

# GEO

83406

Nr. 1 / Montag, 25. 5. 1987

DM 13,50

sfr 13,50; öS 100,-

## WISSEN

### GEHIRN · GEFÜHL · GEDANKEN

SUPERORGAN

**Der Kosmos  
im Kopf**

SCHLAF

**Der nächtliche  
Weltuntergang**

SCHIZOPHRENIE

**Wenn das Ich  
zerbricht**

HIRNHORMONE

**Die Macht  
der Moleküle**

SCHMERZ

**In der Hölle  
der Neuronen**

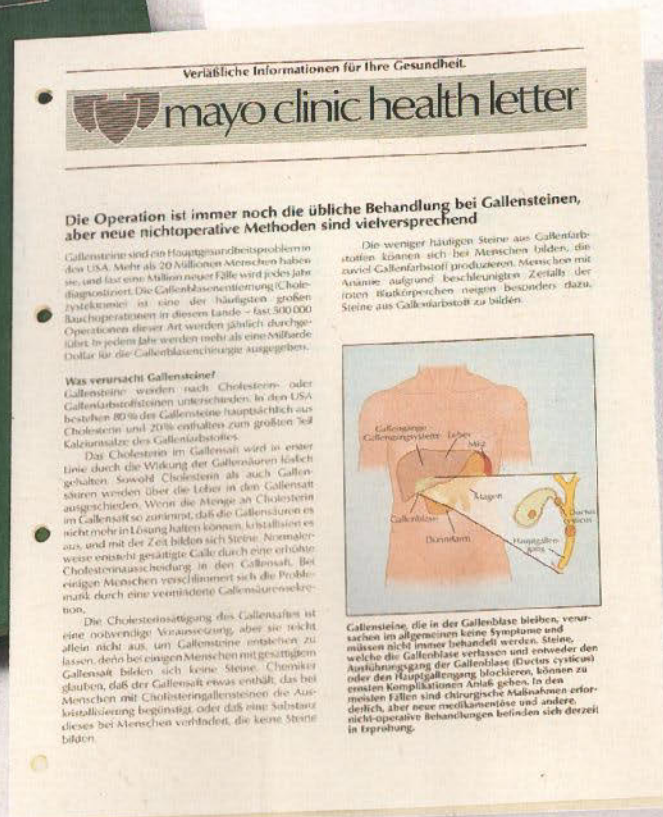




# Sichern Sie sich die neuesten medizinischen Erkenntnisse eines der bedeutendsten Forschungs-, Diagnose- und Therapiezentren der Welt.



Der praktische Sammelordner, den jeder regelmäßige Leser ohne zusätzliche Berechnung erhält.



Über 800 Ärzte und Wissenschaftler der mayo clinic in Rochester, Minnesota (USA), liefern Ihnen außerordentlich wertvolle Informationen für Ihre Gesundheit.

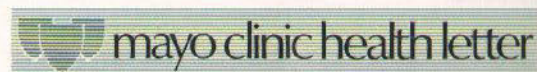
Sie werden im »mayo clinic health letter« unter anderem lesen können:

- Neue Medikamente bei der Behandlung von Herzerkrankungen
- Genitaler Herpes – eine Seuche?
- Krebs – Vorsorge, Heilungschancen
- Neue Behandlungsmethoden bei Nieren- und Gallensteinen
- Selbstbehandlung beim Tennisellenbogen
- Impotenz – Ursachen und Behandlung
- Gefahren der Bauchhöhlenschwangerschaft
- Schnarchen und Ihre Gesundheit
- Multiple Sklerose
- Akupunktur und chronische Schmerzen

Der »mayo clinic health letter« erscheint monatlich und kostet vierteljährlich DM 30,-. Jeder Abonnent erhält ohne zusätzliche Berechnung den praktischen Sammelordner sowie 1 x im Jahr das umfassende Stichwort-Register.

Bitte senden Sie Ihre Bestellung an den Verlags-Service »mayo clinic health letter«, Postf. 11 16 29, 2000 Hamburg 11. Sie erreichen uns auch telefonisch: 040/41 18 37 40. Leisten Sie bitte keine Vorauszahlung. Sie erhalten eine Rechnung.

Lesen Sie den »mayo clinic health letter« regelmäßig. Nutzen Sie die vielen wertvollen und für Sie persönlich wichtigen Beiträge aus dem Zentrum der medizinischen Wissenschaft.



**Verlässliche Informationen für Ihre Gesundheit.**





*Liebe Leser, lieber Leser,*

## GEO WISSEN

Verlag Gruner + Jahr AG & Co, Warburgstraße 50, 2000 Hamburg 36, Redaktion: Warburgstraße 45, 2000 Hamburg 36. Postanschrift für Verlag und Redaktion: Postfach 30 20 40, 2000 Hamburg 36. Telefon: 0 40/4 11 81. Telefax: 0 40/41 18 22 53. Telex: 2 1 952-16

### CHEFREDAKTEUR

Adolf Theobald

### STELLVERTRETENDER CHEFREDAKTEUR

Hermann Schreiber

### CHEF VOM DIENST

Ernst Artur Albaum

### ART DIRECTOR

Erwin Ehret

### TEXTREDAKTION

Günter Haaf, Franz Mechsner, Dr. Jürgen Neffe

### BILDREDAKTION

Christiane Breustedt (Leitung),

Juliane Berensmann, Tilman Fulda, Nele Hilger,

Venita Kaleps, Elke Ritterfeldt, Sabine Wuensch

### LAYOUT

Franz Braun (Leitung), Peter Dasse, Johannes Dönges,

Andreas Krell, Peter Voigt

### KARTOGRAPHIE: Günther Edelmann

### SCHLUSSREDAKTION

Hans-Werner Kühl, Peter Jordan, Karsten Mehner,

Hinnerk Seelhoff, Jens Utecht

### DOKUMENTATION

Dr. Manfred Pietschmann

### MITARBEITER

Christine Broll, Prof. Dr. Hans Flohr, Dr. Annelies

Furtmayr-Schuh, Charlotte Kerner, Dr. Regina Oehler

### GEO-BILDARCHIV

Birgit Heller, Peter Müller, Sybille Schley

### FARBIMPRIMATUR: Norbert Kunz

### GEO-BÜROS

Moskau: Helga Engelbrecht, Kutusowsky Prospekt 7/4,

Kw 314, Tel. 2 43 42 64;

New York: Brigitte Barkley, 685 Third Avenue, 23st fl.,

New York, N. Y. 10 017, Tel. (212) 599-4040/43/44/45

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Günter Haaf

### VERLAGSLEITER: Heiner Eggert

### ANZEIGENLEITER: Rolf Grimm

(verantwortlich für Anzeigen)

### VERTRIEBSLEITER: Udo Steinmetz

### HERSTELLER: Bernd Zahn

### GEO-Wissen-LESER-SERVICE

Gruner + Jahr AG & Co

Postfach 11 16 29, 2000 Hamburg 11

Postscheckkonto Hamburg 240 00-209

BLZ 200 100 20

Tel. 0 40/41 18 32 36

Schweiz: GEO-Wissen-Leser-Service

Seeburgstraße 18, 6002 Luzern

Tel. 0 41-31 37 41

Heftpreis: DM 13,50 inkl. MwSt.

Auslandspreise: Schweiz sfr 13,50; Österreich öS 100,-;

übriges Ausland auf Anfrage.

