee, an der man schon seit mindestens 100 Jahren tüftelt“, meint Professor Thomas Hummel, Riechforscher an der HNO-Klinik der TU Dresden. „Für eine richtige Systematik müssten wir aus der Molekülstruktur eines Stoffs auf seine Dufteigenschaften schließen können.“ Genau dies ist jetzt in ersten Ansätzen möglich geworden. Zumindest zwei menschliche Riechrezeptoren sind bereits näher charakterisiert. Beim ersten ermittelte die Bochumer Arbeitsgruppe um Hanns Hatt in einem Cocktail von 100 häufig in der Parfümerie verwendeten Duftstoffen die größte Bindungsaffinität für die Substanz Helional, die nach frischer Meeresbrise riecht. Bei einem zweiten Rezeptor mit dem Laborkürzel hOR17-4 fand sich für Bourgeonal die stärkste Bindungskraft – ein synthetisches Imitat für Maiglöckchenduft. „Welche natürlichen Stoffe wirklich optimal von diesen Rezeptoren registriert werden, wissen wir damit natürlich noch nicht“, betont Hatt. Dafür müsste man Tausende von Stoffen testen; Projekte dazu hätten vermutlich bei einigen Duftstoffherstellern bereits begonnen. Schon in einigen Jahren, schätzt der Physiologe, könnte eine neue Ära für die Parfümindustrie – das gezielte Design von neuen Düften anhand ihrer Molekülstrukturen – beginnen.

Selbst neue Verhütungsmittel könnte die Riechforschung einmal liefern. Riechen hat sich in der Evolution aus einem einfachen Schnüffeldienst entwickelt, den schon Bakterien haben. Entwickelt hat sich dabei die Fähigkeit, mittels spezieller Rezeptoren eine Geruchsquelle zu orten, vielleicht eine

Futterquelle, um sich ihr dann annähern zu können. Auch in unserem Körper sind Relikte dieser archaischen Komponente erhalten geblieben. Schon 1992 fand eine Gruppe um den Belgier Marc Parmentier erste Hinweise für Riechrezeptoren in Spermien. Hatts Gruppe identifizierte kürzlich hOR17-4, den Empfänger des synthetischen Maiglöckchendufts, als einen davon. „In der Flüssigkeit um die Eizelle stecken Stoffe, die Spermien über diesen Rezeptor anlocken“, erklärt Hatt. Noch steht die Idee, Spermien mittels Rezeptorblockade quasi die Nase zu verkleben und so ein neues Verhütungsmittel zu entwickeln, erst auf dem Konzeptblock. Kandidaten dafür gibt es; die Substanz Undecanal besetzt als Antagonist den Rezeptor, ohne einen Reiz auszulösen.

Besonders umstritten ist derzeit, ob Pheromone auch beim Menschen wirken könnten. Im Tierreich sind zahlreiche Substanzen bekannt, mit denen Artgenossen sexuelle Lockstoffe, Signale über den Gruppenstatus oder auch über Stress austauschen, die beim Empfänger quasi automatisch ein bestimmtes Verhalten auslösen. Eberfleisch ist kulinarisch eher unpopulär wegen seines strengen Geschmacks oder Geruchs. Der Übeltäter ist Androstenon, ein Abbauprodukt des männlichen Sexualhormons Testosteron. In höheren Konzentrationen stinkt es je nach chemischer Variante für viele Menschennasen urin- oder moschusartig. Eber locken damit allerdings Schweinedamen an, versetzen sie gar vorübergehend in die „Begattungsstarre“.

Viele Studien an Probanden deuten auch beim Menschen auf, allerdings subtilere, Pheromonwirkungen. Zum Beispiel entwickelten Frauen, die noch keine Kinder haben, ungewöhnlich heftige erotische Fantasien auf Duftstoffe stillender Mütter. Die US-Forscherinnen um Julie Mennella vom Monell Chemical Senses Center in Philadelphia ließen die Probandinnen dafür an Textiläppchen riechen, die stillende Mütter zuvor unter den Achseln oder im BH getragen hatten.

### Väter kommen bei Schnüffeltest nicht gut weg

In Familien läuft offenbar ein ganzer Feldzug an verborgenen Geruchsvorlieben und -animositäten ab. Forscher um Glenn Weisfeld von der Wayne State University in Detroit (USA) ließen T-Shirts erst einige Nächte lang von Familienmitgliedern tragen. Anschließend baten sie die Teilnehmer zum Schnüffeltest an den anonymisierten Wäschestücken. Die Ergebnisse waren vielschichtig. Mütter mochten den Geruch ihrer heranwachsenden Kinder, Brüder mochten den ihrer Schwestern nicht. Besonders schlecht war die olfaktorische Situation der Väter. Ältere Söhne und Töchter äußerten ausgesprochene Aversionen gegen den Geruch seines T-Shirts. „Vielleicht steckt hinter diesen unwillkürlichen Abneigungen ein Trick der Natur gegen Inzest“, interpretiert Glenn Weisfeld die Beobachtungen.

Dennoch sind solche verborgenen Fernwirkungen beim Menschen nicht wissenschaftlich geklärt. „Bei all diesen Studien haben wir ein Problem, wir kennen die Pheromone nicht“, erklärt Hans Hatt. Und gerade noch 60 Prozent aller Menschen haben überhaupt ein vomeronasales Organ, das bei vielen anderen Säugetieren für die Wahrnehmung von Pheromonen dient. „Eine Nervenleitung von dort in das Gehirn gibt es vermutlich gar nicht“, meint Thomas Hummel. Allerdings könnten beim Menschen spezielle Rezeptoren im Riechepithel die Wahrnehmung der Pheromone übernommen haben. Bei Mäusen wurden bereits solche Rezeptoren identifiziert. Und auch beim Menschen ist ihre Existenz wahrscheinlich. Einige Forscher sind einem Mechanismus auf der Spur, der am Ende erklären könnte, warum bei uns Liebe nicht nur durch den Magen, sondern auch durch die Nase geht.

