

## Geheimnisvolles Wechselbad der Emotionen

»Liebende schließen beim Küssen die Augen,  
weil sie mit dem Herzen sehen möchten.«

(Daphne du Maurier, englische Schriftstellerin  
französischer Abstammung, 1907–1989).

### Ein Tag im Leben von Bianca und Michael

Selten zuvor war Michael so pünktlich am Flughafen. Doch heute ist ein ganz besonderer Tag. Ein kurzer Blick auf den Monitor zeigt ihm, dass die erwartete Maschine aus Amerika voraussichtlich erst in einer Stunde am Gate B14 eintreffen wird.

An Bord ist Bianca, mit der er seit sechs Monaten glücklich verlobt ist. Während Bianca als Medizinstudentin einen großen Teil der Semesterferien bei Verwandten in den USA verbracht und neben einem Krankenhauspraktikum in dieser Zeit sicherlich viel erlebt hat, ist Michael, der als Ingenieur für Informationstechnik für ein deutsches Elektronikunternehmen tätig ist, die Phase der Trennung dagegen wie eine halbe Ewigkeit vorgekommen. Zu tun hatte er eigentlich immer genug, aber an die langen Wochenenden, an denen er allein war, erinnert er sich nur ungern.

»Da hätte ich mir ja noch etwas Zeit lassen können«, denkt sich Michael insgeheim. »Aber was solls – besser zu früh als zu spät am Flughafen.« Schon bei dem Gedanken, dass er in einem Verkehrsstau hätte stecken bleiben und Bianca mit Koffern in der Hand vergeblich nach ihm hätte suchen können, wird ihm unbehaglich zumute.

Michael schlendert durch den Ankunftsbereich, vergewissert sich noch einmal, welchen Ausgang Bianca für B14 nehmen wird und bemerkt, wie sich seine innere Anspannung allmählich legt um einer tief empfundenen Freude Platz zu machen. Um die verbleibende Zeit zu überbrücken, setzt er sich in ein Bistro namens »Zeppe-lin«, welches einen direkten Blick auf die Anzeige »Arrivals« gestattet.

»Ich nehme das Sandwich mit Huhn und dazu eine Tasse Kaffee«, sagt er dem Kellner und greift nach einer Zeitung. Er überfliegt die Schlagzeilen, liest die Artikel aber nur diagonal. Es fällt ihm sichtlich schwer, sich heute so richtig zu konzentrieren. Lediglich eine Reportage über San Francisco veranlasst ihn zu einem tieferen Einstieg. »Ihre Verwandten leben in einem Vorort von Monterey«, überlegt er. »Wie ich Bianca kenne, hat sie sich die Golden Gate Bridge nicht nur auf Fotos angesehen.«

Während Michael noch mit seiner kleinen Mahlzeit beschäftigt ist, wird die Anzeige mit den »Arrivals« gerade aktualisiert. »Die Maschine trifft doch etwas früher ein und wird in wenigen Minuten landen«, schießt es ihm durch den Kopf. Nervös faltet er die Zeitung zusammen und gibt dem Kellner ein Zeichen. Nach dem Bezahlung der Rechnung begibt er sich auf direktem Weg zum Ausgang.

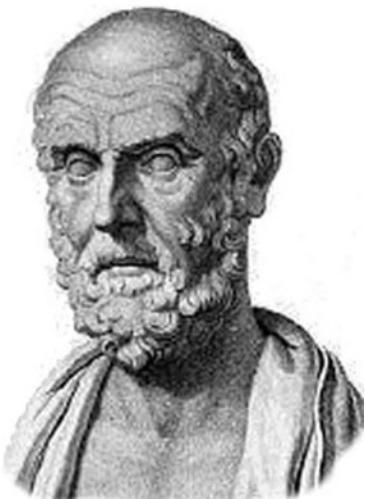
Aufgeregter beobachtet Michael, wie sich die Tür in kurzen Abständen öffnet und schließt. Braun gebrannte und mit Koffern und Reisetaschen gut bepackte Urlauber bahnen sich ihren Weg durch die Menschenmenge, Geschäftsleute mit Aktenkoffern hasten an ihm vorbei, ein aufgeregter Japaner scheint jemanden zu suchen, während drei Araber sich offensichtlich beim Smalltalk amüsieren. Ähnlich wie in einem Film registriert Michael dies aber nur ganz am Rande.

Plötzlich entspannt sich sein Gesichtsausdruck – Bianca kommt aus der Tür. Sie erkennt ihn sofort, lässt den Wagen mit dem Koffer kurz stehen und läuft auf ihn zu. Wortlos fallen sich die beiden in die Arme. Als sie sich küssen, hat Bianca Tränen der Freude in den Augen. Michael hingegen – den vertrauten Geruch ihres Körpers wahrnehmend – hat nur einen einzigen Gedanken: »Wir gehören zusammen!«

Diese kurze Szene aus dem Leben zweier junger Menschen dürfte vielen von uns bekannt vorkommen. Die innere Unruhe, Anspannung, Aufregung, gepaart mit Sehnsucht und dann das schier unendliche Glücksempfinden nach der Begegnung – wer hat dieses Wechselbad der Gefühle in ähnlichen Situationen nicht bereits selber durchlebt?

## Weshalb unser Gehirn »Schmetterlinge« produziert

Auch wenn die beiden den Eindruck haben, das Zentrum ihrer Liebe sitze im Herzen, so ist es in Wahrheit doch ausschließlich ihr Gehirn, das für das Herzklopfen und die »Schmetterlinge im Bauch« verantwortlich ist. »Nicht mit dem Herzen, sondern mit dem Gehirn denken wir«, so hatte es der griechische Arzt Hippokrates, der auf der Insel Kos lebte, bereits um 400 v. Chr. formuliert, womit er seiner Zeit allerdings hoffnungslos voraus war. Denn obwohl das Organ, dem die antiken Griechen den Namen »en kephale« (»im Kopf gelegen«) gegeben hatten, die Menschen von jeher faszinierte, war es ein langer Weg, bis man verstand, dass allein das Gehirn der Entstehungsort unserer Gedanken, Gefühle, Empfindungen und letztendlich auch des Bewusstseins ist.



ΗΙΠΠΟΚΡΑΤΕΣ

Abb. 1: Hippokrates

Die Frage nach der Quelle und dem Ort des Bewusstseins dürfte unsere Ahnen indessen bereits in grauer Vorzeit beschäftigt haben. So wurde von den Menschen des Altertums der Kopf als Behausung böser Geister betrachtet. Wie wir heute von Knochenfunden wissen, wurden Menschen dieser Epoche gelegentlich Löcher in den Kopf geschabt – offensichtlich um Krankheiten wie »Besessenheit« mit mehr oder weniger fragwürdigem Erfolg zu kurieren.

Griechische Anatomen wie Anaxagoras suchten nach dem Sitz des Geistes im menschlichen Körper und glaubten, dass die Hohlräume im Gehirn jene Flüssigkeiten enthielten, welche den Hauch des Geistes darstellten. Der Grieche Alkmäon von Kroton stellte bereits um 500 vor Christus im Rahmen eigens durchgeföhrter Sektionen an Tieren fest, dass sich von den Sinnesorganen Nervenbahnen zum Gehirn ziehen. Er nahm daraufhin an, dass im Gehirn das Zentrum für die Sinneswahrnehmung und auch für das Denken liege. Allerdings hielt er das Gehirn für eine Drüse, die Gedanken absondere wie eine Tränendrüse Tränen.

Lange davor war indessen bereits den Ägyptern bewusst, dass das Gehirn mit den Denkprozessen eines Menschen in Verbindung gebracht werden musste. Herophilos (335 v. Chr) und Erasistratos (300 v. Chr) brachen erstmals das Tabu, Leichen zu sezieren, und fanden, dass ein Mensch dem bestimmte Nervenbahnen durchtrennt wurden, nicht mehr sehen konnte. Sie entwickelten daher die Vorstel-

---

**Leonardo da Vinci:  
Künstler und Forscher**

Als Leonardo da Vinci im Jahre 1452 das Licht der Welt erblickte, war Italien gerade im Begriff, das Mittelalter in raschen Schritten zu verlassen. Italien und insbesondere Florenz standen im Mittelpunkt des während der Renaissance neu erwachten geistigen Lebens. Diese historische Entwicklung, die ihre Anfänge in den gelehrten Kreisen der humanistischen Schriftsteller hatte, stand in deutlichem Zusammenhang mit den Fortschritten der Wissenschaft, mit den Veränderungen im kirchlichen Bereich und mit dem Entstehen wirtschaftlicher Strukturen.

Leonardo da Vinci war der Sohn eines angesehenen Notars. Schon früh erkannte der Vater die außergewöhnliche Begabung seines Sohnes und förderte ihn mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln. Auf diese Weise kam der junge Leonardo im Alter von 15 Jahren in die Werkstatt des Florentiner Meisters Verrocchio und hatte sich im Jahre 1472 – gerade zwan-

zigjährig – in der Malerzunft der Stadt bereits einen Namen gemacht.



**Abb. 2:** Leonardo da Vinci

Etwa ab 1500 widmete sich Leonardo da Vinci hauptsächlich technischen und naturkundlichen Studien. In unzähligen sehr präzisen Zeichnungen von Muskeln, Knochen und Gehirnen versuchte er, dem Gesetz des Lebens auf die Spur zu kommen und es in einer alle Naturscheinungen umfassenden Kosmologie zusammenzufassen.

lung eines zusammenhängenden Systems, von welchem das Gehirn das Zentrum bildete. Das Gehirn war für sie der Sitz der Seele und die Kommandozentrale für sämtliche Denkprozesse.

Der römische Arzt Claudius Galenus konnte wiederum zahlreiche Erfahrungen an verletzten Gladiatoren sammeln. Auf diese Weise verhalf er der bereits von den Ägyptern entwickelten und heute allgemein akzeptierten Vorstellung zum Durchbruch, dass das Gehirn das Zentrum menschlichen Denkens und des Gedächtnisses ist. Ganz anderer Auffassung war hingegen Aristoteles. Er vertrat im Gegensatz zu Hippokrates die durchaus nachvollziehbare Meinung, dass der Mensch mit dem Herzen denkt.

Letztendlich obsiegte aber das Kammernmodell von Anaxagoras, welches im Laufe der Jahrhunderte immer weiter verfeinert wurde. Mittelalterliche Philosophen schufen daraus ein sehr anschauliches Modell, bei dem die erste Kammer des Gehirns zur Wahrnehmung und Einsicht diente. Die zweite Kammer sollte dem Modell zufolge für Erkenntnis und Urteil und die dritte Kammer für die Speicherung der Ergebnisse der vorigen Kammern zuständig sein.

Erst um 1490 entwarf das »Allround-Genie« der Renaissance, Leonardo da Vinci, eine vorläufige »Landkarte« des Geistes, auf der in einer Art Dreiteilung unterschiedlichen Bereichen des Gehirns verschiedene geistige Funktionen zugeordnet wurden.

Selbst wenn heute Leonardo da Vincis Skizzen des Gehirns für die Wissenschaftler nur noch von historischem Interesse sind und ein sehr viel differenzierteres Abbild des Gehirns und seiner Funktionen zum Stand der Forschung gehört, hat unser intimstes Organ viele seiner Geheimnisse noch nicht preisgegeben. Vielmehr muss das Gehirn auch heute noch in weiten Bereichen als ein weißer Fleck auf der Landkarte der wissenschaftlichen Erkenntnisse bezeichnet werden.

Eine weitaus technischer geprägte Vorstellung hatte der französische Philosoph René Descartes (1596–1650), der das Gehirn mit einer Art Maschine verglich. Er stellte sich vor, dass eine in den Windungen des Gehirns enthaltene Substanz, die er als »Pneuma« bezeichnete, durch die von den Sinnesorganen ausgehende Erregung unter Druck gesetzt und von der Epiphyse (Zirbeldrüse des Gehirns) in die mit Röhrchen vergleichbaren Nerven umgeleitet würde. Auf diese Weise sollte das Pneuma zur Muskulatur gelangen und diese zu gezielten Bewegungen veranlassen.

Franz Josef Gall (1758–1828) stiftete wiederum unter seinen Zeitgenossen mit der Behauptung Unruhe, dass bestimmte Leistungen des Gehirns an den Schädelwölbungen erastbar seien. Doch erst Paul Broca (1824–1880) und Carl Wernicke (1848–1905) lieferten den wissenschaftlichen Beweis dafür, dass allen Hirnfunktionen abgrenzbare Regionen zuzuordnen sind. Zu diesem Zweck hatten die Forscher eine Reihe von Patienten mit Sprachstörungen untersucht. Cecile und Oskar Vogt sowie Korbinian Brodmann zogen zwischen 1900 und 1920 aus diesem Lokalisationskonzept die Konsequenz und fertigten die ersten detaillierten »architektonischen« Karten der Hirnrinde an.