© 1987 Gruner + Jahr, Hamburg

Anzeigenpreisliste Nr. 14 vom 1. 1. 1987.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG, 2000 Hamburg 1,

Konto-Nr. 03 22 800

Offsetdruck: FRITZ BUSCHKE

Druckerei-Gesellschaft m. b. H., Dortmund

**W**illkommen zu einem doppelten Experiment. Der erste Teil des Versuchs betrifft uns Redakteure: Wir hoffen, daß Sie GEO-Wissen, den jüngsten Sproß der GEO-Familie – im roten Rahmen –, attraktiv und lohnend finden. Und daß Sie der seltsame „Spiegel“ auf unserem Titelbild – eine Weltpremiere der Holographie – ebenso fasziniert wie uns. (Mehr darüber erfahren Sie auf der nächsten Seite!)

Der zweite Teil des Versuchs betrifft Sie selbst. Sie sind das Thema dieses Heftes: Gehirn, Gefühl, Gedanken – Ihr Gehirn, Ihre Gefühle, Ihre Gedanken. Noch mehr: Das menschliche Gehirn läßt sich, anders als jeder andere Gegenstand der Wissenschaft, nicht reduzieren auf ein vom Forschenden losgelöstes Objekt: Es handelt stets mit, ist immer auch Subjekt, ist jenes Organ, das Wissenschaft möglich macht und deren Erkenntnisse wahrnimmt.

Das wichtigste Argument für unsere Entscheidung, die neue Reihe GEO-Wissen mit dem Thema „Gehirn“ zu eröff-

nen, ist allerdings dessen Aktualität:

● Die Hirnforschung steht vor einer Revolution. Sie wartet gleichsam auf ihren Newton, Einstein oder Darwin. Nicht nur die Zahl bekannter Details über Nerven und Gehirn ist in den letzten Jahren regelrecht explodiert, auch die Zahl der Hirnforscher: Inzwischen ist die Neurobiologie dabei, die Molekulargenetik als das „heißeste“ Gebiet der Naturwissenschaften abzulösen. Und parallel dazu gewinnt die ebenfalls fächerübergreifende „kognitive Psychologie“ – die Lehre vom Erkennen und Denken – zusehends Einfluß.

● Die Folgen dieser Revolution werden die Gesellschaft womöglich stärker erschüttern als heute die Biotechnologie oder die Eingriffe in die menschliche Fortpflanzung – wie diese im guten und im bösen. Denn die Früchte neurowissenschaftlicher Er-

kenntnisse werden nicht nur Hilfe sein für Unfall-opfer mit Kopfverletzungen, psychisch Kranke oder alte Menschen mit Störungen ihrer Hirnleistung. Das neue Wissen über dieses menschlichste Organ wird auch an unser aller Selbstverständnis rütteln – und kann zum Mißbrauch einladen.

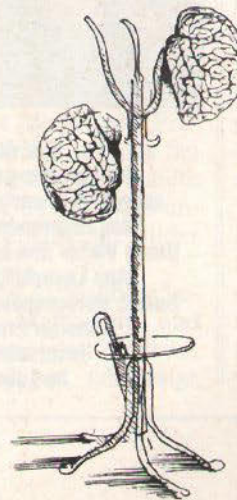
Thema dieses Heftes sind also nicht praktische, in ihrer Beliebigkeit ohnehin zweifelhafte Tips & Trends für die Psychologie des Alltags. Und wir beschränken uns auch nicht auf Forschungsdetails, so faszinierend sie sind: Hier geht es um frühe Information über eine wissenschaftliche Entwicklung, die uns alle betrifft.

**D**abei sind wir sicher, daß dieses Heft – bei allem Ernst in der Sache – für Sie eine spannende Lektüre ist. Ein Tip übrigens, der Ihnen dabei hilfreich sein könnte: Auf Seite 21 finden Sie eine ausklappbare graphische Übersicht des menschlichen Gehirns. Diese Graphik und das „Glossar“ auf den Seiten 160 bis 163 ermöglichen es, wichtige Details rasch nachzuschauen.

Seien Sie nicht überrascht, wenn Sie in irgendeiner Zeile dieses ersten Hefts von GEO-Wissen plötzlich abermals persönlich angesprochen werden: Sie sind es in der Tat, die oder der dann gemeint ist. Auch dies ist ein Teil unserer Experiments.

Herzlich Ihr

*Günter Haaf*  
Günter Haaf





# Weltpremiere: So kam das Hologramm aufs Titelbild

**A**ugen sind der Spiegel der Seele. Und Diane Viktors Augen spiegeln auf dem Titelbild die „Seele“ dieser ersten Ausgabe von GEO-Wissen wider: Sie wirken, je nach Blickwinkel, einmal vertraut, dann aber schillernd-tiefgründig – ähnlich wie das Thema dieses Heftes, wie unser Gehirn, unsere Gefühle, unsere Gedanken.

Der „Spiegel“ auf Dianas Gesicht ist ein sogenanntes Weißlicht-Hologramm und gleichzeitig das erste „Puls-Hologramm“ von einem lebenden Menschen auf dem Titelbild einer Zeitschrift. Bisher zeigten Hologramm-Titelbilder stets nur unbelebte Gegenstände, zum Beispiel den versteinerten Schädel eines Urmenschen. Denn bei herkömmlichen holographischen Aufnahmen mit dem sogenannten Dauerstrichlaser-Verfahren muß das aufzunehmende Objekt längere Zeit völlig bewegungslos verharren – eine für Lebewesen unerfüllbare Forderung: Ihre Hologramme würden „verwackeln“.

Zu dieser Schwierigkeit kommen Übertragungsprobleme: Wie kann das dreidimensionale Bild eines nur im Laserlicht sichtbaren echten Hologramms so auf eine hauchdünne Lackfolie geprägt werden, daß es auch bei normaler Beleuchtung – bei dem „Weißlicht“ ge-

nannten Lichtwellensalat unseres Tageslichts – sichtbar wird?

Unser Wunsch, dieses Heft mit dem Hologramm einer lebenden Person zu schmücken, verlangte also beinahe Unmögliches von den Holographen. Und in der Tat war es ein bis zuletzt spannendes Experiment, ob sich all die technischen Tricks und organisatorischen Details auszahlen würden.

Bernd Zahn, zuständig für die technische Herstellung von GEO, hatte über Jahre die langsam reifenden Techniken der verschiedenen Weißlichtholographieverfahren aufmerksam verfolgt. Seine Recherchen bei mehreren in- und ausländischen Firmen endeten vor

den Toren Hamburgs: bei der kleinen Firma Holocom GmbH im Flecken Kakenstorf in der Nordheide.

Dort haben Firmenchef Johannes Matthiesen und sein amerikanischer Kollege Fred Unterseher im Anbau eines unauffälligen Einfamilienhauses eines der am besten ausgerüsteten Holographie-Labors der Welt eingerichtet.