Stichlingsweibchen können den Immunstatus ihrer männlichen Artgenossen erriechen. Fisch, Maus und Mensch tragen auf ihren Körperzellen sogenannte MHC-Moleküle (aus dem englischen für *Major Histocompatibility Complex*), die dem Immunsystem auf der Zelloberfläche Bruchstücke aus anderen Eiweißen der Zelle oder von eingedrungenen Viren und Bakterien präsentieren. Es ist eine zentrale Signalstation für das Erkennen von „selbst“, „fremd“ und „infiziert“ auch in unserem Körper. Offenbar gibt es bei der Zahl der MHC-Typen, die ein Organismus bildet, ein Optimum. Sind es zu viele, wird die Situation für das Immunsystem zu unübersichtlich; sind es zu wenig, leidet die Immunabwehr. Stichlingsweibchen können im Wasser riechen, wie viele MHC-Typen Männchen tragen. Sie erschnuppern es an einem

## Wie Sie Ihren Riechsinn trainieren können



Eine feine Nase muss man üben. Der Grundkurs sieht etwa so aus: Wählen Sie ein Lebensmittel, das sie gerne mögen, und nehmen Sie sich zwei Mal täglich zwei Minuten Zeit, um konzentriert daran zu riechen. „Bei einer Orange etwa sollten Sie auch versuchen, sich das Bild der Orange bei geschlossenen Augen vorzustellen“, meint Dr. Michael Damm von der Universität Köln. Dann verspeisen Sie das Lebensmittel genüsslich und achten wieder darauf, all ihre Sinneseindrücke darauf zu konzentrieren. „Riechen Sie bei einer Orange doch auch einmal an der Schale, aus ihr werden viele Düfte für die Parfümindustrie gewonnen“, erklärt der Wissenschaftler. Die zunächst simple Übung kann nach einiger Zeit durchaus klar machen, wie viele Geruchs- und Geschmacksnuancen sich erfassen ließen, wenn wir uns mehr Zeit dafür nähmen.

Eher etwas für Fortgeschrittene ist die Konfrontation mit Produkten, die man nicht sonderlich mag – vielleicht, weil sie einfach nur unbekannt sind. Damm: „Versuchen Sie, auch in ungeliebter Leberwurst, jene Noten an Wacholder zu erschnüffeln, die Ihr Lebenspartner vielleicht gerade schätzt.“

Eine weitere Trainingsstufe ist das vergleichende Riechen. Gerüchten zufolge gilt etwa der Vergleich von Weinen als sehr beliebtes Objekt. Auch wenn das meist Gefahren für den Geldbeutel birgt, denn das Ergebnis ist fast immer der Abschied vom günstigen Roten aus den unteren Regalreihen im Supermarkt.



Stichlingsweibchen (*Gasterosteus aculeatus*) können im Wasser den Immunstatus ihrer männlichen Artgenossen riechen.

Duftcocktail von kleinen Eiweißen, die von MHC-Molekülen präsentiert und von den Männchen in das Wasser abgegeben werden. Denn Weibchen verharren lange vor einem Strömungskanal im Aquarium, den Forscher mit solchen Duftboten speisen. Eine Standard-Eiweißmischung lässt sie hingegen kalt. Erkennungssignale für das eigene Immunsystem dienen so gleichzeitig auch einer Erkennung zwischen den Individuen.

2004 konnten Forscher um Thomas Boehm vom Max-Planck-Institut für Immunbiologie Freiburg, Manfred Milinski vom Max-Planck-Institut in Plön und Heinz Breer in Hohenheim auch bei Mäusen Rezeptoren für solche MHC-Botenzstoffe in der Nase nachweisen. Mäuse geben solche Duftmarken mit dem Urin ab. „Solange wir weder Rezeptoren noch die zugehörigen Pheromone beim Menschen charakterisiert haben, bleibt solch ein Einfluss auf die Partnerwahl Spekulation“, meint Thomas Boehm.

Doch die Indizien mehren sich. Im Juli 2006 berichteten Stephen D. Liberles und Linda B. Buck wieder vom Fund einer Genfamilie für das Riechen. Mäuse haben im Riechepithel obendrein auch sogenannte TAARs (*trace-amine-associated receptors*), die Pheromone detektieren könnten. Drei Stoffe aus Mäuseurin konnten die Forscher bereits identifizieren, die an diesen Rezeptoren binden. Einen davon bilden die Tiere in größeren Mengen bei Stress, zwei weitere werden von geschlechtsreifen Mäusemännchen, nicht jedoch von Weibchen produziert und sind damit heiße Kandidaten für Sexuallockstoffe. Der Clou dabei ist allerdings, dass es die Genfamilie für TAARs auch bei Fischen und beim Menschen gibt. Womöglich sind TAARs entscheidende Pheromonrezeptoren auch in unseren Nasen. Der Riechsinn hält auf jeden Fall noch die Entdeckung neuer Rezeptoren und damit manche Überraschung parat.

## Riechstifte helfen Krankheiten erkennen

Einige Millionen Menschen leiden hierzulande an Riechstörungen. Doch wie viele es genau sind, darüber gibt es selbst von Fachleuten nur vage Schätzungen. 90 Prozent der Patienten sind Anosmiker, sie riechen gar nichts mehr. Sehr viel seltener wird bei Patienten, die wegen eines ganz oder teilweise eingeschränkten Riechvermögens einen Arzt aufsuchen, eine verringerte Riechempfindlichkeit diagnostiziert, die Hyposmie, oder dauerhafte Fehlwahrnehmungen, die Mediziner Parosmien nennen. Betroffene haben einen permanenten Brand- oder Faulgeruch in der Nase – vielleicht die Folge von Fehlverschaltungen nachwachsender Sinneszellen auf die Neurone im Gehirn.

Die Phantosmien hingegen bezeichnen Halluzinationen von Gerüchen, die es gar nicht gibt. Sie haben eher neurologische Ursachen. Betroffenen bleibt als Rettung oft noch eine weitere Reizleitung. Freie Enden des Trigemminusnervs in Mund, Nase und Gesicht erfassen nicht nur Tastreize, sondern vermitteln auch die Schärfe von Senf, Chili, Meerrettich und vielen anderen Gewürzen. Menschen können so nach dem Verlust des Riechsinn oft doch noch eine Ahnung von Düften im Essen wahrnehmen.