### **Die Kartierung des Gehirns kommt der Entschlüsselung des Genoms gleich**

Während man also früher glaubte, dass komplexe Vorgänge wie das Lernen oder die Erinnerung in einem einzigen Gebiet des Gehirns lokalisiert seien, geht die heutige Forschung davon aus, dass an jeder Leistung des Gehirns diverse räumlich voneinander entfernte, aber über Nervenfasern verknüpfte Zellgruppen beteiligt sind. Wissenschaftler am Institut für Medizin im Forschungszentrum Jülich widmen sich unter der Leitung von Prof. Karl Zilles der Aufgabe, derartige Knotenpunkte und Vernetzungen zu lokalisieren. Das angestrebte Ziel – eine lückenlose Kartierung aller Gehirnfunktionen – ist indessen äußerst ehrgeizig und dürfte der vollständigen Entschlüsselung des menschlichen Genoms durchaus ebenbürtig sein. Die aus der Forschung resultierenden Ergebnisse werden, so viel zeichnet sich heute bereits ab, wieder eine Vielzahl von neuen Fragen aufwerfen, die noch zahlreiche Wissenschaftler-Generationen beschäftigen werden.

Unstrittig ist heute bereits, dass das Gehirn unsere Kommandozentrale ist, die über sämtliche Körperfunktionen regiert. Dies gilt nicht nur für unsere einfachen Verhaltensweisen wie Essen, Schlafen, Trinken und die Wärmeregulierung, sondern schließt auch die höher entwickelten Fähigkeiten des menschlichen Geistes wie seine Begabung für Kultur, Musik, Kunst, Wissenschaft und Sprache mit ein. Aber erst vor kurzem erhielten die Forscher Einblicke in die molekularen Vorgänge im Gehirn und entschlüsselten die ersten Bau-

steine und Prozesse einer bis dato unbekannten Chemie, die über unsere sämtlichen Denkprozesse – bewusst oder unbewusst – wacht und damit auch unsere gesamte Gefühlswelt bis hin zur Liebe steuert. Als Bianca und Michael auf dem Flughafen aufeinander zuliefen, sich in die Arme nahmen und liebkosten, setzte dies zugleich eine ganze Kaskade chemischer Reaktionen in ihren Gehirnen frei.

### **Bianca und Michael haben ihr eigenes Universum im Kopf**

Dennoch darf man sich das Gehirn unseres Paars nicht als einen einfachen Chemiereaktor vorstellen. Denn es wäre arbeitslos, wenn es mit dem menschlichen Körper nicht durch ein unvorstellbares Netzwerk von Befehlsleitungen verkabelt wäre. Ein Geflecht aus rund 380 000 km Nervenfasern, das aneinander gereiht die Entfernung von der Erde bis zum Mond überbrücken würde, sorgt für den einwandfreien Informationsfluss zwischen der Kommandozentrale und allen Bereichen des menschlichen Körpers.

So unglaublich es klingt: Die Hardware dieser Kommandozentrale im Kopf besteht aus rund 100 Milliarden Nervenzellen – das entspricht der Anzahl der Sterne in unserer Milchstraße. Wollten wir die Anzahl der theoretisch möglichen Verbindungen zwischen diesen Zellen berechnen, wäre das Ergebnis ganz und gar unvorstellbar, denn es gibt mehr mögliche Verbindungen zwischen all diesen Zellen als Atome im gesamten Universum!

Der Wissenschaftler Prof. Dr. Werner Stangl vom Institut für Pädagogik und Psychologie der Johannes-Kepler-Universität Linz setzt noch eins drauf und veranschaulicht diese unvorstellbar hohe Zahl wie folgt: »Wenn das Gehirn mindestens 15 Milliarden Gehirnzellen enthält, so können durch die verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten insgesamt  $2^{10}$  Milliarden Informationen gespeichert werden. Wenn wir diese Zahl niederschreiben wollten und jede Sekunde eine Null notierten, bräuchten wir hierfür sage und schreibe 90 Jahre.«

Diese einzigartige Architektur gestattet es dem Gehirn, die aufgenommenen Informationen nicht einfach nur abzubilden. Vielmehr ist es im Gegensatz zu einem Fotoapparat oder einem Tonbandgerät in einer geradezu genialen Weise in der Lage, eine Datenreduktion vorzunehmen. Mit anderen Worten: Das Gehirn separiert über-

---

### **Das alternde Gehirn büßt nur wenige Zellen ein**

Nach Angaben von Prof. Dr. Werner Stangl verliert der Mensch pro Tag zwischen 1000 und 10 000 Gehirnzellen. »Selbst wenn wir annehmen, dass ein Mensch von ursprünglich 15 Milliarden Gehirnzellen täglich 10 000 Zellen verliert, müsste er rund 410 Jahre alt werden, um nur zehn Prozent des Gehirns zu verlieren«, kalkuliert der Wissenschaftler. Diese Rechnung mache deutlich, dass die Kapazität des Gehirns nicht daran schuld sein könne, wenn die Gedächtnisleistung im Alter abnehme. Die

Ursache für einen Abbau liege gewöhnlich im mangelnden Training. Wenn ein Mensch durch die Umwelt und das Arbeitsleben nicht mehr gefordert werde, wenn er nicht mehr lernen müsse und die intellektuellen Anforderungen sinken, dann müsse er selber etwas tun und sein Gehirn trainieren. Nur durch geistige Aktivität werde sichergestellt, dass neue Gehirnmuster und Strukturen gebildet werden. Auf diese Weise werde die Denk- und Gedächtnisleistung nicht nur behalten, vielmehr könne sie selbst im Alter durchaus noch gesteigert werden.

---

flüssigen Datenmüll, indem es die von außen empfangenen Signale in Bruchteilen einer Sekunde interpretiert und zu einer persönlichen Welt zusammenfasst. Als Michael am Flughafen auf Bianca wartete, hat sein Gehirn, so unglaublich es klingt, etwa eine Million Male mehr Informationen empfangen, als es bewusst verarbeitet hat.

Um diesen einmaligen Vorgang verstehen zu können, der von keinem Computer auch nur annähernd erreicht wird, wollen wir zunächst das menschliche Gehirn ein wenig näher unter die Lupe nehmen. Es bringt im Falle von Bianca statistisch gesehen etwa 1245 Gramm, bei Michael 1375 Gramm auf die Waage.

Den größten Raumanteil nimmt das Großhirn ein, das etwa die Größe einer Grapefruit besitzt. Es ist in zwei unterschiedliche Hemisphären unterteilt, die für die Funktionen der jeweils gegenüberliegenden Körperhälfte zuständig sind. Bedeckt sind die beiden Gehirnhälften von der vielfach gefalteten Großhirnrinde (Cortex cerebri). Der Cortex versetzt uns in die Lage, zu organisieren, uns zu erinnern und zu verstehen, zu kommunizieren und kreativ zu sein, etwas zu erfinden und wertzuschätzen. Der komplizierteste und bemerkenswerteste Teil des Gehirns ist indes der nur erbsengroße Hypothalamus, quasi das »Gehirn« des Gehirns. Von hier aus werden Grundbedürfnisse wie Essen, Trinken, Schlafen, aber auch Körpertemperatur, Pulsfrequenz, die Hormone und die Sexualität gesteuert. Durch eine Kombination aus elektrischen und chemischen Botenschaften steuert der Hypothalamus auch die Hypophyse. Sie ist die

wichtigste Drüse unserer Schaltzentrale und reguliert unseren Körper mit Hilfe von Hormonen, komplexen chemischen Botenstoffen, die durch das Blut zu bestimmten Zielzellen transportiert werden.

### **Unser Gehirn auf einen Blick**

Grob betrachtet kann das menschliche Gehirn in fünf Bereiche unterteilt werden: Hirnstamm, Kleinhirn, limbisches System, Großhirn und die Cortex-Lappen.

#### *Der Hirnstamm*

Dies ist der älteste Teil des Gehirns. Er entwickelte sich vor mehr als fünfhundert Millionen Jahren. Da er dem vollständigen Gehirn eines Reptils ähnelt, wird er auch als Reptiliengehirn bezeichnet. Schon unsere tierischen Vorfahren besaßen dieses Gehirn; deshalb ist es auch für alle Grundfunktionen des Lebens zuständig: Bewegung, Jagen, Pflügen, Revierabsteckung, Riten, Paarungsdrang, Gewohnheit. Das Reptiliengehirn steuert auch lebenswichtige Funktionen wie die Atmung oder die Pulsfrequenz. Da es uralte Gewohnheiten und Verhaltensweisen nahezu unabänderlich gespeichert hat, ist es nur sehr begrenzt lernfähig und vermittelt uns statt dessen das Gefühl der Routine und Sicherheit. Emotionen kennt das Reptiliengehirn dagegen nicht. Der Schweizer Psychoanalytiker Carl Gustav Jung (1875–1961) vertrat daher die Auffassung, dass bestimmte Archetypen, das sind Verhaltensmuster aus der Urzeit der Menschheit, im Reptiliengehirn verankert sind.

#### *Das Kleinhirn*

Dieses befindet sich an der Rückseite des Hirnstamms. Seine Größe hat sich im Laufe der Evolution innerhalb der letzten Millionen Jahre etwa verdreifacht. Es besteht ebenfalls aus zwei Hemisphären und liegt im hinteren Teil des Schädels unter dem Großhirn. Das Kleinhirn ist vor allem für den richtigen Ablauf der Körperbewegungen verantwortlich und ermöglicht die Orientierung im Raum. Es dient auch als Speicher für Erinnerungen

und einfache erlernte Funktionen; die Fähigkeit, neue Bewegungen zu erlernen und später automatisch abzurufen, liegt ebenfalls hier. Das Kleinhirn speichert sämtliche erlernten Bewegungsabläufe vom Werfen eines Balles bis hin zum Klavierspielen.

Wenn wir gehen, laufen oder greifen, passiert scheinbar alles automatisch. Dabei ist jede Bewegung mit einem außerordentlichen Aufwand verbunden. Erst beim Eintauchen in eine völlig neue Umgebung erkennen wir, wie viel das Gehirn leistet. In der Welt der Schwerelosigkeit etwa müssen Astronauten selbst einfache Bewegungen neu erlernen.

#### *Das limbische System, auch Säugerhirn genannt*

Entwicklungsgeschichtlich etwas jünger ist das limbische System. Dieser bei den Säugern am höchsten entwickelte Bereich kann auf eine zwei- bis dreihundert Millionen Jahre alte Entwicklungsgeschichte zurückblicken. Er ist an der Steuerung von Körpertemperatur, Blutdruck, Pulsfrequenz und Blutzuckerspiegel beteiligt und hat darüber hinaus wesentlichen Anteil an lebenswichtigen Gefühlsreaktionen. Mit anderen Worten: Lachen und Weinen, Spieltrieb und Sexualität, Euphorie und Depressionen sind hier verankert. Alle Informationen, die im Langzeitgedächtnis gespeichert werden sollen, passieren zuerst einmal diesen Teil des Gehirns. Rationale Kognition und Gefühle treffen hier aufeinander.

Schlüsselemente dieses Bereichs sind der Hypothalamus und die Hypophyse. Obwohl er nur erbsengroß ist, steuert der Hypothalamus wichtige Funktionen wie Essen, Trinken, Schlafen, Wachen, Körpertemperatur und viele andere Funktionen. Dieser Regelmechanismus basiert auf einer Vielzahl von

elektrischen und chemischen Botschaften, mit denen der Hypothalamus die Hypophyse steuert.

#### *Das Großhirn*

Der größte Teil des menschlichen Gehirns ist das Großhirn. Dieser Hauptteil des Endhirns macht etwa 85 Prozent der gesamten Hirnmasse aus und besitzt eine hoch entwickelte äußere Schicht, die Großhirnrinde. In den Rindenfeldern des Großhirns befinden sich etwa die für die Körperbewegungen sowie für das Sprechen, Sehen und Hören verantwortlichen Zentren.

Unser Großhirn ist zudem Sitz von Bewusstsein, Willen, Intelligenz, Gedächtnis und Lernfähigkeit. Es besteht aus zwei stark gefurchten Halbkugeln, den Hemisphären, die durch einen tiefen Einschnitt voneinander getrennt sind. Die linke Hemisphäre steuert die rechte Körperseite und die rechte die linke. So werden Nervenzellen im linken motorischen Feld aktiviert, wenn die rechte Hand berührt wird. Beide Gehirnhälften sind über einen dicken Nervenstrang, den so genannten Balken, miteinander verbunden, tauschen also ständig Informationen aus. Die verschiedenen Aufgaben, die der Mensch zu lösen hat, sind ungleich auf die Hemisphären verteilt. Zeitgefühl und Sprachvermögen beispielsweise sitzen vorwiegend links, Musikalität und Rhythmusgefühl dagegen rechts. Auch die Verarbeitung von Informationen ist verschieden: Links verläuft sie überwiegend seriell, also in zeitlicher Folge, rechts parallel, also gleichzeitig. Ein Schaden in einer Gehirnhälfte führt zum Ausfall aller sensorischen und

motorischen Funktionen auf der gegenüberliegenden Körperseite. Dies ist oft nach einem Schlaganfall zu beobachten.