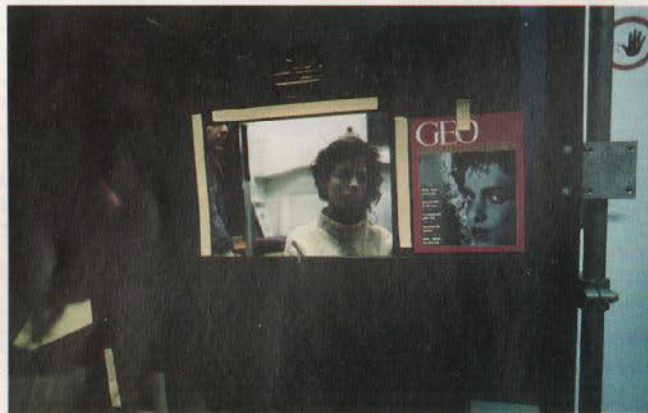
**D**er bärtige Laser-Künstler Fred Unterseher war aus San Francisco über New York nach Kakenstorf gekommen, weil er gute Chancen sah, gemeinsam mit Matthiesen seine Ideen zu verwirklichen. Unter anderem hatte er sich vorgenommen,

mit Hilfe eines „Puls-Lasers“ gestochen scharfe Hologramm-Portraits zu schießen.

Für das New Yorker Model Diane Viktor begann der wohl seltsamste Arbeitstag ihrer Karriere frühmorgens an einem Novembertag in Hamburg. Gemeinsam mit Bernd Zahn, dem Redaktionsteam, der Visagistin und dem Friseur fuhr sie über die Dörfer nach Kakenstorf. Während sie in einem Raum neben dem Laser-Labor holographiegerecht geschminkt wurde, besprach GEO-Art Director Erwin Ehret mit Fred Unterseher Blickwinkel und Ausschnitt des geplanten holographischen Portraits.

Nach mehrstündigen Vorbereitungen war es soweit: Der leistungsstarke Rubinelaser lud sich leise summend auf, Unterseher drückte auf einen Knopf, die Kondensatoren entluden sich mit dumpfem Knall – und der für das träge menschliche Auge kaum wahrnehmbare, nur 20 bis 30 Milliardstelsekunden kurze Laserblitz hatte Dianas Gesicht auf eine hochauflösende Holographieplatte gebannt. Unterseher nahm die belichtete Platte, entwickelte sie, hielt sie ins tiefrote Dauerlicht des gleichen Lasers mit einer Wellenlänge von 697 Nanometer – und war unzufrieden: Erst nach einem ganzen Tag und einem knappen Dutzend Laserpulsen war die Aufnahme endlich im Kasten.

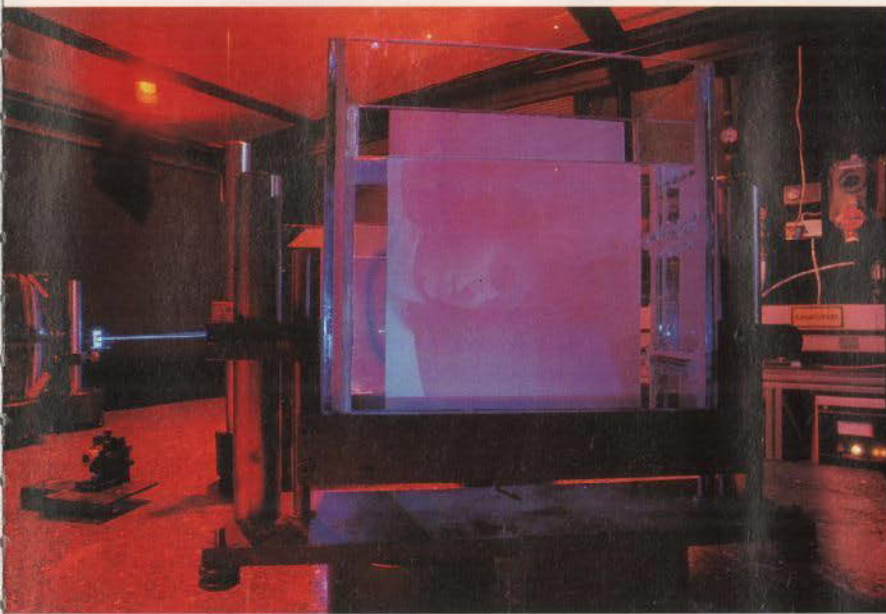
Holographie ist ein schwieriges Kind der Lasertechnik. Bei normalem



Für das Hologramm geschminkt erwartet das Fotomodel Diane Viktor den ersten Laserblitz. Unten: Holographiekünstler Fred Unterseher im Labor







Nach jeder der 20 bis 30 Milliarden Sekunden kurzen Belichtungen per Laserblitz entwickelt Fred Unterseher die Platte (unten), um das entstandene Hologramm im roten Laserlicht zu prüfen (links)

Schritt: Sie setzten ihr Werk in ein auch unter Tageslicht sichtbares „Regenbogen-Weißlicht - Transmissions-Hologramm“ um, indem sie einen schmalen Streifen aus dem „Master-Hologramm“ ausblendeten. Dabei geht allerdings die Dreidimensionalität des ursprünglichen Hologramms in der Senkrechten verloren; der 3-D-Effekt bleibt jedoch in der Waagrechten erhalten: So ist es zwar möglich, auf dem Titelbild um Dianas Nase „herum“ zu schauen, nicht aber von unten in ihre Nase hinein.

Eine ganze Serie von technischen Schritten in mehreren Firmen in verschiedenen Städten war nach der Fertigung eines „Prägemusters“ bei Holocom noch nötig, um das Hologramm schließlich auf unser Titelbild zu bringen. Das „Bild“ besteht aus einer hauchdünnen Lackschicht, die auf der Papierseite mit aufgedampftem Aluminium verspiegelt ist. Die holographische Information, eine in den Lack eingeprägte mikroskopische Berg- und Tal-Landschaft, liegt zum Schutz vor Kratzern ebenfalls auf der papiernen Seite. Der Lack mit dem eingepprägten Hologramm wurde auf das bereits bedruckte Titelbild aufgepreßt.

PS: Den dreidimensionalen Eindruck beim Betrachten des Hologramms schafft sich unser Gehirn selbst – natürlich nur, wenn Sie das Bild mit beiden Augen betrachten. □

Licht laufen Wellen unterschiedlicher Frequenz – „Farben“ also – und Schwingungstakte kreuz und quer. Laserlicht dagegen besteht aus „kohärenten“ Lichtstrahlen: Sie schwingen im Gleichtakt einer einzigen Frequenz und laufen parallel. Wenn ein solcher Laserstrahl mit einem halbdurchlässigen Spiegel in zwei Wellenfronten aufgespalten wird, kann eine holographische Aufnahme gemacht werden. Dazu muß der eine Strahl – der Referenzstrahl – zu exakt derselben Zeit auf der Fotoplate eintreffen wie sein Partner, der unterdessen auf das aufzunehmende Objekt gefallen und von diesem reflektiert worden ist. Zu diesem Zweck muß Fred Unterseher den Weg des Referenzstrahls mit einigen



optischen Tricks verlängern.

Die simultan eintreffenden Lichtwellen überlagern einander in der Ebene des Filmes und hinterlassen in diesem ein sogenanntes „Interferenzmuster“: Auf der so belichteten Platte sind alle räumlichen Informationen des aufgenommenen Objekts gespeichert. Allerdings kann die-

ses „Transmissions-Hologramm“ nur in einem Laserlicht betrachtet werden, das mit exakt derselben Frequenz schwingt wie das bei der Aufnahme verwendete Licht: Nur dann stehen unglaublich lebensechte Bilder „im Raum“.