Die Ursachen von Riechstörungen sind nicht eindeutig bestimmten Manifestationen zuzuordnen. An oberster Stelle stehen chronische Entzündungen der Nase oder Nebenhöhlen. Schwieriger ist die Behandlung von postviralen Riechstörungen, die lange nach dem Abklingen von Infektionen bestehen bleiben. Das Wort idiopathisch meint, dass Ärzte gar keine Ursachen finden. Sind nach Schädelhirntraumen Nerven zwischen Riechepithel, wo die Riechzellen liegen, und Gehirn durchtrennt worden, ist Hilfe ebenso schwierig wie bei angeborenen Riechstörungen, die vermutlich aufgrund genetischer Defekte entstanden sind.

Das Diagnoseverfahren bei Riechstörungen ist heute dank einer Batterie an Riechstiften, den *Sniffin Sticks*, standardisiert. Der Test prüft die Fähigkeit von Patienten, Gerüche überhaupt wahrzunehmen und zu unterscheiden sowie die Wahrnehmungsschwelle, ab der Gerüche erkannt werden. Auch bei neurologischen Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson kann solch ein Riechtest helfen, die Diagnose zu schärfen. Bei beiden Krankheiten kommt es bereits im Frühstadium sehr oft zu Riechstörungen.

# Dem empfindlichsten Sinn auf die Sprünge helfen



**Privatdozent Dr. Michael Damm, Leiter der Ambulanz für Riech- und Schmeckstörungen in der Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde der Universität Köln, erläutert die Therapie von Riechstörungen.**

## Welche Behandlungsmöglichkeiten gibt es heute bei Riechstörungen?

Einen Versuch mit Cortison-Tabletten sollte man bei jedem Patienten wagen. Bei einem Drittel der Patienten verbessert sich dadurch die Riechfähigkeit. Schlägt das Mittel an, applizieren wir es über acht Wochen, aber lokal, direkt auf das Riechepithel. Einige weitere Wirkstoffe werden derzeit erprobt, aber richtige Erfolge haben wir noch nicht. Bei bestimmten Ursachen, etwa wenn das Riechepithel mechanisch durch Polypen verlegt ist, hilft oft eine Operation. Besondere Hoffnungen setzen wir derzeit auf ein neues Riechtraining, das wir in einer großen Studie an 16 bundesdeutschen Kliniken erproben.

## Wie funktioniert das Riechtraining?

Es können Patienten mitmachen, die gar nichts riechen, also eine Anosmie haben, die seit höchstens zwei Jahren besteht. Sie bekommen Düfte mit nach Hause und sollen regelmäßig daran riechen.

*Mithilfe von Riechstiften (Sniffin Sticks) kann festgestellt werden, ob der Patient ein normales oder vermindertes Riechvermögen hat. Die Riechstifte enthalten natürliche und künstliche Aromastoffe. Beim Riechtest wird die Kappe geöffnet, dann kann der Patient an der Stiltspitze riechen.*



## Was machen die Teilnehmer der Studie?

Trainiert wird mit vier verschiedenen Substanzen in einem Set an Riechstiften. Es geht um Phenylethylalkohol, der nach Rosen duftet, um Eukalyptus, Limonenduft und Eugenol, den Duft von Gewürznelken. Zweimal täglich sollen die Teilnehmer kurz, aber intensiv, an den Düften schnuppern, dann jede Woche notieren, ob sie etwas wahrgenommen haben. Die Studie geht zwei Mal vier Monate lang.

## Warum über zwei Mal vier Monate?

Wir haben keine Blindprobe, sagen den Teilnehmern vorab, welche Duftstoffe es sind. Eine Kontrolle haben wir dennoch, indem wir mit verschiedenen Konzentrationen arbeiten. Eine Gruppe erhält Stifte mit höherer, die andere mit niedriger Konzentration. Nach vier Monaten tauschen wir die Stifte aus.

## Warum sollte dieses Training gegen Riechstörungen helfen?

Das Riechepithel regeneriert ja bei uns allen sehr schnell. Nach wenigen Wochen hat es sich einmal komplett erneuert. Einige Studien im Tiermodell zeigen, dass eine komplexe Duftumgebung mit möglichst vielen Gerüchen diese Regeneration noch fördern kann. Auf solch einen Effekt hoffen wir bei den Patienten.

## Riechtraining gibt es aber derzeit nur im Rahmen der Studie?

Für therapeutische Zwecke: ja. Ein Training dieses Sinns ist aber eigentlich für alle Menschen sinnvoll, wir nehmen uns zu wenig Zeit für das Riechen (siehe „Wie Sie Ihren Riechsinn trainieren können“, S. 73).

## Kommt man in der Therapie von Riechstörungen weiter?

Ich hoffe es. Leider haben Riechstörungen nach wie vor keine große Lobby. Wir haben längst etablierte Diagnoseverfahren, können sie bislang aber fast überhaupt nicht abrechnen. Die Krankheit wird im Gesundheitswesen kaum abgebildet.

## Gibt es eine Chance, dass Riechstörungen auch nach Jahren noch verschwinden?

So etwas kommt vor. Wir hatten das hier unlängst bei zwei posttraumatischen Patientinnen mit Anosmie – eigentlich eine Gruppe, bei der die Chancen auf Heilung sehr gering sind, weil oft ganze Nervenbündel zwischen Gehirn und Riechepithel gekappt sind. Beide konnten nach der Gabe von Cortison jedoch wieder gut riechen. Wir können uns das eigentlich gar nicht erklären.