Bei den meisten Menschen ist die linke Gehirnhälfte dominant. Daher gibt es erheblich mehr Rechts- als Linkshänder, wobei aller Wahrscheinlichkeit nach aber auch kulturelle Aspekte eine Rolle spielen (vgl. Güntürkün, Literatur im Anhang).

#### *Die Cortex-Lappen*

In beiden Gehirnhälften ist der Cortex in vier Bereiche unterteilt, die so genannten Lappen. Von diesen ist der Stirnlappen in erster Linie für Planen, Entscheiden und zielgerichtetes Verhalten notwendig. Der Scheitellappen repräsentiert den Körper: Er empfängt die Sinnesinformationen. Ein Teil des Hinterhauptlappens ist für den Gesichtssinn verantwortlich und wird deshalb als Sehrinde bezeichnet. Dem Schläfenlappen scheinen mehrere wichtige Funktionen zuzufallen. Dazu zählen unter anderem das Hören, das Empfindungsbewusstsein und das Gedächtnis. Die Hirnrinde ist der Sitz der Sinneswahrnehmungen, deren Verbindungsstelle zum Bewegungsapparat und den intellektuellen Leistungen. Für den Menschen bedeutet sie das wichtigste Überlebensorgan, da sie so entscheidende Fähigkeiten wie Erkennen, Denken, Kombinieren, Erinnern ermöglicht – Voraussetzungen für das, was wir Lernen nennen. Hier spielt sich ein hochkompliziertes Wechselspiel von herein kommenden Informationen, ihrer Verarbeitung und Stapelung sowie der Befehlsübermittlung an die Bewegungsorgane ab.

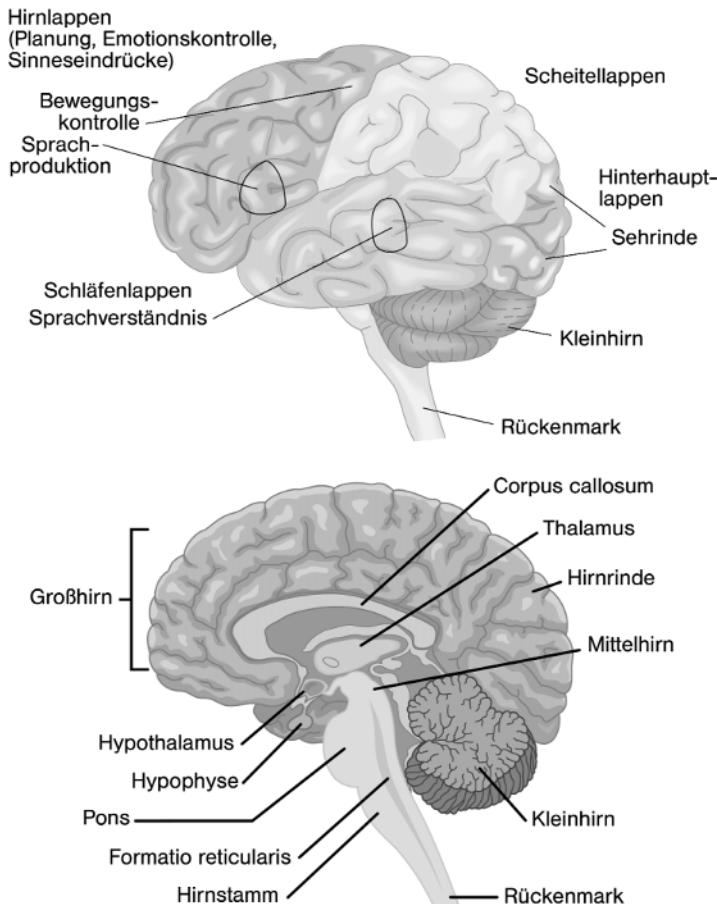


Abb. 3: Verschiedene Bereiche des Gehirns

### Vor dem Handeln bitte das Gehirn einschalten – Befehl verweigert, sagt das Rückenmark

»Das ging aber durch Mark und Bein!« Diese Redensart ist wesentlich vielschichtiger, als es zunächst erscheinen mag – vorausgesetzt, dass mit »Mark« auch tatsächlich das »Rückenmark« gemeint war. Denn zusammen mit unserem Gehirn repräsentiert das Rückenmark das zentrale Nervensystem, kurz ZNS. Dabei hat das Rückenmark die Funktion eines Kommunikationskabels. Mit seiner

Vor dem Handeln bitte das Gehirn einschalten – Befehl verweigert, sagt das Rückenmark

Hilfe ist es möglich, Nachrichten des Gehirns mit sehr hoher Geschwindigkeit an den Körper zu übermitteln. Zugleich regelt es aber auch selbstständig eine Reihe von Reflexen.

Dabei werden sicher manche Leser sogleich an den berühmten Kniesehnenreflex erinnert, den der Neurologe mit einem Schlag auf die Sehne unterhalb des Knies auslösen kann. Der Schlag verursacht eine kurze Muskeldehnung des Streckermuskels, die reflektorisch zu dessen Kontraktion führt. Manch einer, der den leichten Hammerschlag des Arztes bereits verspürt hat, wird sich fragen, wozu dieser Reflex eigentlich nützlich ist. Nun – Mutter Natur hat sich durchaus etwas dabei gedacht, denn ohne diesen Reflex würden wir bei aufrechter Haltung in den Kniegelenken dauernd einknicken. Für den Arzt oder Neurologen ist die Untersuchung des Kniesehnenreflexes wiederum von diagnostischer Bedeutung, da sein Fehlen auf eine ernsthafte Erkrankung des ZNS hindeuten kann.

»Vor dem Handeln bitte das Gehirn einschalten!« Zumindest für Reflexe gilt diese saloppe Redensart nicht. Vielmehr sind Reflexe quasi Sofortmaßnahmen, die vom Rückenmark unter sprichwörtlicher Umgehung des Gehirns unmittelbar in Handlungsweisen umgemünzt werden. Ein Beispiel liefert die Reaktion, wenn wir versehentlich eine heiße Herdplatte berühren und die Hand automatisch blitzschnell zurückzuckt, während sich Schmerz und Einsicht erst später melden. Dieser Rückziehreflex verläuft völlig unbewusst: Mit Hilfe von Rezeptoren in der Hand, Schaltneuronen im Rückenmark und motorischen Nervenzellen, die zum Oberarmbeuger führen, wurde das Schlimmste verhindert.

Im Schnittbild offenbart sich das Rückenmark als eine etwa fingerdicke runde Scheibe. In seinem Inneren befindet sich die so genannte graue Substanz, die entfernt an einen Schmetterling erinnert. Sie ist aus eng aneinander liegenden Nervenzellkörpern aufgebaut, und ihre äußere Hülle besteht aus einem »Mantel« von Nervenzellfasern, der so genannten weißen Substanz.

Je nach Körpergröße eines Menschen kann das Rückenmark bis zu etwa 45 Zentimeter lang sein, es bringt aber durchschnittlich nur 25 Gramm auf die Waage. Das Rückenmark beginnt am verlängerten Mark des Gehirns und verläuft im Wirbelkanal bis zur Höhe des zweiten Lendenwirbels. Dabei verlassen in regelmäßigen Abständen Nervenwurzelpaare rechts und links das Mark. Die hintere Nervenwurzel wird auch als sensibles Neuron bezeichnet. Sie leitet Impul-

se aus dem Körper zur grauen Substanz des Rückenmarks. Die vordere Nervenwurzel, das motorische Neuron, leitet dann aus dem Mark Impulse an die Muskeln des Körpers. Wenige Millimeter nachdem die Nervenwurzeln das Rückenmark verlassen haben, vereinigen sie sich zu den sogenannten Spinalnerven. Diese treten über das Zwischenwirbelloch aus dem Wirbelkanal in den Körper hinaus.

Im Hals- und Lendenwirbelbereich ist das Rückenmark wiederum stark verdickt. An diesen Stellen treten sehr viele Nervenfasern zur Versorgung der Arme und der Beine aus. Obwohl das Rückenmark in Höhe des zweiten Lendenwirbels aufhört, ziehen die Nervenfasern aus den unteren Bereichen des Rückenmarks im Wirbelkanal weiter nach unten. Sie sind zu einem dicken Faserbündel vereinigt, aus dem nach und nach einzelne Nervenfasern über die Zwischenwirbellöcher austreten. Das dicke Faserbündel erinnert im Aussehen an einen Pferdeschweif und hat deshalb die lateinische Bezeichnung »Cauda equina« erhalten.

### **Michaels Hirn – ein Supercomputer, von dem die Elektronikindustrie nur träumen kann**

Was geschah in Michaels Kopf, als er auf dem Flughafen auf Bianca wartete? Hunderte von Menschen, Restaurant, Check-in-Schalter, Anzeigetafeln, Lautsprecherdurchsagen – schlicht die gesamte Dynamik des Flughafenbetriebs – sorgten zunächst für eine wahre Informationslawine, die von seinen Augen aufgenommen wurde und zunächst über die Pupillen auf lichtempfindliche Nervenzellen gelangte, wo sie in elektrische Impulse verwandelt wurde. Von dort aus trafen die Informationen in der Sehrinde ein, wo eine eingehende und differenzierte Analyse stattfand. Noch während dieser Auslese rekonstruierte Michaels Sehrinde aus den elektrischen Impulsen wieder konkrete Informationen, die von dort aus in den Schläfenlappen übermittelt wurden, wo erstmals sein Gedächtnis eingeschaltet wurde.

Doch damit war die scheinbare Odyssee des Informationsflusses noch nicht beendet. Denn vom Schläfenlappen ausgehend gelangten die Informationen immer weiter in die Tiefen von Michaels Gehirn, zunächst zu den Strukturen des Vorderhirns. Dort fand eine weitere Filterung der Daten statt, bis die selektierte und bewertete

Information schließlich für die Weiterleitung an die gesamte Großhirnrinde freigegeben wurde. Erst durch dieses ständige Hin und Her Tausender von Detailinformationen in den »Schaltkreisen« von Michaels Gehirn wurde er in die Lage versetzt, aus dem Überangebot an Informationen seine eigene Welt quasi herauszukristallisieren und Bianca in der Menschenmenge zu orten. Parallel hierzu ermöglichte ihm der motorische Cortex seiner Großhirnrinde, die unverkennbaren Zeichen des Wiedererkennens (unter anderem die Freude in seinem Gesicht) sichtbar werden zu lassen.

### **Ist unser Gehirn ein natürlicher Parallelrechner?**

Das Gehirn ist also im Prinzip ein gigantisches Kabelnetzwerk von mehreren 100 000 Kilometern Länge. Wie in einem Stromkabel fließt auch entlang der Nervenbahnen Strom. Wird eine Nervenzelle durch einen ankommenden Reiz stimuliert, dann verändert sie innerhalb kürzester Zeit ihren Zustand: Entweder sie wird erregt oder sie wird gehemmt. Wenn eine Zelle erregt wird, dann werden in einer Art Kettenreaktion über Botenstoffe auch die nächsten und übernächsten Nervenzellen angeregt.

Prof. Dr. Ernst Pöppel vom Institut für Medizinische Psychologie an der Universität München vermutet, dass mit jeder Nervenzelle mindestens 10 000 andere Nervenzellen ständig in Kontakt stehen. Diese Kontaktaufnahme bedeutet wiederum, dass 10 000 Nervenzellen von einer Nervenzelle beeinflusst werden (Prinzip der Divergenz) und dass andererseits jede Nervenzelle von 10 000 Nervenzellen beeinflusst wird (Prinzip der Konvergenz). Diese Kontaktaufnahme, so Pöppel, könne erregend (Prinzip der Exzitation) oder hemmend (Prinzip der Inhibition) sein. Für Erregung und Hemmung sind unterschiedliche chemische Botenstoffe, sogenannte Transmitter, verantwortlich.

»Obwohl es sehr viele Nervenzellen im Gehirn gibt, sind seine Verarbeitungsmechanismen aber durch das »starke Gesetz der kleinen Zahl« gekennzeichnet, das sich in funktioneller Nähe von Nervenzellen äußert«, folgert Pöppel. Jede Nervenzelle sei nicht weiter als maximal vier Umschaltstationen von jeder anderen Nervenzelle im Gehirn entfernt. Diese strukturell bedingte funktionelle Nähe bedeute in der Sprache der Datenverarbeitung, dass das Gehirn durch

»massivste Parallelität« ausgezeichnet ist: Alles ist mit allem offenbar engstens verbunden.