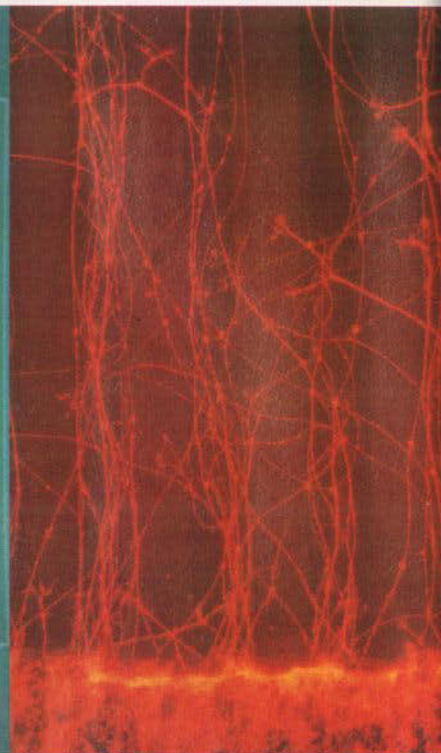
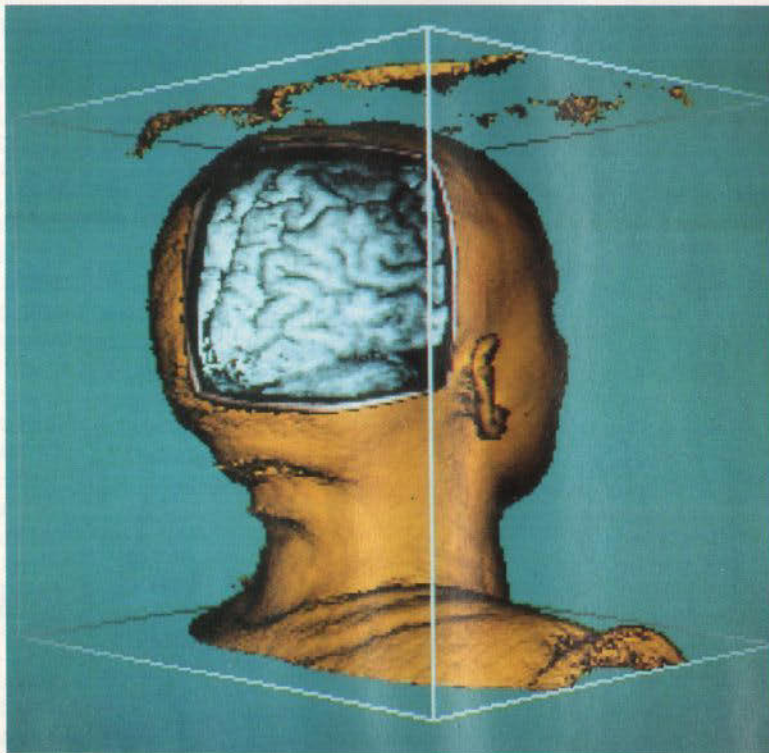
Nach den Aufnahmen begann für Matthiesen und Unterseher der zweite, kaum weniger schwierige



## BILDESSAY

### Der Kosmos im Kopf

Das Gehirn gaukelt uns vor, Bewußtsein sei eine Selbstverständlichkeit. Die gewaltige Leistung, die es mit Sinneswahrnehmung, Fühlen und Denken vollbringt, läßt es uns nicht spüren. Je mehr aber die Wissenschaft die Komplexität des Gehirns erkennt, desto staunenswerter wird die subtile Kreativität, mit der die Natur die »Zitadelle« des menschlichen Geistes gebaut hat. Seite 8



## SINNE

### Wer seinen Augen traut

Im Reich der Sinne hat das Sehen offenbar die höchste Priorität: Mindestens ein Drittel seiner Kapazität verwendet das Hirn für die visuelle Datenverarbeitung. Und in spannenden Experimenten suchen Forscher den komplizierten Prozeß vom Sehen zur Wahrnehmung zu erhellen. Seite 74



## INTENSIV-STATION

### Wenn das Großhirn schweigt

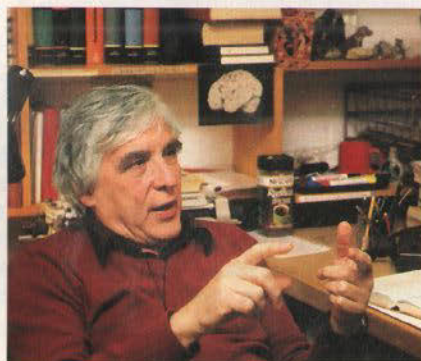
Ein Mensch scheint friedlich im Bett zu schlafen. Der Schein indes trügt: Er liegt im Koma – verloren im Niemandsland zwischen Leben und Tod. Ein Mensch, den die Intensivmedizin vegetieren läßt. Eine Belastung für Krankenhäuser und eine Qual für die Angehörigen. Seite 104



## PORTRAIT

### In den Gespinnsten des Geistes

Franz Mechsner beschreibt Arbeit und Persönlichkeit Valentin Braitenbergs, Direktor am Tübinger Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik. Den besonders interessiert, wo im Hirn das Geheimnis des Geistes steckt. Seite 128



## GEFÜHLE

### Die Welt der Assoziationen

Kultur wäre nicht möglich ohne die Gehirne auch der anderen Menschen. Was andere denken, was andere fühlen, ist Teil unserer Selbst. Ein Bild, ein Gedanke löst Assoziationen an Erfahrungen aus, die – obwohl andere sie gewonnen haben – uns unmittelbar verständlich sind. Seite 150





### ENTWICKLUNG

#### Auf den Spuren der Axone

In einem Menschenembryo entstehen pro Minute 250 000 Nervenzellen. Wie aber verknüpfen sie sich zu einem Gehirn? Auch Embryos von Tieren geben Auskunft darüber, mit welcher phantastischen »Zielbewußtheit« sich Hirnbaustein an Hirnbaustein fügt. Seite 34



### NERVEN

#### Was die Schmerzen schmerzlich macht

Nicht das Bein tut weh, wenn man sich stößt: Der Schmerz artikuliert sich erst im Hirn – nach einem komplizierten neurobiologischen Staffellauf. Doch das Gehirn macht sich auch Schmerzen selber und kann sie – bei manchen Ritualen etwa – sogar unterdrücken. Seite 48



### SCHLAF & TRAUM

#### Die entzauberte Nacht

Sensoren am Körper eines schlafenden Menschen liefern Meßwerte über Kabel an den Computer. Daraus sind Informationen über Schlaf und Traum zu gewinnen. Und in Spezialkliniken geben diese Daten auch Hinweise für die Behandlung des »kranken Schlafs«. Seite 114



### HISTORIE

#### Das Herz verlor, das Hirn gewann

In zweieinhalb Jahrtausenden hat unser Denkkorgan sich selbst entdeckt – und dabei alte Vorstellungen zurechtgerückt. Nicht mehr das »Herz« fühlt – es ist das Hirn. Nicht mehr ein »Pneuma« weht den Geist in uns hinein – er haust in den Neuronen. Seite 170



### Der Kosmos im Kopf

8

#### Das Gehirn auf einen Blick

Eine Übersicht über die Anatomie des menschlichen Hirns

21

#### ... also bin ich

Wie wird die Flut neuer Erkenntnisse unser Weltbild beeinflussen?