## Jenseits der fünf Sinne – Intuition

Dank Auge, Ohr, Nase, Zunge und Haut nehmen wir ununterbrochen eine Vielzahl von Sinneseindrücken auf. Nur ein Teil davon dringt in unser Bewusstsein und spielt bei rationalen Entscheidungen eine Rolle. Manchmal aber handelt der Mensch ganz spontan, gewissermaßen „aus dem Bauch heraus“. Auch ohne bewusst darüber nachzudenken, entscheidet er sich selbst in kniffligen Situationen überraschend oft für das Richtige. Der Volksmund vermutet dann nicht selten einen geheimnisvollen 6. Sinn. Streng wissenschaftlich spüren dagegen einige Forscher diesen Eingebungen nach. Sie wollen wissen, warum die Intuition so oft erfolgreich ist – und wann man ihr vertrauen sollte.



Im Gegensatz zum Menschen können Bienen ultraviolettes Licht wahrnehmen.

Wie wäre es mit einem Auge für Radioaktivität? Oder einem Ohr für Elektrizität? Viele Sinnesorgane sind vorstellbar, die uns das Überleben in einer modernen Umgebung erleichtern könnten. Aber so schnell arbeitet die Evolution nicht. Noch ist unsere Wahrnehmung entwicklungsgeschichtlich an das Leben unserer Vorfahren angepasst. Vorerst bleibt uns also nur der neidvolle Blick in die Tierwelt. Schmetterlinge und Bienen etwa können UV-Licht erkennen, während Schlangen Infrarotstrahlung wahrnehmen. Zugvögel orientieren sich am Magnetfeld der Erde und Haie verfügen über einen elektrischen Sinn. Fledermäuse dagegen nutzen Ultraschall zur Echo-Ortung.

Elefanten schließlich nehmen den unterhalb des menschlichen Hörvermögens liegenden Infraschall wahr – was sie möglicherweise vor einer der größten Naturkatastrophen gerettet hat. Der Tsunami vom 26. Dezember 2004 wurde durch ein Seebeben im Indischen Ozean ausgelöst und forderte mehr als 200.000 Todesopfer. Sehr viele Landtiere jedoch konnten sich retten, unter ihnen auch Elefanten. Manche Wissenschaftler vermuten, dass sich die an der Küste abgebremste Welle zumindest den empfindsamen Dickhäutern per Infraschall in der Luft oder im Boden ankündigte. Manchen Berichten zufolge flüchteten aber auch primitiv lebende Eingeborene vor der Riesenwelle. Sie hatten nicht näher beschreibbare Änderungen in ihrer Umwelt als Zeichen einer drohenden Gefahr interpretiert. Diese außergewöhnliche Sinnesleistung haben sie wahrscheinlich dem *Anterior Cingulate Cortex*, kurz ACC, zu verdanken.

### Erfolgreiche Handlungen durch intuitive Entscheidungen

Wie die US-amerikanischen Forscher Joshua Brown und Todd Braver 2005 zeigen konnten, dient der zwischen unseren beiden Gehirnhälften liegende ACC als Warnsystem. Viele Medien feierten dies als die Entdeckung des 6. Sinns beim Menschen. Der ACC gleicht frühere – bereits abgespeicherte – Erfahrungen mit aktuellen Umwelteindrücken ab. Er wird vor allem dann aktiv, wenn in einer riskanten Situation eine Fehlentscheidung droht. Dabei geht es in erster Linie um Gefahren, die nicht bewusst wahrgenommen werden. Dann werden mögliche Konsequenzen nicht nur erwogen, sondern in gewisser Weise auch erahnt.

Erfolgt die Entscheidung aber ohne bewusste Kalkulation der Argumente und spontan, handelt es sich nach der Definition von Dr. Henning Plessner von der Universität Heidelberg



*Übung macht den Meister: Die Nachwuchs-Kicker des sächsischen Fußballvereins Dynamo Dresden lernen im Training den richtigen Umgang mit dem Ball.*



*In Salvador de Bahia (Brasilien) kicken Jugendliche barfuß auf der Straße. Die Regeln werden flexibel ausgelegt, was eine kreative Spielweise fördert.*

um eine Intuition. Wie seine Forschung und die Arbeiten anderer Wissenschaftler zeigen, können diese „Eingebungen“ zu außerordentlich erfolgreichen Handlungen führen. In bestimmten Situationen sind sie sogar einer Entscheidung nach langer Reflexion überlegen. „Die Intuition greift auf Wissen zurück, das häufig automatisch erworben und automatisch aktiviert wird“, so Plessner. Dieses sogenannte implizite Wissen ist dem Forscher zufolge nicht bewusst zugänglich, äußert sich jedoch in einem Gefühl. Explizites Wissen dagegen ist unmittelbar zugänglich. „Es bezieht sich aber in der Regel auf eine geringere Informationsmenge als das implizite Wissen“, erklärt Plessner. Der Erwerb der beiden Wissensarten erfolgt jeweils nach eigenen Regeln und Mechanismen.

In einer Studie ließ Plessner Probanden – Fußballkenner und Fußballlaien – die Ergebnisse von Fußballspielen vorhersagen, etwa vor der Weltmeisterschaft im Sommer 2006. „Prinzipiell lagen die Fußballerexperten mit ihren intuitiven Tipps zum Spielausgang besser als die Laien“, berichtet der Psychologe. In der Gruppe der Experten gab es ein interessantes Ergebnis: Die intuitive Vorhersage der Probanden einige Wochen vor einem Spiel war besser als der kurz vor dem Anpfiff abgegebene Tipp. „Das liegt möglicherweise daran, dass unmittelbar vor dem Spiel konkrete Informationen

bewusst miteinbezogen wurden, obwohl sie keinen diagnostischen Wert hatten.“ Möglicherweise wurde so die Nutzung des impliziten Wissens beeinträchtigt.