Pöppel geht noch einen Schritt weiter und kommt zu dem weitreichenden Ergebnis, dass »sich eine Simulation menschlichen Denkens in weiter Ferne befindet.« Das liege daran, dass das Gehirn prinzipiell völlig anders aufgebaut sei als jeder Computer und sich auch die Verarbeitungsprinzipien grundsätzlich von Algorithmen und deren Implementierung als Programme in Computern unterschieden. Eine Simulation oder explizite Modellierung von menschlichem Denken, Wahrnehmen, Fühlen, Entscheiden, Erinnern oder Handeln liefere daher bislang eher Stoff für Science-Fiction-Autoren, so Pöppel.

Allein aus der Architektur des Gehirns leitet der Wissenschaftler die Feststellung ab, dass ein Wahrnehmen ohne ein gleichzeitiges Erinnern und gefühlsmäßiges Bewerten (oder umgekehrt ein Erinnern ohne ein gefühlsmäßiges Bewerten und Wahrnehmen) oder ein Gefühl ohne einen Erinnerungsbezug und eine wahrnehmungsmäßige Repräsentation nicht möglich ist.

Erst in der retrospektiven Reflexion würden wir vermeintlich unabhängige phänomenale Bereiche entdecken oder erfinden, indem wir Begriffe wie Wahrnehmung, Erinnerung oder Gefühl einsetzen. Im gegenwärtigen Vollzug des Erlebens und in der unmittelbaren Handlung gebe es diese Trennung nicht.

Ein weiterer Befund der modernen Neurowissenschaften verdient besondere Aufmerksamkeit wegen seiner potenziellen Bedeutung für andere Bereiche. So sind Neugeborene mit einem geradezu verschwenderischen Überangebot möglicher Verbindungen von Nervenzellen ausgestattet. Dieses genetisch vorgegebene Potenzial wird Experten wie Pöppel zufolge aber erst wirksam, wenn in den ersten Lebensjahren die zahlreichen Verbände von Nervenzellen und ihre genetisch angebotenen Verknüpfungen auch tatsächlich genutzt werden. Erst durch Gebrauch der lokalen Informationsverarbeitung wird das Potenzial zu einer Ressource, die langfristig verhaltenswirksam und lebensbestimmend wirkt.

Durch die funktionelle Betätigung der Verbindungen wird die definierte Struktur des Gehirns überhaupt erst festgelegt. Was nicht genutzt wird, das wird endgültig abgeschaltet. Das heißt, potenzielle Verbindungen zwischen Nervenzellen bleiben nicht das ganze Leben lang erhalten. Einfaches Lernen – zum Beispiel das Erlernen von

Fremdsprachen wie in der frühen Kindheit – ist später nicht mehr möglich, da die Lernprozesse dann in bereits festgelegten Hirnstrukturen ablaufen. So besitzt das Kleinkind eine ausgeprägte Begabung für die korrekte Phonetik sowie für das Auswendiglernen von Sprachmustern. Ab etwa dem zehnten Lebensjahr entwickeln sich die kognitiven Denkprozesse stärker, so dass das Erlernen einer Fremdsprache zunehmend über logische Zusammenhänge (Grammatik) erfolgt. Das Gehirn ist demnach kein passiver Filter, sondern konstruiert jeweils seine eigene Welt. »Das Gehirn verfügt auch über eine gestaltende Kraft«, untermauert Pöppel.

Ein Beleg hierfür sind die bekannten optischen Täuschungen durch doppeldeutige Figuren, bei denen man je nach Einstellung verschiedene Dinge sehen kann, etwa zwei Gesichter, die sich anschauen, oder eine Vase. Man kann nie beides gleichzeitig sehen, aber willentlich zwischen den beiden Sehweisen hin und her pendeln und sich so die gewünschte Alternative sichtbar machen.

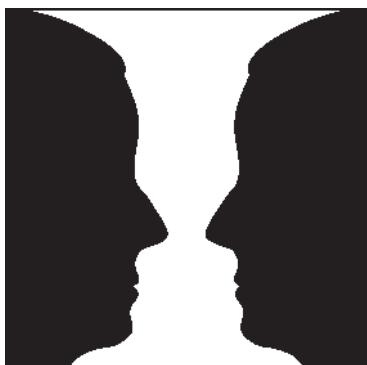


Abb. 4: optische Täuschung

### **Rechts? Links? Unser geteiltes Gehirn muss sich entscheiden**

Wie bereits erwähnt, repräsentiert das Großhirn den entwicklungsgeschichtlich jüngsten Teil des menschlichen Gehirns. In zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass es offensichtlich eine klare Arbeitsteilung zwischen den beiden Hälften gibt: Der linken Hemisphäre werden Funktionen wie logisches Denken, Sprache und analytisches Denken zugeschrieben, der rechten Musikalität, Kreativität und räumli-

ches Vorstellungsvermögen. Außerdem steuern beide Hälften jeweils die Bewegungen der anderen Körperseite.

»Aus dieser Funktionsteilung sind vielfach Forderungen nach einem Lernen laut geworden, das eine stärkere Beteiligung der rechten Großhirnrindenhälfte beinhalten soll«, erläutert Prof. Stangl. Es sei aber gezeigt worden, dass diese Forderungen kritisch zu betrachten seien, da die Hemisphären zwar tatsächlich spezialisiert, aber die Funktionsbereiche keineswegs klar getrennt sind.

In der Tat übernimmt auch die rechte Hemisphäre, die zum Beispiel über ein umfangreiches Lexikon verfügt, Aufgaben bei der Sprachbildung. Andererseits ist die linke Hälfte an der Verarbeitung von Musik beteiligt. Aus der Spezialisierung der Hemisphären eindeutige Schlussfolgerungen für das Lernen abzuleiten, ist daher ziemlich problematisch. Auch Untersuchungen zum Blutdurchfluss beim Empfang emotionaler Informationen bestätigen dies.

Lange rätselten die Forscher, weshalb die rechte Seite für die meisten Menschen die »Schokoladenseite« darstellt und die Natur sich im Laufe der Evolution für eine derartige Bevorzugung entschieden hat, obwohl man eigentlich eine 50:50-Verteilung erwarten sollte. Stangl zufolge zeigen bereits Ungeborene im Mutterleib eine deutliche Präferenz für die rechte Seite und auch bei Neugeborenen sei diese Bevorzugung zu beobachten. Im Alter von drei bis sechs Monaten verschwindet der Effekt jedoch. Da sich die Rechtsvorlieben des Arms, des Fußes, des Auges und des Ohrs erst viel später im Leben ausprägten, sei es bisher unklar geblieben, ob sie eine Folge der Tendenz seien, lieber zu einer bestimmten Seite zu schauen.

### **Beim Küssen dreht man den Kopf (vermutlich) nach rechts**

Die meisten Menschen bevorzugen das rechte Auge, das rechte Ohr, den rechten Fuß und die rechte Hand in einem Rechts:Links-Verhältnis von etwa 2:1. Auch Vögel bevorzugen das rechte Auge, so dass sie wie fast alle anderen Wirbeltiere schon als Embryo ihren Kopf am liebsten nach rechts drehen. Dadurch wird noch vor dem Schlupf hauptsächlich das rechte Auge durch Licht stimuliert. Bochumer Forscher haben herausgefunden, dass dieser Effekt das noch junge Vogelhirn asymmetrisch verändert und dass diese

Asymmetrie weitere Rechts/Links-Unterschiede in der Wahrnehmung und in kognitiven Prozessen bedingt.

Der Nachweis der Vorliebe von Erwachsenen für die rechte Seite setzt voraus, dass man die Menschen in einer Situation beobachtet, in der sie sich spontan und ohne jeden Druck von außen entscheiden, den Kopf zu einer Seite zu drehen. Der Biopsychologe Prof. Dr. Dr. h.c. Onur Güntürkün von der Ruhr-Universität in Bochum wollte es genauer wissen und begab sich im Dienste von Forschung und Wissenschaft in die Rolle eines Voyeurs.

»Mir kam die Idee, Paare beim Küssen zu beobachten«, erläutert Güntürkün. Gesagt, getan: Zweiwölf Jahre lang nutzte der Bochumer Wissenschaftler Wartezeiten an Flughäfen und Bahnhöfen, Aufenthalte am Strand und in Parks in Deutschland, den USA und der Türkei, um Daten für seine Studie zu sammeln. In dieser Zeit wertete er 124 Küsse von Paaren zwischen ca. 13 und 70 Jahren aus, wobei für jedes Paar nur ein Kuss und bei mehreren Küssem nur der erste zählte. Um sich für die Auswertung zu qualifizieren, musste ein Kuss vier Kriterien genügen:

- Es musste Lippenkontakt geben,
- die Küssenden mussten sich gegenüberstehen,
- keiner durfte etwas in der Hand halten (denn das könnte eine Seitenvorliebe hervorrufen) und
- es musste eine eindeutige Kopfbewegung zu beobachten sein.

Das Ergebnis zeigte, dass 80 der 124 Küsse mit nach rechts gedrehten Köpfen stattfanden. Daraus schloss Güntürkün, dass der »Rechtsdrall« des Kopfes erhalten bleibt und somit auch die ande-

---

#### **Deutsche küssen gut, aber zu selten**

Wenn es ums Küssen geht, sind sich

Männer und Frauen offenbar einig: Einer Meldung der Nachrichtenagentur Associated Press zufolge sind 65 Prozent der Deutschen der Meinung, sie würden zu selten geküsst. Die Zahl basiert auf einer aktuellen Umfrage des Meinungsforschungsinstituts Gewis, das im Auftrag der Hamburger Frauenzeitschrift »Laura« insgesamt 1026 Frauen und

Männer zwischen 20 und 45 Jahren befragte.

Wenn es dann aber doch geschieht, sind wiederum 68 Prozent der Deutschen mit den Küssem des oder der Ausgewählten sehr zufrieden. So finden 71 Prozent der Frauen, dass ihr Partner gut küsst. Männer sind offenbar etwas anspruchsvoller, denn von ihnen fühlen sich nur 66 Prozent von ihrer Liebsten richtig geküsst, meldet die Agentur.

ren Asymmetrien der Wahrnehmung und der Handlung nach sich zieht.

»Unfälle« zwischen Rechts- und Links-Küssern hat der Professor der Universität Bochum bei seinen Studien nicht erlebt. »Ich nehme an, dass die beobachteten Paare sich nicht zum ersten Mal küssten und sich schon aufeinander eingestellt hatten«, berichtet Güntürkün. Ein Kuss auf die Lippen sei bei Paaren, die sich gegenüberstehen, eben nur dann möglich, wenn beide den Kopf in die gleiche Richtung neigen.

Interessant bleibt die Frage, weshalb der Unterschied zwischen Rechts- und Linkshändern mit einem Verhältnis von 8:1 wesentlich ausgeprägter ist. Güntürkün vermutet, dass neben genetischen Unterschieden auch andere Ursachen für diese Ungleichheit verantwortlich sind. »Vermutlich sind diese kultureller Natur«, sagt Güntürkün. Immerhin »erziehe« man Kinder regelrecht zu Rechts-händern.

---

#### **Entscheidungen im Gehirn werden sichtbar: Jülicher Forscher zeigen, wie Gehirnhälften miteinander kommunizieren**

Wo im Gehirn wird kontrolliert, ob die linke oder rechte Hirnhälfte eine Arbeit erledigen soll? Wo wird festgelegt, welche Hirnregionen eine Aufgabe lösen?

Zum ersten Mal konnte der Hirnforscher Prof. Dr. med. Gereon Fink vom Forschungszentrum Jülich und der Neurologischen Klinik des Universitätsklinikums Aachen jetzt diesen Entscheidungsprozess beobachten.

In einem Beitrag für das Wissenschaftsmagazin »Science« (Bd. 301, S. 384, 2003) berichtet Fink gemeinsam mit Kollegen des Forschungszentrums Jülich sowie der Universitäten Düsseldorf, London und Oxford: Eine Struktur im Stirnhirn weist den Hirnhälften die Arbeit zu. Ihre Forschungsergebnisse, so hoffen die Wissenschaftler, werden Patienten helfen, bei denen beispielsweise durch einen Schlaganfall eine Hirnhälfte geschädigt ist.

Nicht der Augenschein zählt, sondern der Auftrag: Was in unserem Gehirn ge-

schieht, wenn wir einen Reiz verarbeiten, hängt vor allem davon ab, was wir mit dieser Information anfangen sollen. So kann der Anblick desselben Wortes mal die rechte, mal die linke Hirnhälfte aktivieren, je nachdem, ob es eine sprachliche Aufgabe zu bewältigen gilt oder ein Problem der räumlichen Wahrnehmung. Das menschliche Gehirn, das äußerlich aus zwei fast spiegelgleichen Hälften besteht, ist asymmetrisch organisiert. Das Sprachvermögen ist gemeinhin links zu Hause, räumliche Fähigkeiten dagegen rechts. Wie aber wird die Arbeit im Hirn eingeteilt? Finks Arbeitsgruppe fand jetzt heraus, wie beide Hirnhälften den Umgang miteinander regeln.