30

#### Auf den Spuren der Axone

34

#### Was Schmerzen schmerzlich macht

48

#### Die Macht der Moleküle

Gesteuert vom Gehirn, beherrschen Hormone unser Leben

64

#### Wer seinen Augen traut

74

#### Wenn das Ich zerbricht

Ein Blick ins Hirn enthüllt, weshalb Schizophrene Probleme mit dem Denken haben

90

#### Wenn das Gehirn zerfällt

Die Alzheimersche Krankheit kann Mann und Frau schon in den besten Jahren zu hilflosen Greisen machen

98

#### Wenn das Großhirn schweigt

104

#### Die entzauberte Nacht

114

#### In den Gespinnsten des Geistes

128

#### Wie spiegelt sich die Welt im Kopf?

Wege und Irrwege des Denkens über das Denken

139

#### Das Problem mit der Seele

Seit Jahrhunderten scheitern Denker an der Frage: Wie kommt das Ich in das Gehirn?

146

#### Die Welt der Assoziationen

150

#### Das Gehirn von A-Z

Die wichtigsten Begriffe aus der Hirnforschung

160

#### Enzyklopädie der Ignoranz

Vier renommierte Hirnforscher nehmen Stellung zu drei entscheidenden Fragen ihrer Disziplin

166

#### Vom denkenden Herzen zum fühlenden Hirn

170

#### Literatur

Wichtiges zu den Themen dieses Heftes

178

Titelfoto: Rainer Bald und Holocom GmbH

Redaktionsschluß: 9. 4. 1987



Das schönste Kompliment macht sich das Gehirn selber: Welch gewaltigen Aufwand es auf unsere Gedanken und Gefühle verwendet, läßt es uns überhaupt nicht spüren. Es gaukelt sich – wir gaukeln uns – vor, Bewußtsein sei eine Selbstverständlichkeit: »Ich denke, also bin ich.« Erst die Probleme der Wissenschaftler und Philosophen mit der Erklärung von Sinneswahrnehmung und Erinnerung, von Denken und Bewußtsein lassen die Komplexität des Gehirns ahnen. Seine Erforschung ist mehr als nur ein ungewöhnlich kniffliges wissenschaftliches Ratespiel – sie zielt zwangsläufig ins Zentrum der menschlichen Existenz

# DER KOSMOS IM KOPF

*Unser Gehirn: nur eine Handvoll*

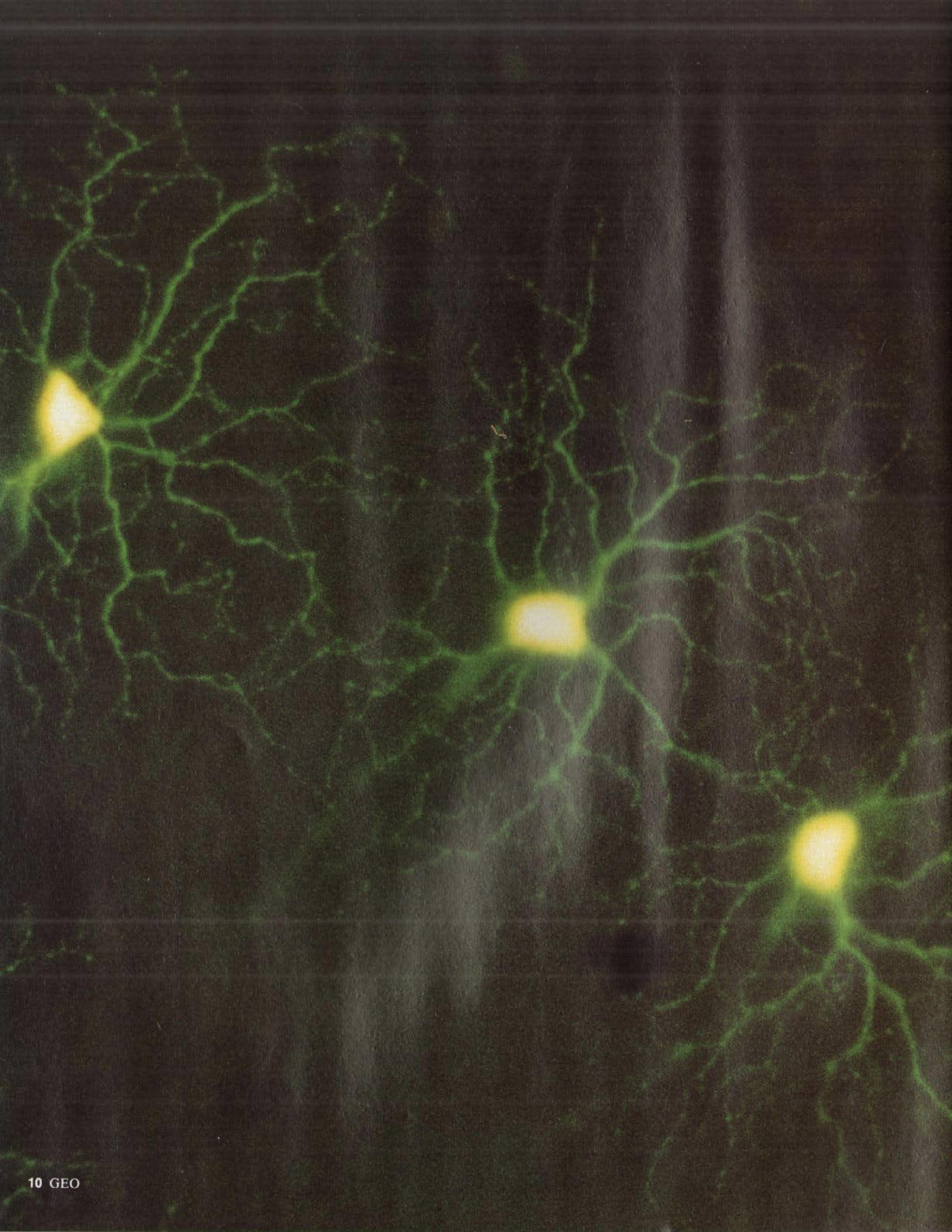






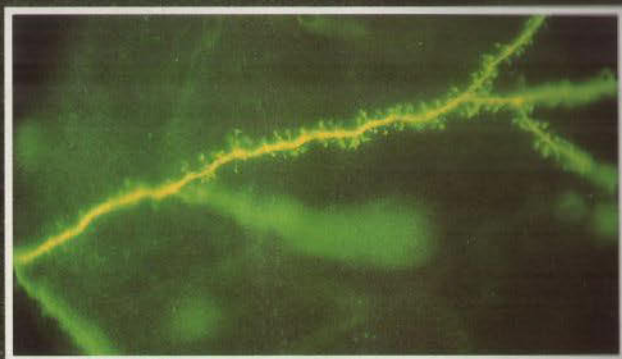
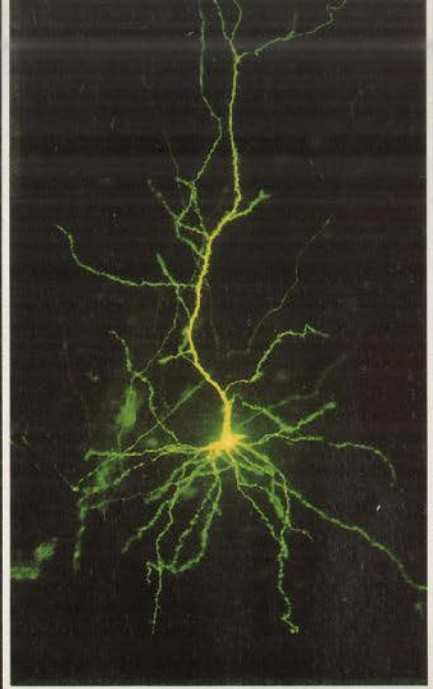
***Nervengewebe – und dennoch das wundersamste Stück Materie***