#### **Intuitive Sportler reagieren schneller und besser**

Aber auch für die Spieler kann Intuition den entscheidenden Vorteil bringen. „Das gilt vor allem dann, wenn die einfachste und schnellste Handlung aus mehreren Alternativen ausgewählt werden muss“, berichtet Professor Markus Raab, Psychologe an der Universität Flensburg. „Je länger ein Spieler in seinem Sport aktiv ist, desto eher kann er sich auf die erste Handlungsmöglichkeit verlassen, die ihm einfällt. Wenn er dann auch noch persönlich zur Intuition neigt, reagiert er viel schneller und auch besser.“ Fußball ist aber nur eine der Sportarten, die von intuitiven Sportlern profitieren. Denn Eingebungen sind immer dann nötig, wenn sich die Umwelt ändert und eine gewisse Unsicherheit herrscht. „Intuition braucht jeder Spieler, der von anderen abhängt und nicht immer das Gleiche machen kann“, erklärt Raab. Das gelte für Mannschaftssportarten, alle Ballspiele, aber auch für das Skifahren und das Surfen. „Außerdem kommt in der konkreten Situation dann noch der Zeitdruck dazu“, erläutert der Flensburger Forscher.



*Auf die Nase ist Verlass: Auch beim Menschen entscheiden artspezifische Duftstoffe darüber, ob wir jemanden „gut riechen“ können und ihm Sympathie und Zuneigung entgegenbringen.*

Eine intuitive Spielweise wird in der Regel vor allem den Spielmachern zugeschrieben. Nach Raabs Ansicht erwägen diese vor der Entscheidung oft aber doch zwei oder drei Optionen. Was von Zuschauern und Kommentatoren beispielsweise als genialer Pass eingestuft wird, kann möglicherweise als festes Bewegungsmuster intensiv trainiert worden sein. Wie aber lernt ein Spieler nun, intuitiv zu sein? „Grundsätzlich gibt es zwei Modelle“, erläutert Raab. Beispielsweise gebe es „Straßenfußball“, wie er etwa in Brasilien am Strand gespielt wird. Die Kinder handeln dabei ihre eigenen, jederzeit veränderbaren Regeln aus und machen ihre Bewegungserfahrungen ganz beiläufig und spielerisch, die dann implizit gespeichert werden. Hingegen wird hierzulande meist von klein auf nach klaren Vorgaben, klassischen Übungsmethoden und unter Anleitung trainiert. „Vergleiche zwischen diesen beiden Modellen sind schwierig, weil noch andere Faktoren eine Rolle spielen“, sagt Raab. Es gebe aber Hinwei-

se, dass das implizite Lernen doch etwas besser ist. Deswegen würde es dem Wissenschaftler gefallen, wenn die deutschen Nachwuchskicker künftig etwas kreativer und flexibler sowie unter weniger stringenten Bedingungen trainieren würden.

Auch in Studien jenseits des Sports wurde gezeigt, dass die Intuition die bessere Entscheidung liefern kann – aber eben nicht immer. Eingebungen sind sicher nicht immer als Ratgeber zu empfehlen. „Das explizite Wissen kann man ja bewusst abrufen und damit auch überprüfen“, meint Plessner. Das implizite Wissen aber ist nicht direkt zugänglich. Ein Experte beispielsweise bekomme auf seinem eigenen Gebiet genügend Rückmeldungen, um zu sehen, ob er intuitiv richtig liegt. Alle anderen dagegen tragen das Risiko, sich auf möglicherweise falsches oder verzerrtes implizites Wissen zu verlassen. „Das führt dann unter anderem dazu, dass viele Leute schlimme Krankheiten für eines der größten Risiken halten, auch wenn diese statistisch sehr selten sind“, erklärt Plessner.

Da fehle uns einfach ein Sensor für die Stichhaltigkeit impliziten Wissens. In manchen Fällen aber können wir uns wenigstens auf unsere Nase verlassen – vor allem im zwischenmenschlichen Bereich. Denn auch wir Menschen kommunizieren über artspezifische Duftstoffe. So verströmt jeder Mensch seinen ganz eigenen Cocktail aus verschiedenen Geruchsstoffen. Ob ihn sein Gegenüber im Einzelfall dann „gut riechen“ kann, hängt unter anderem mit dem Immunsystem zusammen. So reagieren Frauen eher positiv auf Männer, die sich in bestimmten Immunmerkmalen von ihnen unterscheiden. Nach einer Hypothese steigen damit die Chancen auf Nachwuchs mit einer neuartigen Version der Körperabwehr und potenziell größerem Erfolg im Kampf gegen Krankheitserreger. Denkbar ist auch, dass auf diesem Weg die Anziehung zwischen nahen Verwandten – und möglicher Inzucht – verhindert wird.

Noch immer umstritten ist, wie die chemischen Signale überhaupt wahrgenommen werden. Lange galt das Vomeronasalorgan, eine kleine Grube in der Nasenscheidewand, als Hauptverdächtiger. „Das konnte aber nicht bestätigt werden“, berichtet Professorin Bettina Pause, Psychologin an der Heinrich-Heine-Universität in Düsseldorf. „Vermutlich spielt das Organ an sich keine Rolle. Neuere Resultate lassen aber vermuten, dass entsprechende Rezeptoren in das normale olfaktorische System integriert sein könnten.“ (siehe „Die Karten der Düfte“, S. 70 ff.). Im Umgang mit einer neuen Bekanntheit heißt es also auf jeden Fall: Immer der Nase nach!

## Die Reflexe eines Hexers



Als Torwart der deutschen Nationalmannschaft schrieb Andreas Thiel Handballgeschichte – und wurde dank seiner außergewöhnlichen Reflexe als „der Hexer“ bekannt. Mittlerweile arbeitet er als Rechtsanwalt in einer Kölner Kanzlei.

Welche Rolle hat die Intuition in Ihrer Karriere als Sportler gespielt?

An besonders guten Tagen wusste ich nach erfolgreichen Passagen oft nicht, wie ich den Ball überhaupt halten konnte. Trotzdem denke ich nicht, dass wir Sportler bessere Reflexe haben als andere Leute. Wir müssen aber Bewegungen und



Bewegungsmuster erlernen, die irgendwann so automatisiert sind, dass sie auch ohne Nachdenken ablaufen. Wenn man will, kann man diesen Faktor Intuition oder 6. Sinn nennen. Im Grunde geht es aber darum, dass man ab einer gewissen Stufe der Fähigkeit oder Qualität diese Fertigkeiten abrufen kann – ob als Handballtorwart oder als begnadeter Arzt.