Die Hirnforscher baten Versuchspersonen, kurze Hauptwörter zu betrachten, in denen ein Buchstabe rot gefärbt war. Nun erhielten die Teilnehmer unterschiedliche Aufträge: Einmal sollten sie angeben, ob das jeweils gezeigte Wort den Buchstaben A enthielt – eine sprachliche Aufgabe also. Ein andermal wurden die Teilnehmer gefragt, ob der rote Buchstabe rechts oder links der Wortmitte stand – hier war die räumliche Wahrneh-

mung gefordert. Währenddessen beobachteten die Wissenschaftler, welche Bereiche des Gehirns jeweils besonders aktiv waren. Dafür nutzten sie die funktionelle Magnetresonanz-Tomographie (fMRT). Dieses Verfahren misst, wie gut das Hirngewebe mit Sauerstoff versorgt wird, und macht damit diejenigen Bereiche des Hirns sichtbar, die gerade intensiv arbeiten. Wurde nach dem Buchstaben A gefragt, waren ausschließlich Areale in der linken Hirnhälfte mit der Lösung der Aufgabe beschäftigt, darunter auch die so genannte Broca-Region. Ihre Rolle bei der Sprachverarbeitung ist seit langem bekannt. Galt es dagegen, die Position des roten Buchstabens richtig einzuordnen, löste dasselbe Wort nur in der rechten Hirnhälfte, speziell im Scheitellappen, Aktivitäten aus.

Die Hirnforscher begnügten sich nicht damit, diese Arbeitsteilung zu beobachten. Sie wollten vor allem wissen, wie das Gehirn die Arbeit der linken oder der rechten Hirnhälfte zuweist. Für diese Managementaufgabe wird eine Kontrollzentrale im Gehirn benötigt, die die Forscher ebenfalls mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanz-Tomographie aufspürten. Es zeigte sich: Ein Bereich des Stirnhirns, vorderer cingulärer Cortex (anterior cingular cortex, ACC) genannt, entscheidet darüber, ob die linke oder die rechte Hirnhälfte aktiv wird. Dr. Klaas Stephan vom Institut für Medizin des Forschungszentrums Jülich führt aus: »Der linke Teil des ACC arbeitete immer intensiver mit der Sprachregion der lin-

ken Hirnhälfte zusammen, während die Entscheidung zugunsten der Buchstabenerkennung fiel. Im anderen Fall nahm der Einfluss des rechten ACC auf den Scheitellappen der rechten Hirnhälfte zu.«

Damit konnten die Forscher zum ersten Mal direkt verfolgen, wie die verschiedenen Regionen des Gehirns miteinander kommunizieren, während sie ein Problem beurteilen und die zuständigen »Sachbearbeiter« ermitteln. »Wir sehen auf diese Weise, wie sich die verschiedenen beteiligten Hirnregionen miteinander unterhalten und wie sich das ‚Gespräch‘ verändert, wenn die Aufgabe wechselt«, erläutert Gereon Fink.

Solche Erkenntnisse helfen auch zu verstehen, was im Gehirn von Menschen vorgeht, bei denen, etwa als Folge eines Schlaganfalls, diese Kontrollmechanismen gestört sind. So können Schäden im rechten Scheitellappen dazu führen, dass Patienten eine Hälfte der Welt ignorieren. Sie sehen sie zwar, beachten sie aber nicht – Wissenschaftler sprechen vom »Neglect«.

Manche Patienten mit Schlaganfällen in der linken Hirnhälfte können dagegen Sprache nicht mehr richtig verstehen – ein Krankheitsbild, das als »Aphasie« bezeichnet wird. In beiden Fällen ist die Verständigung zwischen verschiedenen Hirnregionen beeinträchtigt. Die Jülicher Forscher können nun diese Probleme im Management des Gehirns genauer nachvollziehen – eine Voraussetzung dafür, künftig bessere Therapien zu entwickeln.

## Die Gedanken sind frei, doch Wissenschaftler können sie messen

Verliebte Paare wie Bianca und Michael ertappen sich gelegentlich dabei, dass sie spontan den gleichen Gedanken haben. »Du nimmst mir das Wort aus dem Mund« ist eine häufig verwendete Redensart, bei der sich das Pärchen in der Regel verwundert an-

schaut. Mal ehrlich – ist Ihnen Vergleichbares nicht auch schon passiert?

Handelt es sich dabei um simple Zufälle aufgrund nahe liegender Gedankenabläufe? Oder sind geheimnisvolle »Psi-Phänomene« am Wirken, die gelegentlich für eine flüchtige Gleichschaltung der Gedanken sorgen? Die Autoren möchten an dieser Stelle nicht weiter darüber spekulieren. Das Risiko, dieses Buch beim Händler unter der Rubrik »Esoterik« wiederzufinden, wäre uns doch zu groß!

Vielmehr möchten wir der brennenden Frage nachgehen, ob und inwieweit sich Prozesse im Gehirn mit den Methoden der modernen Wissenschaft nachweisen und messen lassen. Zuvor ist es jedoch erforderlich, in Anlehnung an die bisherigen Ausführungen einen erweiterten Blick auf die neuronale Architektur des Gehirns zu werfen.

Die Nervenzellen des Gehirns ähneln in vielerlei Hinsicht den anderen Zellen des menschlichen Körpers. Das heißt, jede Gehirnzelle verfügt über einen Kern mit der DNA und einer Zellmembran, welche die ganze Zelle umschließt, sowie den auch als Mitochondrien bezeichneten »Energiezentralen« der Zelle und anderen zellulären Substrukturen. Der wichtigste Unterschied der Nervenzellen im Vergleich zu herkömmlichen Zellen besteht nun darin, dass Erstere sich nach dem Abschluss der embryonalen Entwicklung nicht mehr teilen. Mit anderen Worten: Der bis zur Geburt entstandene Vorrat an Nervenzellen muss ein Leben lang reichen!

Der zweite wesentliche Unterschied basiert auf der Fähigkeit zur Informationsübertragung, die mittels langer Fasern, die aus dem Zellkörper herauswachsen, realisiert wird. Nur eine von diesen Fasern aber – das so genannte Axon (abgeleitet vom griechischen Wort für »Achse«) – ist in der Lage, Informationen an andere Zellen zu übermitteln. Alle anderen Fasern, die vom Körper der Nervenzelle ausgehen, sind Dendriten (von griech. »Baum«). Sie haben die Aufgabe, Informationen von den Axonen anderer Nervenzellen entgegenzunehmen. Während das Axon einer Nervenzelle eine respektable Länge von einem Meter erreichen kann, sind die Dendriten sehr kurz und erreichen nur in seltenen Fällen eine Länge von einem Millimeter.

Die von den Axonen ausgehenden Impulse werden infolge einer Ausschüttung chemischer Substanzen über die Schaltstellen (Synapsen) an die Dendriten und von dort aus im Durchschnitt zu 1000

(bis zu 6000) anderen Neuronen weitergeleitet. Diese Neuronen sind untereinander zu lokalen Schaltkreisen in den einzelnen Regionen der Hirnrinde verknüpft und bilden damit die unterste Ebene der neuronalen Architektur. Je nach der Aufgabe, die sie zu erfüllen haben, bilden sich gänzlich unterschiedliche Verknüpfungsstrukturen aus.

### **Ein Formel-1-Rennwagen in Michaels Gehirn**

Welche Kraft löst nun die Impulse aus? Was passiert physikalisch-chemisch in den Gehirnzellen? Zur Beantwortung dieser Fragen wollen wir das Axon noch etwas genauer unter die Lupe nehmen. Wir können es uns vereinfacht als eine lange, dünne Röhre vorstellen, die von der Membran der Nervenzelle umschlossen ist. Innerhalb der Membran befindet sich die innere Substanz des Axons, außerhalb der Membran die extrazelluläre Gewebsflüssigkeit.

»Innere Substanz und äußere Flüssigkeit verfügen nun über sehr unterschiedliche chemische Zusammensetzungen«, erläutert der amerikanische Humanbiologe Prof. Dr. Robert Ornstein und Präsident des Institute for the Study of Human Knowledge im kalifornischen Los Altos. Die Substanz im Inneren enthalte in der Regel sehr viele Proteinmoleküle und sehr wenig Natrium. Die äußere Flüssigkeit sei im Gegensatz dazu arm an Proteinen, verfüge aber über einen hohen Gehalt an Natrium. Als wichtigstes Ereignis beim Nervenimpuls bezeichnet Ornstein die Bewegung von Natriumionen durch die Zellwand von außen nach innen. Dabei dringen die Ionen durch Kanäle ein, die man sich wie eingestülpte Röhren in der Zellmembran vorstellen muss. Diese Kanäle sind normalerweise geschlossen, doch wenn der Nervenimpuls entsteht, springen sie kurzzeitig auf und lassen Natrium ein.

Die Geschwindigkeiten, mit denen elektrische Impulse im Gehirn weitergeleitet werden, sprengen das menschliche Vorstellungsvermögen: So rasen die Impulse mit sage und schreibe der Höchstgeschwindigkeit eines Formel-1-Rennwagens – rund 350 Kilometer pro Stunde – von Zelle zu Zelle. Um dies zu realisieren, müssen innerhalb einer tausendstel Sekunde viele tausend Ionen durch einen Kanal schießen. Wenn Sie, verehrte Leserinnen und Leser, gerade eine Buchseite umgeschlagen haben, dann haben sich nur um

diese einfache Bewegung der Armmuskeln auszuführen in Ihrem Gehirn gerade rund zwei Milliarden Ionenkanäle geöffnet und wieder geschlossen. Wenn wir nun davon ausgehen, dass Michael Bianca beim Wiedersehen deutlich fester in seine Arme geschlossen hat, dürfte die Anzahl beteiligter Ionenkanäle noch viel höher liegen haben.

## Die Zelle als Chemiereaktor

Rein technisch betrachtet muss man sich jede Zelle im Prinzip wie einen Reaktor vorstellen. Die »Wandfläche« dieses Reaktors besteht aus der bereits erwähnten Membran, die das Zellinnere von der Umgebung trennt. Auf diese Weise ist die Zelle in der Lage, eine Vielzahl von Bedingungen für eine nicht minder große Vielzahl biochemischer Reaktionen zu schaffen und für einen konstanten Ablauf dieser Reaktionen zu sorgen.

Die Zellen sind jedoch etwas komplizierter aufgebaut, als es dieses einfache Bild zunächst vermuten lässt, denn auch innerhalb der Zelle gibt es von Membranen eingeschlossene Bereiche. Diese übernehmen durchaus wichtige Rollen, unter anderem in der Energieerzeugung, aber auch bei der Synthese oder dem Abbau von Membranproteinen. Über diese Membranen finden Stofftransport und Signalübertragung statt – allesamt Aufgaben, die von spezialisierten Proteinen, die in die Membran eingebaut sind, wahrgenommen werden. Auch die bereits erwähnten Ionenkanäle sind nichts anderes als spezialisierte Proteine, die für den spezifischen Transport von Ionen, wie beispielsweise Natrium- oder Chloridionen, zuständig sind.

Ionenkanäle werden häufig nach den Ionenarten klassifiziert, die sie durchlassen, so dass man zum Beispiel Kalium-, Natrium- und Chloridkanäle unterscheidet. Als wässrige Poren innerhalb der Membran erlauben sie einen passiven Transport durch Diffusion. Da die Transportraten der elektrisch geladenen Ionen recht hoch sind, fließt auch ein beträchtlicher elektrischer Strom. Diese Ströme sind die Grundlage für die elektrische Datenverarbeitung im Nervensystem und in den Muskeln. Wie hoch sie im Extremfall sein können, zeigen Zitteraale und bestimmte Rochenarten, die mit ihrem elektrischen Organ Fische betäuben können. Prof. Dr. Dr. Tho-

mas Jentsch vom Zentrum für Molekulare Neurobiologie der Universität Hamburg konnte in seinen wissenschaftlichen Arbeiten zeigen, dass diese Tiere in ihrem elektrischen Organ große Mengen von Chloridionenkanälen enthalten.

Nicht minder wichtig ist natürlich auch der in den Ionenkanälen ablaufende Stofftransport. So werden Ionenkonzentrationen in den dafür vorgesehenen Zellbereichen eingestellt; Ionentransporte durch die Membranen in Zellen von Körperfrequenzflächen, den Epithelien, sind verantwortlich für den Salz- und Wassertransport zu lebenswichtigen Organen – angefangen vom Darm über Leber und Nieren bis hin zum Gehirn.

### **Die erste Begegnung mit Bianca: Michaels Ionenkanäle »erinnern« sich**

Auch beim Abspeichern von Erinnerungen spielen Ionenkanäle eine wichtige Rolle. Sie können sich nämlich durch einen Reiz bleibend verändern und die Information fixieren. »Diese Erkenntnis haben Wissenschaftler aus Versuchen mit der gehäuselosen und fünf bis zehn Pfund schweren Meeresschnecke Aplysia gezogen, deren Zentralnervensystem aus nur rund zwanzigtausend Nervenzellen besteht«, schreibt die Biologin Gaby Miketta in ihrem Buch »Netzwerk Mensch« (vgl. Lit. im Anhang). Treffe ein schmerzhafter Reiz, wie etwa ein Wasserstrahl, den Kopf der Schnecke, ziehe das Tier sofort die Kiemen in die Mantelhöhle ein und schütze sich so vor der vermuteten Gefahr. Nach ungefähr zehn Berührungsreizen lasse sich dieser Reflex etwa eine Stunde lang nicht mehr auslösen. Fazit: Aplysia hat sich an den Reiz gewöhnt und diese Information im Gedächtnis gespeichert.