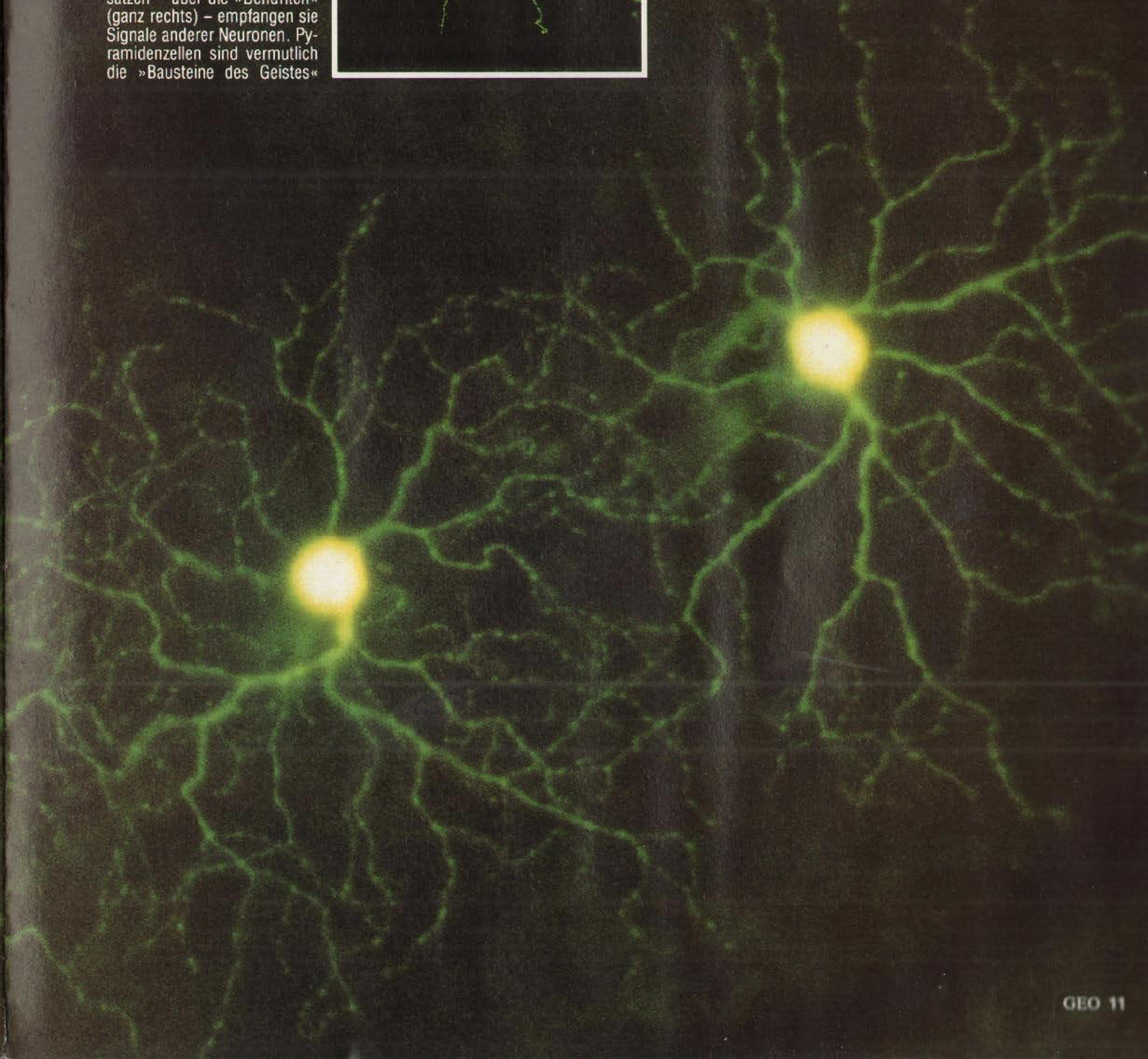





**L**ucifer Yellow« oder »Teufelsgelb« nennen die Forscher jene Substanz, die Nervenzellen bis in die feinsten Verästelungen färbt. So präpariert, können zum Beispiel die Ganglienzellen aus der Netzhaut einer Ratte (großes Bild) untersucht werden. Besonders großes Interesse der Neurowissenschaftler erregen die »Pyramidenzellen« (rechts) – so benannt nach der Form ihres Zellkörpers. Mit ihren vielfältig verästelten Fortsätzen – über die »Dendriten« (ganz rechts) – empfangen sie Signale anderer Neuronen. Pyramidenzellen sind vermutlich die »Bausteine des Geistes«



### ***Nervenzellen: Sterne im Universum des Geistes***







**G**ebettet auf seinen gelben Dottersack und umgeben von der Aderhaut reift ein Hühnerembryo heran – freilich nicht in der Eierschale, sondern in einem Glasgefäß: Herausgefunden werden soll, weshalb die aus der Netzhaut des embryonalen Auges (dunkler Fleck) herauswachsenden Nervenfasern ihre Partnerzellen tief im Gehirn so zielsicher finden. Da in einem so frühen Stadium die Entwicklung des zentralen Nervensystems bei Huhn und Mensch im Prinzip ähnlich abläuft, könnten die hier gewonnenen Erkenntnisse dazu beitragen, das Rätsel zu lösen, wie aus einem befruchteten Ei ein menschliches Gehirn mit seinen bis zu 100 Milliarden Neuronen erwächst