In welchen Situationen konnten Sie sich auf Ihre Intuition verlassen?

Meine richtig guten Spiele habe ich nur unter Druck gemacht. Erst dann habe ich Höchstleistungen gebracht. Wenn ich auf den Verstand umschalten musste, wurde ich schlechter. Im Sport nimmt man die Informationen über das Auge auf und reagiert dann intuitiv. Es wird kein Schalter umgelegt, sondern alles geht von selbst. Am Anfang einer Karriere spielt sicher der Faktor Talent eine große Rolle, weil man sich erst die Technik aneignen muss, die später zur Anwendung kommt. Manche Spieler wiederum können nichts so richtig gut, treffen aber die richtige Entscheidung, wenn das Spiel auf der Kippe steht. Die können die Spielsituation in Sekundenbruchteilen erkennen.

Verlassen Sie sich auch jenseits des Sports auf Ihre Intuition?

Es gibt ja den sogenannten ersten Eindruck, ob einem ein Mensch sympathisch ist und ob man ihm vertrauen kann. Mit zunehmendem Alter habe ich gelernt, diesen ersten Eindruck wenigstens zu speichern. Ich habe auch festgestellt, dass ich am besten bin, wenn ich gut sein muss, ob in der Schule, im Studium oder im Beruf. Ich war zum Beispiel in Mathe immer grottenschlecht, habe in der mündlichen Prüfung im Abitur aber doch eine schlechte 2 bekommen. Und in der mündlichen Prüfung im ersten juristischen Staatsexamen war ich auch über die Maßen gut. Der Sport hat mir sicher beigebracht, unter Druck das Beste aus mir rauszuholen, souverän und gelassen zu bleiben – und trotz Lampenfieber nicht zu verkrampfen.

Sie haben drei Töchter. Gibt es nun die viel zitierte „weibliche Intuition“?

Ja, auf jeden Fall. Die emotionalere Intelligenz liegt ganz klar beim weiblichen Geschlecht.

*Unzählige klare Torchancen hat der frühere Handball-Nationaltorhüter Andreas Thiel vereitelt. Seine Reflexe brachten die gegnerischen Werfer manchmal an den Rand der Verzweiflung.*

# (Internet-)Adressen und Literatur

## Sinne allgemein

### Internet

[www.turmdersinne.de](http://www.turmdersinne.de)

Website des interaktiven Nürnberger Museums „turmdersinne“ rund um das Thema Wahrnehmung mit Informationen, Veranstaltungstipps und Sonderausstellungen.

### Bücher

**Taschenatlas der Anatomie 3. Nervensystem und Sinnesorgane**

Werner Kahle/Michael Frotscher, Thieme Verlag Stuttgart, 2005.

**Biologische Psychologie**

Niels Birbaumer/Robert F. Schmidt, Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2006.

**Aphrodite. Eine Feier der Sinne**

Isabel Allende, Suhrkamp Verlag, 1999.

**Die fünf Sinne. Sehen, Hören, Riechen, Fühlen, Schmecken**

Charlotte Röderer, Bibliographisches Institut Mannheim, 2002.

### Anlaufstellen für Patienten

**NAKOS - Nationale Kontakt- und Informationsstelle zur Anregung und Unterstützung von Selbsthilfegruppen**

Wilmersdorfer Str. 39, 10627 Berlin  
Telefon: 030 / 31 01 89 60,  
Fax: 030 / 31 01 89 70  
E-Mail: [selbsthilfe@nakos.de](mailto:selbsthilfe@nakos.de)  
Internet: [www.nakos.de](http://www.nakos.de)

## Sehen

### Internet

[www.dialog-im-dunkeln.de](http://www.dialog-im-dunkeln.de)

Das Hamburger Museum bietet Sehenden Führungen durch die unsichtbare Welt von Düften, Winden, Temperaturen und Tönen an, geleitet von blinden Menschen.

[www.dzb.de](http://www.dzb.de)

Die Deutsche Zentralbücherei in Leipzig versorgt blinde und sehbehinderte Menschen mit Literatur, Bildungs- und Informationsangeboten.

[www.dog.org](http://www.dog.org)

Informationen für Patienten und Ärzte sowie Veranstaltungshinweise und Publikationen der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft (DOG).

### Bücher

**Expeditionen ins Reich der Seuchen**

Johannes W. Grüntzig/Heinz Mehlhorn, Spektrum Akademischer Verlag, 2005.

**Besser sehen. Brille, Linsen oder Operation?**

Vera Herbst, Stiftung Warentest, 2003.

**Der Schatten. Hans Christian Andersens Märchen – gesehen von Günter Grass**

Hans Chr. Andersen, Verlag Steidl Göttingen, 2004.

## Hören

### Internet

[www.dalaerm.de](http://www.dalaerm.de)

Der Deutsche Arbeitskreis zur Lärmbekämpfung e.V. präsentiert Informationen zu Lärm und Lärmreduzierung, ein Nachschlagewerk („Lärm-ABC“) und Berechnungsmasken für Straßen- und Schienenverkehrslärm.

[www.rki.de/cln\\_011/nn\\_227198/DE/Content/GBE/Gesundheitsberichterstattung/Publikation/Themenhefte/themenhefte\\_\\_node.html\\_\\_nnn=true](http://www.rki.de/cln_011/nn_227198/DE/Content/GBE/Gesundheitsberichterstattung/Publikation/Themenhefte/themenhefte__node.html__nnn=true)

Themenheft 29 der Gesundheitsberichterstattung des Robert-Koch-Instituts (Berlin) zu „Hörstörungen und Tinnitus“.

[www.klinikum.uni-heidelberg.de/fileadmin/hno/pdf/CInfoPat.pdf](http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/fileadmin/hno/pdf/CInfoPat.pdf)

Patientenbroschüre der HNO-Uniklinik Heidelberg über Cochlea-Implantate.

[www.hoergarten.de](http://www.hoergarten.de)

Beschreibt Exponate des Oldenburger Hörgartens wie „Mittelohrpauke“ oder „Flüsterspiegel“ und berichtet vom Bau des „Haus des Hörens“.