Beim Menschen herrscht natürlich ein sehr viel komplexeres Zusammenspiel von Erinnerungsvermögen und den daran beteiligten Ionenkanälen. Inzwischen weiß man, dass offensichtlich eine genaue Abfolge von molekularen Veränderungen an Nervenzellen ablaufen muss, damit wir uns an ein Ereignis, eine Melodie, einen Geruch, einen Geschmack oder an eine zärtliche Berührung erinnern können. Die einzigartige Fähigkeit des Gehirns versetzt uns erst in die Lage, »bewusst« zu leben, auf Erfahrungen basierende Hand-

lungsweisen vorzunehmen und im Laufe des Lebens (hoffentlich) reifer zu werden.

Zugleich sind diese Erinnerungen aber auch mit Gefühlen besetzt: Wenn sich beispielsweise Michael an seine erste Begegnung mit Bianca erinnert, werden wie in einer Art Zeitreise seine Gefühle von damals wieder lebendig. Eine bestimmte Melodie – völlig gleichgültig, ob es sich um klassische Musik oder Popmusik handelt – kann wiederum als Eselsbrücke dienen und ebenfalls Erinnerungen und Gefühle auslösen.

### Michael hat Bianca geortet: Die »Chemie des Augenblicks«

Man kann ohne Übertreibung sagen, dass Ionenkanäle für Zellen die »Tore zur Welt« darstellen: Von chemischen oder elektrischen Signalen gesteuert öffnen und schließen sich ihre Ventile wie Schleusentore, lassen äußere Reize auf Sinneszellen einwirken und starten Kaskaden von Reaktionen. Das trifft auch für Michaels Augen zu, die Bianca sofort in der Menschenmenge geortet haben. Lassen Sie uns daher im Folgenden die Chemie des Sehvorgangs ein wenig näher unter die Lupe nehmen.

Wie jedes normal entwickelte menschliche Auge enthält auch Michaels unterschiedliche Sehzellen: Drei Typen von Sehzapfen reagieren auf einen jeweils anderen Bereich des Lichtspektrums besonders empfindlich und ermöglichen auf diese Art und Weise das Farbsehen. Allerdings ist dieser Vorgang nur für das Sehen bei aus-

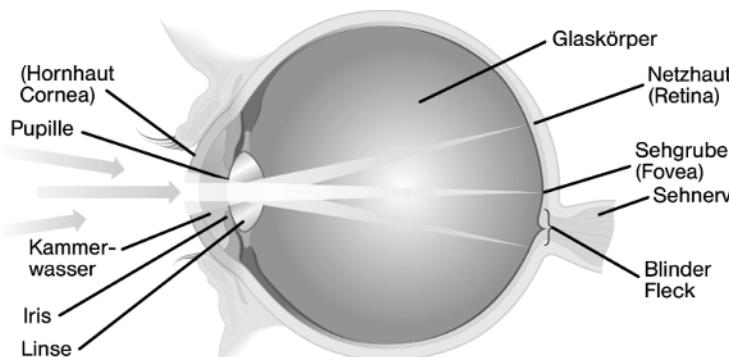


Abb. 5: Menschliches Auge

reichender Beleuchtung – also am Tage – geeignet. In der Dämmerung hingegen übernehmen die etwa 100-mal empfindlicheren Sehstäbchen die Arbeit, die allerdings nur ein schwarz-weißes Bild liefern können. »Nachts sind alle Katzen grau«, heißt es im Volksmund.

Im Dunkeln fließen positiv geladene Natriumionen durch Ionenkanäle in die Sehzelle – das ist der so genannte Dunkelstrom. Bei Belichtung schließen sich diese Tore jedoch sofort wieder. Dadurch verändert sich die Verteilung der Ionen zwischen dem Inneren und dem Äußeren der Zelle, was wiederum an der Zellmembran ein elektrisches Signal auslöst.

Prof. Benjamin Kaupp, Direktor des Instituts für Biologische Informationsverarbeitung (IBI) im Forschungszentrum Jülich, beschreibt die Funktion der Sehstäbchen wie folgt: »Diese sind so empfindlich, dass schon ein Lichtquant ausreicht, ihre Ionenkanäle zu schließen. Dazu wird das Lichtsignal durch eine Kaskade biochemischer Reaktionen unter hohem Energieaufwand um mehr als das Zehntausendfache verstärkt. Licht bewirkt zunächst eine Umlagerung im Sehfarbstoff Rhodopsin. Das veränderte Rhodopsin aktiviert viele »Transducin« genannte Moleküle, die wiederum ein Enzym – die Phosphodiesterase – veranlassen, einen spezifischen Botenstoff, das cyclo-Guanosin-Monophosphat (cGMP) abzubauen. Sobald dieser Botenstoff nicht mehr in ausreichender Menge vorhanden ist, schließen sich die Natrium-Kanäle. Der Dunkelstrom wird unterbrochen – die Zelle meldet Licht!«

Zusammen mit seinen Mitarbeitern hat Kaupp nach einer Antwort auf die Frage gesucht, auf welche Weise die Natur bei guten Lichtverhältnissen eine Energieverschwendungen in den Stäbchen vermeidet. Dabei stießen sie auf Eiweißmoleküle, die den Baustein Glutaminsäure in hoher Konzentration enthalten. Glutaminsäure gehört zwar nicht zu den essenziellen Aminosäuren, dennoch ist sie als Proteine bildende Aminosäure in der Natur weit verbreitet und spielt auch im Stoffwechsel eine wichtige Rolle.

Genau diese Eiweißmoleküle (glutamic acid rich proteins), der Einfachheit halber abgekürzt als »GARP«, scheinen bei der Chemie des Sehvorgangs eine herausragende Rolle zu spielen. Wie Kaupp nämlich herausfand, heftet sich das rätselhafte GARP-Molekül wie eine Klette an die Phosphodiesterase und hemmt somit deren Akti-

vität. Darüber hinaus koppelt es an ein weiteres Enzym, das den Botenstoff cGMP wieder aufbaut.

»Dadurch wird ein Kreislauf in Gang gesetzt«, erläutert Kaupp. Als »Türsteher« und »reitender Bote« pendelt das GARP-Molekül zwischen der äußeren Zellmembran und den inneren Membransta- peln hin und her. Der Wissenschaftler geht davon aus, einen wichtigen Einblick in eine bis dato unbekannte Chemie gewonnen zu haben. Seine Hypothese: »Vermutlich hält GARP bei Tageslicht alle Mitspieler in den Stäbchenzellen so lange in Schach, bis die Sehstäbchen bei zunehmender Dämmerung benötigt werden. Ist es dunkel, dann fällt der Energie sparende Komplex wieder auseinander.«

### Ein Lügendetektor für Verliebte?

Mit einer neuen und hochsensiblen Methode zur Verarbeitung bioelektrischer Signale erzielten zwei Hamburger Wissenschaftler einen wichtigen Etappensieg. Die Ergebnisse wurden erstmals im Frühjahr 2001 auf einer Fachtagung des VDE in Dresden vorgestellt.

Das hätte sich Stanley Kubrick wohl niemals träumen lassen: Als am 3. April 1968 in New York die Uraufführung seines Science-Fiction-Opus »2001 – Odyssee im Weltraum« stattfand, konnte er nicht ahnen, dass Teile des aufwändig inszenierten Filmspektakels ausgerechnet im Jahre 2001 einmal von der Realität eingeholt werden könnten. Zu verdanken hat er dies zwei Hamburger Wissenschaftlern, Dr. Dietmar Schröder und Dipl. Ing. Bernhard Fuchs von der TU Hamburg-Harburg. Diese interessieren sich weniger für die Geheimnisse des Jupiter als für das Innenleben des heimlichen Hauptdarstellers des Films. Verkörpert wurde dieser durch den genialen Computer »Hal«, der eine physische und gedankliche Verbindung zur Besatzung eines Raumschiffs auf dem Weg zum Jupiter unterhielt.

Auch wenn Schröder und Fuchs bis zur Drucklegung des vorliegenden Buches noch nicht mit einem Prototypen

von »Hal« aufwarten können, haben sie dennoch einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg dorthin genommen. »Es ist uns gelungen, in der Verarbeitung von bioelektrischen Signalen wesentliche Fortschritte zu erzielen«, beschreibt Schröder den Kern der Innovation. Zwar sind so genannte Biocontroller, die an Stelle von Maus, Joystick oder Tastatur vom Körper produzierte bioelektrische Signale als Eingabe akzeptieren, seit kurzem auf dem Markt; sie beschränken sich aber in der Regel mehr auf die relativ einfache Erkennung von Augenbewegungen oder Muskelkontraktionen.

Das Harburger Duo hat indessen ein neues und wesentlich sensibleres Schaltungskonzept entwickelt. Durch einen technischen Kunstgriff können nunmehr typische bioelektrische Signale wie Gehirnwellen und Herzrhythmen wesentlich effizienter und empfindlicher als je zuvor verarbeitet werden. Hinter der Erfindung verbirgt sich zugleich ein Meilenstein für die gesamte Telemedizin, deren »Flaschenhals« bisher darin bestand, dass den äußerst limitierten Ressourcen des mobilen Teils der Messgeräte die geballte Leistung und Rechenkapazität des stationären Teils gegenüberstanden. Als erste Anwendungsmöglichkeit sehen die Harburger daher Geräte zur Aufnahme und

Übertragung bioelektrischer Signale wie etwa des Elektrokardiogramms in Form miniaturisierter tragbarer Einheiten.

»Das Verfahren eignet sich aber auch zur Verarbeitung einer Vielzahl weiterer bioelektrischer Signale«, verdeutlicht Schröder. Dazu gehört zum Beispiel die Detektion extrem schwacher Signale, wie sie im Zusammenhang mit Stoffwechselvorgängen im Körper auftreten. Auch Zustände wie »Verliebtsein« oder »Liebeskummer« sollten sich an der Ausschüttung spezifischer Hormone detektieren lassen. Dennoch denken Schröder und Fuchs nicht daran, landesweit Standesämter mit dem Gerät auszustatten, um Heiratswillige nach dem Vorbild eines Lügendetektors vor der Erteilung des Ja- worts auf Herz und Nieren zu checken oder gar die eheliche Treue unter die wissenschaftliche Lupe zu nehmen.

Denn zum Glück kann das System – im Gegensatz zu »Hal« – Gedanken und

Gefühle noch nicht im Detail erkennen. Dennoch sind laut Fuchs und Schröder die unmittelbaren Zukunftsaussichten kaum weniger spektakulär. Denn mit Hilfe mikroskopisch kleiner Sensoren, die Daten über Körpertemperatur, Pulsfrequenz, Blutdruck und andere charakteristische Werte erfassen, kann beispielsweise der Gesundheitszustand eines Patienten online kontrolliert werden. Es ist sogar denkbar, dass bereits in naher Zukunft bestimmte Gruppen von Patienten in den eigenen vier Wänden überwacht und die gewonnenen Daten zunächst an den Hausarzt und von dort gegebenenfalls zur Ferndiagnose an spezialisierte Zentren weitergegeben werden.

Aktualisierte Fassung eines in den VDI-Nachrichten erschienen Artikels von R. Froböse (vgl. Literatur im Anhang).

## **Michaels und Biancas Emotionen finden vorwiegend in der vorderen rechten Hirnhälfte statt**

Nach Auffassung des österreichischen Psychologen Prof. Dr. Werner Stangl gibt es solche spezifischen Funktionssysteme für sämtliche Sinnesorgane zur Auswertung von Empfindungen und für Organe, deren Motorik vom Gehirn gesteuert werden kann. »Das gilt auch für alle lebenswichtigen Funktionen, die unbewusst gesteuert werden«, ergänzt der Wissenschaftler. Ferner gebe es Regionen für Sprache und Begriffsverarbeitung, für das logisch-rationale Denken und ein davon völlig autonomes System für die Entscheidungsfindung. Das Letztere sei stark korreliert mit der Fähigkeit zur Emotionsverarbeitung und der Verarbeitung von körpereigenen Empfindungen sowie dem Sozialverhalten und befindet sich meist in der vorderen rechten Hirnhälfte.

So unglaublich es klingen mag: Es ist heute bereits möglich, ein grobes Abbild des Informationsflusses im Gehirn zu visualisieren.