**Gehirnwachstum:  
Wenn Fasern ihre Partner  
suchen**





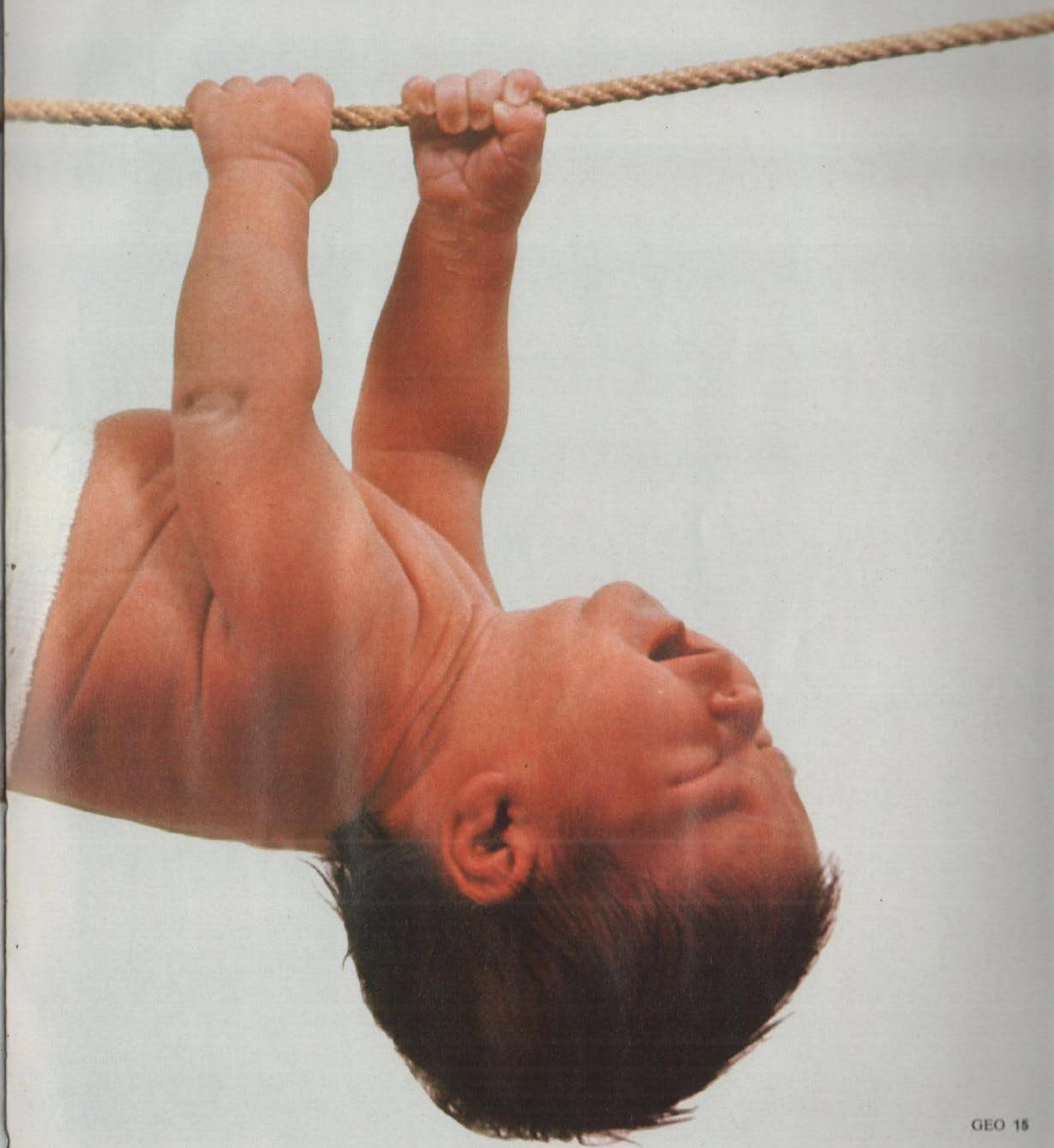




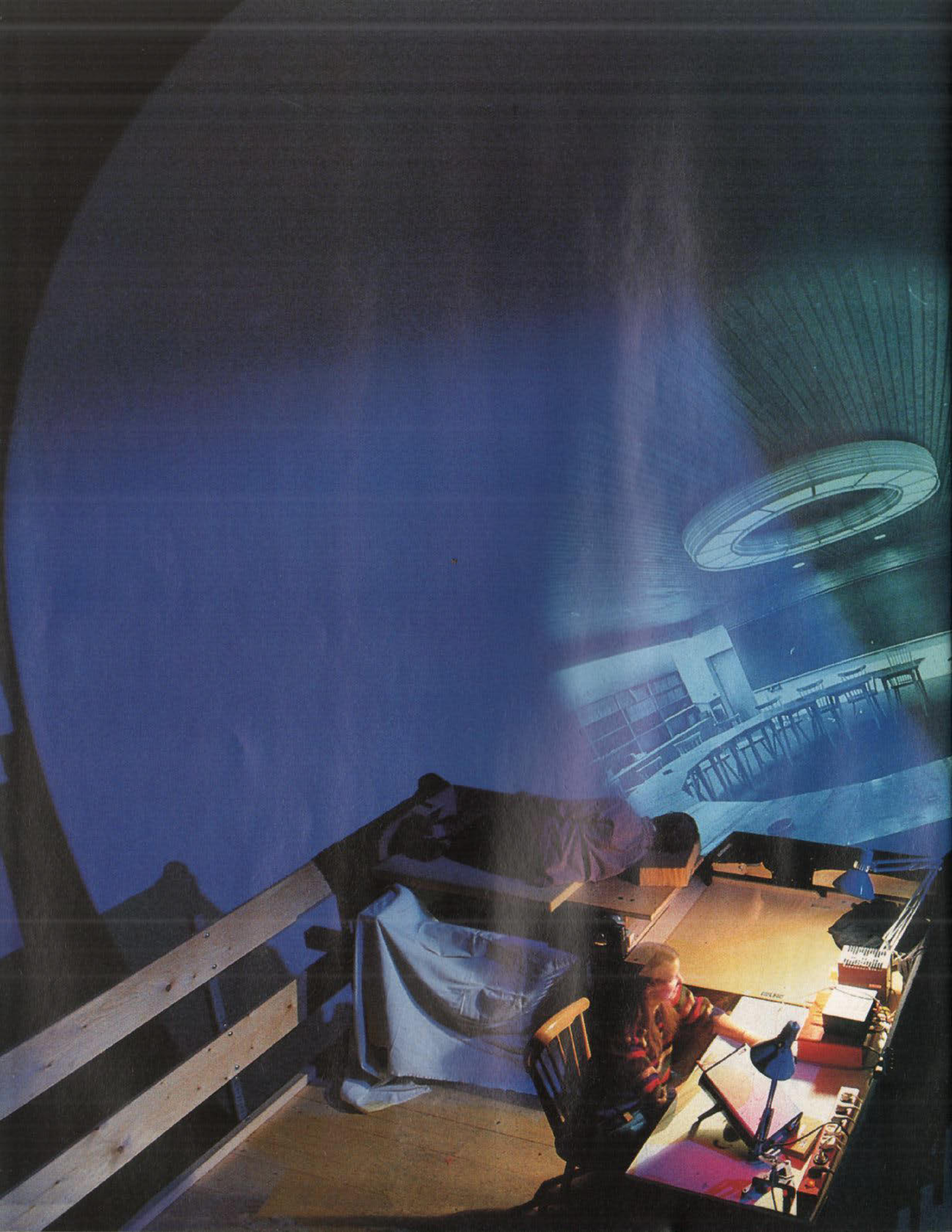
**V**öllig hilflos, so scheint es, kommen menschliche Kinder zur Welt. Doch der Schein trügt: Neugeborene können sich zum Beispiel an einem Seil festklammern. Wenige Tage nach der Geburt ist dieser »Greifreflex« freilich wieder verschwunden. In grauer Vorzeit diente er vielleicht den Neugeborenen dazu, sich im damals noch üppigen Fell ihrer Mutter festzuhalten. Das noch unreife Nervensystem eines Säuglings lernt die fremde Welt außerhalb des Mutterleibs rasch erkennen, in offenbar genetisch festgelegten Entwicklungsschritten. Dabei nimmt ein Baby eine Flut von Impressionen aus der Umwelt auf – und beeinflusst diese auf eine subtile Weise selber: Ein gesundes Baby lernt sehr schnell, mit welchem Verhalten es seinen Eltern eine für sich optimale Versorgung entlockt