### Bücher

**Leben mit Lärm**

Hrsg. von C. F. Gethmann, Springer Verlag Berlin, 2006. Band 28 der Reihe „Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung“.

**Augenblicke für das Ohr – Der Mensch und sein Gehör**

Susanne Wagner, Verlag Rüffer und Rub Zürich, 2004.

**Viel Lärm um nichts**

William Shakespeare, dtv, München, 2001 (deutsch-englische Ausgabe der erstmals 1600 veröffentlichten Komödie).

**Wer nicht hören will, muss fühlen**

Susanne Mischke. Piper, München, 2004.

## Fühlen

### Internet

[www.museum-der-hand.de](http://www.museum-der-hand.de)

Neugier am Wunderwerk Hand will das 1996 eröffnete „Museum der Kulturgeschichte der Hand“ im bayerischen Wolnzach wecken. Ausstellungsräume und -exponate werden beschrieben.

[www.forum-schmerz.de](http://www.forum-schmerz.de)

Patienten finden hier Informationen rund um das Thema (Nerven-)Schmerzen wie etwa Gürtelrose, aber auch Hinweise auf Schmerztherapeuten und Selbsthilfegruppen.

[www.dmsg.de](http://www.dmsg.de)

Die Deutsche Multiple Sklerose Gesellschaft kümmert sich um die Belange von MS-Patienten und organisiert die sozialmedizinische Nachsorge.

[www.derma.de](http://www.derma.de)

Die Deutsche Dermatologische Gesellschaft gibt Informationen über Allergien, Hautkrankheiten, Hautpflege und Hautgesundheit.

### Bücher

**Götz von Berlichingen mit der eisernen Hand**

Johann Wolfgang von Goethe, Cornelsen Verlag Berlin, 2003 (zeitgemäß gestaltete und kommentierte Ausgabe des erstmals 1773 veröffentlichten Werkes).

**Die Sprache der Haut. Das Wechselspiel von Körper und Seele**

Uwe Gieler, Walter-Verlag Düsseldorf, 2005.

**Verstand und Gefühl. (Sinn und Sinnlichkeit)**

Jane Austen, dtv München, 2000 (Ersterscheinung des Romans 1811).

## Riechen

### Internet

<http://www.tu-dresden.de/medkhno/riech.htm>

Auf den Internetseiten der HNO-Universitätsklinik Dresden stehen Informationen zum Thema Geruch und Geschmack. Außerdem finden Patienten mit Riech- und Schmeckstörungen praktische Tipps für den Alltag.

[www.hno.org/patienten/patinfo\\_riechen.html](http://www.hno.org/patienten/patinfo_riechen.html)

Die Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie bietet Seiten für Betroffene rund um den Geschmacks- und Geruchssinn an.

[www.isi-goettingen.de](http://www.isi-goettingen.de)

Wie Marketing mit Duftstoffen betrieben wird, was in Sensoriklaboren passiert ist und einige Literaturtipps erklären die Seiten des Instituts für Sensorikforschung und Innovationsberatung (ISI) in Göttingen.

### Bücher

**Das Parfum. Die Geschichte eines Mörders**

Patrick Süskind, Diogenes Verlag Zürich, 2000 (erstmalig veröffentlicht 1985).

**Das Riechen. Von Nasen, Düften und Gestank**

Uta Brandes, Verlag Steidl Göttingen, 2002.

## Schmecken

### Internet

Siehe dazu die Internetlinks bei Riechen

### Bücher

**Das Paradies, der Geschmack und die Vernunft. Eine Geschichte der Genussmittel**

Wolfgang Schivelbusch, Fischer Verlag Frankfurt M., 2005.

**Fussballerküsse schmecken bitter**

Wolfgang A. Windecker, Frieling Verlag Berlin, 1993.

## Intuition

### Bücher

**Die Grenzen der Vernunft. Kognition, Intuition und komplexes Denken**  
Laszlo Merö, Rowohlt Verlag Reinbek, 2002.

**Blink! Die Macht des Moments**

Malcolm Gladwell, Campus Verlag Frankfurt/M., 2005.

**Ich vertraue auf Intuition. Der andere Albert Einstein**

Abraham Pais, Spektrum Verlag Heidelberg, 1998.