»Wir wissen heute, dass Gehirnzellen quasi im Takt feuern«, verdeutlicht Dr. Peter Tass vom Institut für Medizin (IME) des For-

schungszentrums Jülich. Gemeinsam mit seinen Mitarbeitern ist es ihm gelungen, aus unzähligen aus dem Gehirn stammenden Signalen die interessantesten Muster neuronaler Aktivität zu erkennen.

Seinen Angaben zufolge beruht beispielsweise das Erkennen von Bildern auf einer synchronen neuronalen Aktivität der verschiedenen beteiligten Gehirnbereiche. »Synchronisation neuronaler Aktivität ist ein fundamentaler Mechanismus der Informationsverarbeitung«, erklärt Tass. Ohne kurzzeitige Kopplungen innerhalb einer Nervenzellgruppe oder zwischen Neuronen unterschiedlicher Gehirngebiete gebe es keinen Informationsaustausch und damit auch keine kognitiven Prozesse wie Lernen oder Erinnerung.

Anders ausgedrückt: Wenn Michaels Gehirn ungeachtet des quirlichen Flughafen-Ambiente eine eigene individuelle Welt entstehen lässt, ist der »Gleichschritt« der Neuronen hierfür eine wichtige Voraussetzung.

Synchronisation spielt aber auch bei vielen Krankheitsbildern eine Rolle, führt Tass weiter aus. So sei das unwillkürlich auftretende Zittern, medizinisch korrekt »Tremor« genannt, bei Parkinson-Patienten eine Folge synchroner neuronaler Aktivität. Auch die Bewegungsstörungen, unter denen Dystonie-Patienten leiden, fallen dem Wissenschaftler zufolge in diese Kategorie.

### »Tintenfische« aus Niob als Kompass unserer Gedanken

Schlüssel zum Erfolg waren für Tass und seine Mitarbeiter sogenannte »Squids«: Hinter dem Kürzel verbergen sich nicht etwa Tintenfische, sondern vielmehr auch als **Superconducting Quantum Interference Devices** (supraleitende Quanteninterferenzdetektoren) bezeichnete Wortpolypen. Bei dem Zungenbrecher handelt es sich um ein neuartiges Sensorsystem, welches wiederum zum Nachweis der durch geringe Ströme erzeugten extrem schwachen Magnetfelder dient. Ausschlaggebend für die Entwicklung solcher Systeme war der Gedanke, nicht die elektrischen Ströme, sondern vielmehr die gleichzeitig auftretenden äußerst schwachen Magnetfelder, die mit der Weiterleitung von Informationen im Gehirn einher gehen, zu messen.

Eine supraleitende Legierung des als Stahlveredler bekannten Metalls Niob, durch flüssiges Helium auf eisige  $-269^{\circ}\text{C}$  gekühlt,

bildete das Herz des sensiblen Squid-Kompasses. Dieser nimmt Signale wahr, die nur ein Millionstel des Erdmagnetfelds betragen.

Das aus solchen Messungen resultierende Magnetenzephalogramm (MEG) unterscheidet sich vom »klassischen« Elektroenzephalogramm (EEG), welches die elektrischen Potenziale von der Schädeloberfläche ableitet, insbesondere durch eine bessere räumliche Auflösung: Da die Magnetfelder die Schädeldecke ohne Richtungsänderung passieren, lassen sich die Orte rhythmischer Aktivität auf bis zu fünf Millimeter genau lokalisieren.

Um Störungen durch Herzschlag und Augenbewegungen auszuschließen, werden parallel zum MEG auch das Elektrokardiogramm (EKG) und Elektrookulogramm (EOG) aufgezeichnet. Letzteres bezeichnet eine Methode, bei der durch Ableitung der Spannungsdifferenzen zwischen dem vorderen und hinteren Augenpol die Augenbewegungen registriert werden. Ein zusätzliches Kernspin- oder Magnetresonanz-Tomogramm liefert die genauen anatomischen Informationen. Bei der Aufnahme wird der Patient in einem starken Magnetfeld hochfrequenten Radiowellen ausgesetzt. Dadurch werden die in den Gehirnzellen vorhandenen Wasserstoffatome angeregt und geben nach dem Abschalten der Radiosignale selbst elektromagnetische Wellen ab, die sich mit externen Empfängern aufzeichnen lassen.

»Bisher hat sich das MEG-Verfahren in der klinischen Praxis noch nicht durchsetzen können, weil die Messungen äußerst aufwändig und kostspielig sind«, erläutert Tass. Unabhängig davon sei die Interpretation der Daten schwierig.

Letzteres soll sich aber bald schon ändern. Um neuronale Synchronisationsprozesse auf eine für den Patienten schonende Weise mit der MEG-Technik zu untersuchen, hat der Wissenschaftler gerade ein neuartiges mathematisch-statistisches Verfahren zur Auswertung der Messdaten entwickelt. Damit wurde erstmals am Menschen möglich, was bislang nur mit implantierten Elektroden bei Tieren gelang.

## Gefühlsausbrüche setzen molekulare »U-Boote« in Gang

Um jene Vorgänge nachzuweisen, die letztendlich für die Chemie der Liebe verantwortlich sind, müssen wir indessen noch viel tiefer ins Gehirn vordringen. Über die Hypophyse erreichen wir die letzte und zugleich alles entscheidende Funktionsebene. Was wir dort vorfinden, ist ein Mikrokosmos, in dem ausgewählte Moleküle wie winzige U-Boote durch die Blutbahn gleiten und an genau definierten Plätzen vor Anker gehen, um ihre Wirkung zu entfalten. Es ist eine Welt, die von der Biochemie regiert wird und die dafür Sorge trägt, dass Milliarden von Nervenzellen einwandfrei funktionieren können. Diese Chemie steuert nicht nur unsere Lebensfunktionen, sondern auch unsere ureigensten Gedanken und Gefühle.

Auch die zwischenmenschliche Beziehung von Bianca und Michael wird letztendlich von derartigen Molekülen gesteuert. Man kann in der Tat sagen, dass ein ausgefeiltes chemisches System für die unterschiedlichen Liebesgefühle zuständig ist. Auch die Libido – die Lust am Sex – wird somit im Wesentlichen von der Chemie bestimmt.

Sind die Wissenschaftler auch in diesen intimsten Bereich bereits vorgedrungen? »Im Prinzip ja«, würde die Antwort des legendären »Radio Eriwan« lauten. »Es ist ähnlich wie mit einem gut versiegelten Liebesbrief – Sie können Schreiber und Empfänger identifizieren, wissen aber noch lange nicht, was in dem Brief eigentlich steht.«

So ist es den Forschern aus Jülich in Zusammenarbeit mit der Nuklearmedizinischen Klinik der Düsseldorfer Heinrich-Heine-Universität tatsächlich gelungen, jene Gehirnzellen zu identifizieren, die gerade Botenstoffe absenden oder empfangen. Denn mit Hilfe moderner Methoden der Hirnforschung – den so genannten bildgebenden Verfahren – können die Hirnforscher sichtbar machen, was sich im Inneren des Kopfes gerade abspielt: Als »Wegweiser« dienen die bereits erwähnten elektrischen Impulse, welche die Nervenbahnen durchlaufen und magnetische Felder entstehen lassen. Auch wenn in den filigranen Kapillaren vermehrt Blut zu den aktiven Bereichen fließt, lässt sich dies nachweisen, weil dort unter anderem mehr Sauerstoff verbraucht wird, was mit einem erhöhten Konsum des Brennstoffs Glucose einhergeht.

Für solche Untersuchungen setzen die Forscher aus Jülich die funktionelle Magnetresonanz-Tomographie (fMRT) ein, mit der sich der Sauerstoffgehalt des Blutes eindeutig messen lässt: Je nachdem, ob der rote Blutfarbstoff Hämoglobin mit einer erhöhten Konzentration an Sauerstoff beladen ist oder nicht, gibt er ein unterschiedliches »Echo«. So lassen sich unter anderem jene Bereiche des Gehirns identifizieren, die an der Bewegungssteuerung oder an Entscheidungsprozessen beteiligt sind.

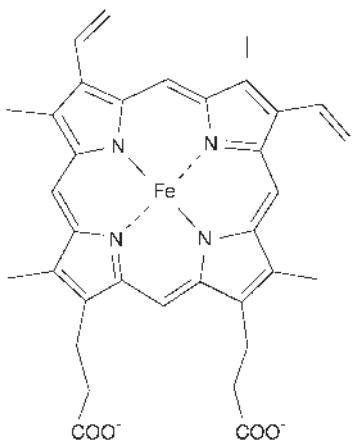


Abb. 6: Hämoglobin

Ein in Jülich unter dem Namen FIRE (Functional Imaging in Real Time) entwickeltes und zum Patent angemeldetes Verfahren hat die funktionelle MRT so beschleunigt, dass die auf diese Weise gewonnenen Bilder nunmehr in Echtzeit zur Verfügung stehen – populärer würde man von »Turbo-MRT« sprechen.

### **Michaels Liebe löst im Gehirn eine Lawine von Signalen aus**

Die Forscher sind aber noch einen Schritt weiter gegangen. So können sie mit Hilfe der Echtzeit-MRT erstmals auch die an der Gehirntätigkeit beteiligten Moleküle identifizieren und messen. So kann mit Hilfe der Methode inzwischen sogar unterschieden werden, ob die gemessenen Signale beispielsweise von einem Botenstoff der Hirnzellen oder von einer Energie übertragenden Phosphorverbindung stammen.

Hätte man Michaels Gehirn bei Biancas Ankunft also der Echtzeit-MRT unterworfen, wäre die Kaskade an Signalen den Forschern sicherlich nicht entgangen. Wie eingangs erwähnt, bleibt der Inhalt der Botschaft zum Glück ein Geheimnis, denn selbst mit einer Identifizierung der Botenstoffe können die Forscher bildhaft ausgedrückt zwar Farbe oder Form des »molekularen Briefumschlags« erkennen – mehr aber auch nicht!

Übertragen werden diese verschlüsselten Nachrichten durch Botenstoffe wie Neurotransmitter und Neuropeptide. Wie rasch diese Informationen im konkreten Fall weitergegeben werden, hängt von der Art der Nervenzellen, vom ausgeschütteten Neurotransmitter und von der Anzahl der Schaltstellen im Gehirn, den bereits erwähnten Synapsen, ab.

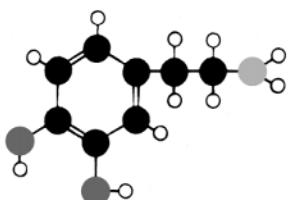
Die verschiedenen Transmitter sind nur in geringen Mengen vorhanden und nicht wahllos im Gehirn verbreitet. Vielmehr liegen Nervenzellen, die mit den gleichen Neurotransmittern arbeiten, in Gruppen beisammen, und ihre Nervenfasern strahlen nur in begrenzte Hirngebiete aus. Ein Beispiel sind Nervenzellen, die mit den Transmittern Dopamin, Serotonin und Noradrenalin arbeiten. Diese Transmitterstoffe gehören zur Gruppe der Monoamine, andere wie zum Beispiel die Gamma-aminobuttersäure (GABA) gehören zu den Aminosäuren. Die wichtigsten Neurotransmitter und ihre Wirkungsweise werden im Folgenden kurz beschrieben.

- Acetylcholin ((2-Acetoxyethyl)-trimethylammoniumchlorid): Dieser Transmitter geht eine Bindung mit einem sogenannten nikotinischen Rezeptor ein. Für einen Augenblick kürzer als ein Wimpernschlag, nämlich für 0,1 Millisekunden, öffnet sich der Ionenkanal, der in dieser Zeitspanne etwa 15 000–30 000 Ionen passieren lässt. Acetylcholin wirkt an der Synapse zwischen Nerv und Muskel erregend, weil es positiv geladenen Natriumionen die Möglichkeit gibt, in die Zelle einzudringen.
- Glutaminsäure (2-Aminoglutarsäure): Sie wirkt an verschiedenen Rezeptoren auf Natriumionen (Einstrom), Kaliumionen (Ausstrom) und bei einigen davon auch auf Calciumionen (Einstrom). Als so genannte »exzitatorische Aminosäure« gehört sie zu den wichtigsten erregenden Transmittern im zentralen Nervensystem.

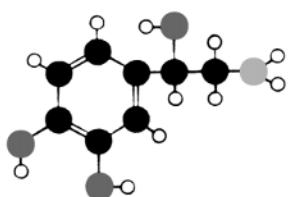
- Serotonin (5-Hydroxytryptamin): Der erstmals im Jahre 1948 aus Blutserum isolierte Neurotransmitter spielt eine wichtige Rolle im Schlaf-Wach-Rhythmus. Darüber hinaus beeinflusst er in entscheidendem Maße unsere Stimmungslage. Als Indol-Derivat ist Serotonin strukturell mit einigen Halluzinogenen wie zum Beispiel Psilocybin (»Magic Mushroom«) und LSD verwandt.
- GABA (Gamma-Aminobuttersäure) verursacht durch einen Chloridioneneinstrom eine Hemmung der nachgeschalteten Zelle.
- Glycin (Aminoessigsäure): Der einfachste unter den Neurotransmittern ist im Körper weit verbreitet und wirkt – ähnlich wie GABA – über den Chloridioneneinstrom auf nachgeschaltete Zellen hemmend.
- Dopamin (4-(2-Aminoethyl)-brenzcatechin) sowie das funktionsverwandte
- Noradrenalin (4-(2-Amino-1-hydroxyethyl)-resorcin) wirken indirekt, indem sie die Konzentration eines »zweiten Boten« erhöhen oder senken, der dann seinerseits die elektrischen oder biochemischen Wirkungen auslöst. Der amerikanische Biochemiker, Pharmakologe und Physiologe Earl Wilbur Sutherland identifizierte den »zweiten Boten« als cyclisches Adenosinmonophosphat (cyclo-AMP), wofür ihm 1971 der Nobelpreis für Physiologie und Medizin verliehen wurde.

### Monoamine

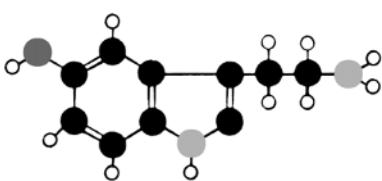
Dopamin



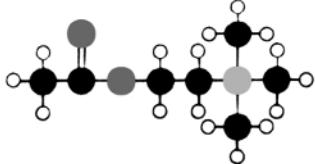
Noradrenalin



Serotonin

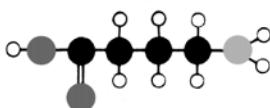


Acetylcholin

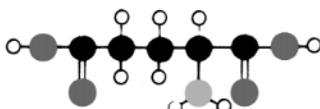


### Aminosäuren

Gamma-aminobuttersäure (GABA)



Glutaminsäure



Glycin



- Kohlenstoffatom
- Sauerstoffatom
- Stickstoffatom
- Wasserstoffatom

Abb. 7: Wichtigste Neurotransmitter

## Neurotransmitter – Wächter über Emotionen und Schlaf

Nervenzellen, die mit Dopamin als Transmitter arbeiten, befinden sich vor allem in der ventralen Haube im Mittelhirn und reichen bis ins Vorderhirn, wo sie an der Steuerung emotionaler Reaktionen beteiligt sind. Andere Dopamin-haltige Nervenfasern enden nahe dem Zentrum des Gehirns im Streifenkörper, wo Dopamin bei der Regulierung komplexer Bewegungen eine Rolle spielt. Eine Degeneration dieser Nervenfasern hat verheerende Folgen und führt unter anderem zu Muskelsteife und Zittern.

Serotoninhaltige Nervenzellen befinden sich wiederum in einem kleinen Gebiet des Hirnstamms, dem sogenannten Raphe-Kern. Die Fasern dieser Nervenzellen reichen in den Hypothalamus, den Thalamus und in viele andere Hirnregionen. Dort ist Serotonin an der Wahrnehmung von Empfindungen und am Zustandekommen des Schlafs beteiligt.

Noradrenalinhaltige Nervenzellen befinden sich besonders häufig in einem kleinen Gebiet im Hirnstamm, dem blauen Kern (Nucleus coeruleus). Diese Nervenzellen sind stark verzweigt und stehen mit dem Hypothalamus, dem Kleinhirn und dem Vorderhirn in Verbindung, wo das Noradrenalin an der Erhaltung des Wachzustandes, am Belohnungssystem des Gehirns, am Träumen und an der Regulierung der Stimmungslage beteiligt zu sein scheint. Als Belohnungssystem bezeichnen Hirnforscher die Zentren der Lustempfindung. Diese spielen beim Lernen, aber auch für Gedächtnisleistungen eine herausragende Rolle.

Neben den bereits genannten Transmittern kennt und vermutet man weitere, wobei auch einige Aminosäuren als Transmitter in Frage kommen. Zum Beispiel wirken Glutamin- und Asparaginsäure erregend auf die meisten Nervenzellen. Von der einfachsten Aminosäure, dem Glycin, weiß man, dass es als hemmender Transmitter im Rückenmark wirkt.

Der wichtigste Transmitter mit hemmender Wirkung ist die Gamma-Aminobuttersäure (GABA), die ausschließlich in Hirn und Rückenmark synthetisiert wird. Man schätzt, dass ein Drittel aller Hirnsynapsen mit GABA als Transmitter arbeitet.

Kleine Ursache – große Wirkung: Bemerkenswert ist, dass sich der hemmende Transmitter GABA vom erregenden Transmitter Glutaminsäure nur dadurch unterscheidet, dass ihm eine Gruppe

bestehend aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen fehlt. Demnach können schon kleine Unterschiede in der molekularen Struktur dazu führen, dass die einzelnen Transmitter völlig entgegengesetzte Wirkungen aufweisen.

### **Michaels Gehirn – ein Energieverschwender**

Neben den sieben klassischen und chemisch relativ einfachen Neurotransmittern kennen die Forscher inzwischen rund 50 weitere Botenstoffe, von denen man heute weiß, dass auch sie im Gehirn als Neurotransmitter wirken. In den letzten Jahren wurden sowohl in der Charakterisierung der Transmittersubstanzen als auch in der Analyse der molekularen Vorgänge beträchtliche Fortschritte erzielt.

»Dank dieser Untersuchungen weiß man, dass die Wirkung vieler Pharmaka und Nervengifte daher röhrt, dass sie die chemische Übertragung der Nervensignale unterbrechen, verändern oder nachahmen, und es gibt Hinweise dafür, dass auch Geisteskrankheiten auf Defekten in der Funktion von chemischen Übertragungssystemen im Gehirn beruhen«, zieht der britische Pharmakologe Leslie L. Iversen Bilanz.

Seinen Angaben zufolge zählt das Gehirn zu den größten Energieverbrauchern im Körper. Dies komme durch seine starke Durchblutung und durch seinen hohen Sauerstoffbedarf zum Ausdruck, führt Iversen weiter aus. Zwar würde das Gewicht des Gehirns eines erwachsenen Menschen nur etwa zwei Prozent seines Körpergewichts ausmachen, dennoch würden ihm 20 Prozent des im Ruhezustand aufgenommenen Sauerstoffs zufließen.

Moderne Hirnforscher vermuten daher, dass sich der große Energiebedarf des Gehirns aus der Notwendigkeit ergibt, an allen Nervenmembranen die Konzentrationsgefälle von Ionen aufrecht zu erhalten, von denen die Erzeugung, Verarbeitung und Weiterleitung von Nervensignalen in den vielen Milliarden Nervenzellen abhängt. Für das Gehirn gibt es keine Verschnaufpause. Vielmehr ist die Intensität des Hirnstoffwechsels Tag und Nacht in etwa gleich – sie kann sogar im Schlaf, vor allem wenn Bianca und Michael gerade träumen, etwas ansteigen.

Der Versuch, die Intensität des arbeitenden Gehirns näher zu erforschen, lässt die Forscher zunächst an Grenzen stoßen. Im Prin-

zip ist es natürlich möglich, die Neurorezeptoren quasi im Reagenzglas zu untersuchen: Hierzu zerkleinern die Wissenschaftler die aus lebenden oder toten Gehirnen isolierten Nervenzellen, bis zum Schluss nur noch die Hüllen der Zellen – ihre Membranen mit den eingeschlossenen Rezeptormolekülen – übrig bleiben. Die einzelnen chemischen Bausteine, aus denen die Rezeptoren zusammengesetzt sind, lassen sich nun bestimmen. Einziges Problem: Es ist nicht mehr möglich, einen einzelnen Rezeptor oder gar das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Rezeptortypen im lebenden Gehirn zu beobachten.

Einen Ausweg aus dem scheinbaren Dilemma bietet die Positronen-Emissions-Tomographie. Das Verfahren gestattet es nämlich, mit Hilfe radioaktiv markierter Moleküle die Verteilung der unterschiedlichen Rezeptoren im Gehirn sichtbar zu machen. Doch wie bringt man das Gehirn dazu, diese Substanzen aufzunehmen?

### **Bianca mag Traubenzucker – ihr Gehirn auch**

Inzwischen ist es Forschern in der Tat gelungen, die Intensität des Energiestoffwechsels einzelner Hirnzellen sichtbar zu machen. Dazu bedienten sie sich eines Tricks, und der »Appetit« des Gehirns auf Traubenzucker wies ihnen den richtigen Weg.

Gehören Sie zufällig zu den Menschen, die in Stresssituationen einen verstärkten Appetit entwickeln und zum Naschen neigen?

Falls ja, müssen Sie sich keine Vorwürfe machen, denn Sie befinden sich in absolut guter Gesellschaft.\* So werden auch Nervenzellen bei erhöhtem Energiebedarf buchstäblich gefräßig und konsumieren deutlich mehr Traubenzucker (Glucose), als dies in der Ruhephase der Fall ist. Bei diesem Vorgang wird die aufgenommene Glucose normalerweise rasch umgesetzt, dementsprechend lässt sie sich bereits nach kurzer Zeit nicht mehr nachweisen.

\* In der Tat scheinen die Menschen in Stress- oder Prüfungssituationen unterschiedlich zu reagieren. Während der weibliche Part des Autorenteams eher dazu neigt, die Nahrungszufuhr zu vergessen, fällt der Autor durch einen häufigeren Gang zum Kühl-

schrank auf. Leider wird geistige Anstrengung von der Personenwaage noch nicht einmal ansatzweise honoriert, und bedauerlicherweise konnte in diesem Zusammenhang auch noch kein familiärer »Emissionshandel« zu Stande kommen ...

Anders stellt sich jedoch die Situation dar, wenn man die Glucose mit einer Art »Leuchtspur« versieht. Forscher in Jülich haben zu diesem Zweck die Glucose mit radioaktivem Fluor  $^{18}\text{F}$  markiert. Die Verteilung einer auf diese Weise vorbehandelten Glucose sowie ihr Verbrauch innerhalb des Körpers lässt sich danach von außen mit der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) verfolgen.

---

#### Wie Forscher einen »strahlenden Doppelgänger« des Traubenzuckers herstellen

Zur Herstellung von markiertem Traubenzucker wird zunächst radioaktives Fluor in einem Teilchenbeschleuniger hergestellt. Dazu werden Wassermoleküle, die das Sauerstoff-Isotop  $^{18}\text{O}$  enthalten, mit Wasserstoffkernen beschossen ( $^{18}\text{O} + \text{p} \rightarrow ^{18}\text{F}^-$ ). Das dabei entstehende

Fluoridion  $^{18}\text{F}^-$  gelangt durch Leitungen in der Größe winziger Kapillaren in eine mit Blei ummantelte Synthese-Zelle. Dort bildet sich ein mit radioaktivem Fluor markierter Traubenzucker, der noch einige Schutzgruppen als »Anhänger« trägt. Nach einer Prozessdauer von insgesamt weniger als einer Stunde ist der strahlende Doppelgänger des Traubenzuckers einsatzbereit.

---

Für Untersuchungen am lebenden Gehirn leistet der auf diese Weise markierte Traubenzucker unschätzbare Hilfe – auch wenn er vermutlich nie zum Einsatz kommen wird, um etwa den Grad der Verliebtheit anhand erhöhter Gehirnaktivität zu erforschen!

Dagegen lässt sich mit seiner Hilfe beispielsweise nach Schlaganfällen das Ausmaß der Zerstörung feststellen. Da das markierte Molekül wie gewöhnlicher Traubenzucker die Blut-Hirn-Schranke passiert, ist es ein wertvoller Indikator und zeigt an, wo der Stoffwechsel des Hirngewebes normal verläuft und wo er durch ein blockiertes Blutgefäß beeinträchtigt ist. Je höher der Glucoseverbrauch in der geschädigten Hirnregion ist, desto besser sind die Heilungschancen.

Inzwischen werden bereits zahlreiche Kliniken mit dem strahlenden Zucker aus Jülich beliefert, der 1999 vom Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte offiziell als erstes radioaktives Diagnostikum für PET-Untersuchungen in Deutschland zugelassen wurde. Da das radioaktive Fluor relativ schnell zerfällt und bereits nach 110 Minuten die Hälfte der Radioaktivität verschwunden ist, entspricht die Strahlenbelastung eines Patienten nur der einer gewöhnlichen Röntgenuntersuchung.

Aus diesem Grund wird das Präparat seit kurzem auch in der Herzdiagnostik eingesetzt. So lässt sich nach einem Herzinfarkt bei-

spielsweise feststellen, welche Bereiche unwiderruflich zerstört und welche noch lebensfähig sind.

In ähnlicher Weise ist der radioaktive Zucker gerade dabei, die Tumordiagnostik zu revolutionieren. So reichert sich der markierte Zucker bevorzugt in schnell wachsenden Tumoren an, da diese einen beschleunigten Stoffwechsel aufweisen. Mit Hilfe von PET-Kameras lassen sich auf diese Weise Hirntumore millimetergenau orten.