# Register

<b>A</b>		<b>E</b>		Hautersatz	41, 49
Ageusien	57	Ekzem	47	Helional	72
Alkohol	63, 66	Elektroden	26, 37 ff.	Hertz	36 ff.
Altersbedingte Makuladegeneration	20	Epidermis	44, 49	Hirnnerven	54
Alterssichtigkeit	19	Epithelzellen	54	Homo sapiens	55
Amboss	31	Ernährungsforschung	55 f., 60	Hörgerät	33, 36 ff.
Amilorid	62	Essen	9, 15 f.	Hörknöchelchen	33
Amputation	45	Eustachische Röhre	31	Hornhaut	17, 19, 22 ff.
Amygdalin	55	Explizites Wissen	77 f.	Hörschäden	8, 29, 33 f., 37
Anorexia	51	<b>F</b>		Hörsturz	32, 35
Anosmie	69	Farbrezeptoren	21	Hyposmie	74
Aroma	58	Farbspektrum	8	Hypothalamus	68
Augapfel	17, 19	Femto-Laser	19, 22, 24 f.	<b>I, J</b>	
Augeninnendruck	20, 24	Fettblocker	63	Immunsystem	70, 73 f., 78
Augenlinse	20	Fettzellen	44	Implantat	23, 26, 29, 34, 37 ff., 50, 80
Augmented Reality	18	Fibroblasten	49 f.	Implizites Wissen	77 f.
Autologes Gewebe	49	Flussblindheit	21	Infektionskrankheit	45
<b>B</b>		Frequenz	31 f., 35, 38 f.	Innenohr	8, 29, 31 ff., 36 ff.
Basalzellschicht	44	Frühchen	43	Intuition	76 ff.
Bittergeschmack	54 f.	Frühmensch	55	Iris	17, 24
Bittermandelextrakt	55	<b>G</b>		Jodarmut	63
Bitterrezeptoren	56 ff.	Gaumen	54, 57, 59, 63	<b>K</b>	
Bitterstoffe	54 f.	Gehirnströme	51	Känguruh-Methode	43
Blausäure	55	Gehörgang	31	Käseschmiere	48
Blinde	9, 25 f.	Gelber Fleck	20	Keratinozyten	44, 48 f.
Blinder Fleck	17	Geschmack	53 ff., 56 ff.	Kollagen	24, 44
Blindheit	20 f., 25	Geschmacksknospe	54	Konsumforscher	67
Borreliose	45	Geschmacksporus	54	Kontaktlinsen	19, 22, 24
Bourgeonal	72	Geschmackssinn	53 ff., 60, 63, 68	Körperschema	51
Bulbus olfactorius	68	Glaukom	20, 24	Kurzsichtigkeit	8, 19, 20, 22, 27
Bundesärztekammer	34	Gleichgewicht	13, 30 f.	<b>L</b>	
<b>C</b>		Glomeruli	68, 71	Laser	15, 19, 22 ff.
Chinin	54	Grauer Star	20, 24	Laserchirurgie	19
CIS-Strategie	38	Grundlagenforschung	8, 51	Lärm	8, 32 ff., 80
Cochlea-Implantat	29, 34, 37, 39	Grüner Star	20, 24	Lärmbelastung	8, 33, 35
Cochleärer Verstärker	36	Gürtelrose	47, 81	Läsion	50
Cornea	17, 22 ff.	<b>H</b>		Lederhaut	17, 44, 49
<b>D</b>		Haarfollikel	49	Lepra	45, 47
Diabetes mellitus	20, 45, 48	Haarsinneszellen	30 f., 33, 35 ff.	Limbisches System	54, 68
Diurese	62	Hammer	31	Linse	12, 15, 17, 20, 23 ff., 80
Duftkarten	68, 70	Haut	13, 41 f., 44, 47 ff., 66, 70, 76, 81		

<b>M</b>		<b>R</b>		Stromsignale	36
Magersucht	51	Regenbogenhaut	17, 24	Stützzellen	37
Maiglöckchenduft	72	Reizüberflutung	8	<b>T</b>	
Makula	17, 20	Retina	8, 17, 20, 25 f.	Talgdrüsen	44
Malaria	55	Retinitis pigmentosa	25 f.	Tastnerven	42
Mandelkerne	68	Retinoblastom	20	Tastsinn	8, 10, 30, 41, 51, 59
Meeresbrise	72	Rezeptor	8, 17, 54 f., 56, 61 ff., 68 ff., 73 f., 78	Taub, Taubheit	33 f., 36 f., 39
Meeresduft	67	Riechcortex	68	Taufliege	36
Messtechnik	36	Riechepithel	8, 17, 54, 63, 68, 70, 73 ff.	Thermosensoren	44
Mittelohr	31, 33, 57, 81	Riechkolben	68	Tinnitus	8, 10, 29, 32 ff., 80
Mixed Reality	18	Riechrezeptoren	70 ff., 61	Tissue Engineering	48
Mobilfunk	36	Riechsinn	9, 69 ff.	Trachom	21
Multiple Sklerose	46, 81	Riechsinneszellen	60, 68, 70 f.	Transmitter	54
<b>N</b>		Riechstifte	69, 70, 74 f.	Transplantation	48
Nasenhöhle	68	Riechstörungen	57, 65, 70, 74 f.	Trigeminusneuralgie	45 f.
Nervenfasern	31, 44, 54	Riechstrang	68	Trommelfell	31
Nervenstränge	54	Riechtest	69, 74	Tropeninstitut	21
Nervenzellen	26, 42 f., 45 f., 68, 70 f.	Riechtraining	69, 75	<b>U</b>	
Netzhaut	12 f., 17, 19 f., 25 ff.	Rot-Grün-Schwäche	21	Umami	53 f., 57 ff.
Neurodermitis	47	Ruffini-Körperchen	44	Umweltbundesamt	33 f.
<b>O</b>		<b>S</b>		Undecanal	72
Oberhaut	44, 48 f.	Schall, Schallwellen	29, 31, 33, 36 ff.	Unterarmprothese	48, 50
Ohrmuschel	29, 31	Schielen	21	Unterhaut	44
Onchozerkose	21	Schlaganfall	30, 57	<b>V</b>	
Ovales Fenster	31	Schmeckstörungen	8, 53, 57, 75, 81	Vater-Pacini-Körperchen	44
Oxytozin	43	Schmerztherapie	45	Verbrennung	45, 48
<b>P</b>		Schneckenorgan	31	Virtuelle Realität	18
Papille	54	Schweißdrüsen	44	Vomeronasalorgan	68, 78
Parageusien	10, 57	Sehbehinderte	18	<b>W</b>	
Parfüm	66 ff.	Sehchip	25	Weitsichtigkeit	19, 22, 24
Parosmien	74	Sehnerv	17, 20, 24	Windpocken	46
Phantogeusien	57	Sensorik	50, 58, 67	Wunde	45, 48 f., 69
Phantomschmerzen	9 f., 33	Sinneszellen	8, 17, 30 f., 34 ff., 44, 54, 57, 63, 68, 71, 74	<b>Z</b>	
Phantosmien	10, 74	Sokrates	12	Zapfen	17, 25
Pheromone	68, 70, 72 ff.	Spermien	70, 72	Zebrafisch	36
Polyneuropathie	45, 47	Sprachverständnis	37 ff.	Zellersatz	37
Prestin	36	Stäbchen	17, 25	Ziliarmuskel	17
Prozessor	37 f.	Stammzellen	8, 23, 37, 49, 54	Zinkmangel	57
Pupille	17, 22	Steigbügel	31	Zitrusfrüchte	66
		Stoffwechselstörung	48	Zunge	11, 39, 54 ff., 60 ff., 69, 76
		Strahlenkörper	17		
		Stress	32, 35, 46, 69, 72 f.		



Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.