**Greifreflex:  
Erinnerung an eine haarige  
Mutter**





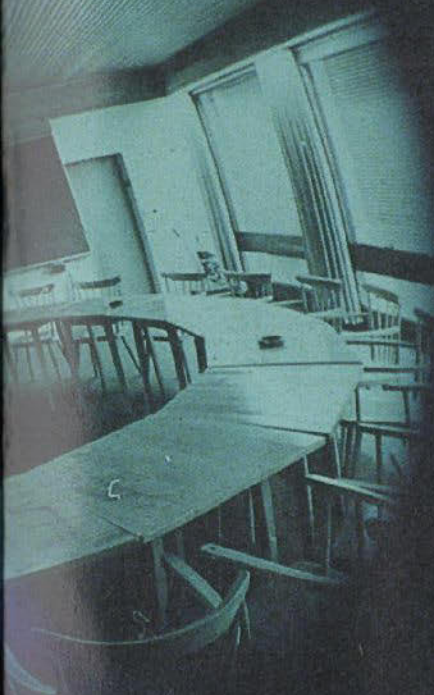






## Welt-Anschauung: Wo oben ist, bestimmt das Hirn

**H**art am Abgrund liegend, versucht ein Freiwilliger, das in eine riesige Halbkugel projizierte Bild mit Hilfe eines kleinen Steuerknüppels so hinzudrehen, daß es für einen stehenden Betrachter senkrecht wäre. Doch in der Seitenlage und ohne sonstige optische Hinweise gelingt das so gut wie nie. Das Hirn besitzt offenbar ein Gespür für »oben« in Richtung der Kopflängsachse, das mit der Schwerkraftwahrnehmung abgestimmt wird. Das klappt gut, wenn der Mensch aufrecht steht. Das Gefühl für die Senkrechte hat er auch, wenn er liegt – nur liegt er damit meistens falsch







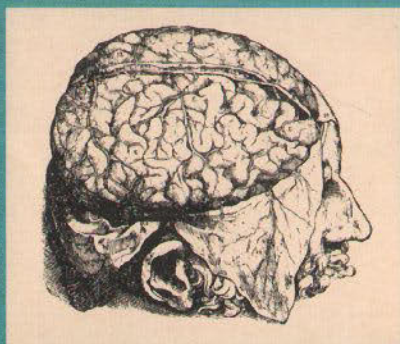




**T**rivial erscheint es uns, in einem menschlichen Gesicht zu »lesen«. In Wirklichkeit bewältigt das Gehirn dabei unglaublich komplexe Aufgaben: Es kann ein um Jahrzehnte gealtertes Gesicht fast immer wiedererkennen – oder nach einem einzigen Blick auf das Foto eines unbekannten Menschen aus einem fremden Kulturbereich mit großer Treffsicherheit bestimmen, ob dieser fröhlich oder traurig, verärgert oder verängstigt ist. Wie unser Denkorgan dies leistet, ist unbekannt. Wahrscheinlich steuern Gefühle unsere Aufmerksamkeit: Alle Denkleistungen werden emotional bewertet, wir können gar nicht emotionsfrei denken – weder als Astronaut im All noch als Betrachter dieses Fotos

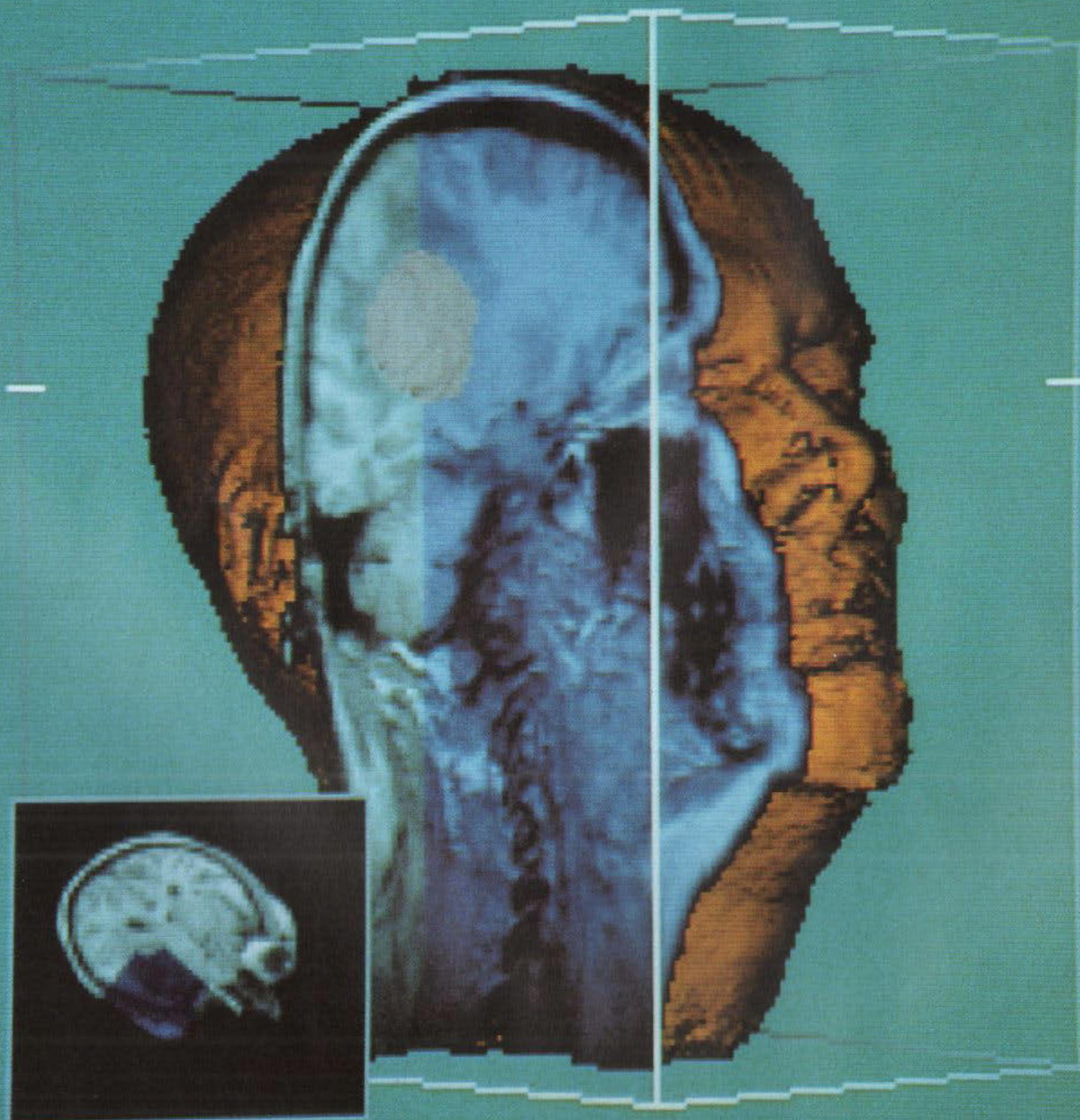
**Emotionen:  
Was wichtig ist, sagt  
das Gefühl**





**Z**wischen den beiden Hirnbildern liegen vier-  
einhalb Jahrhunderte:  
Zeichnungen aus dem  
Werk »De Humani Corporis Fa-  
brica« des Anatomen Andreas  
Vesalius – hier die eines frei-  
präparierten Gehirns – be-  
stimmten den Stil medizini-  
scher Illustrationen in der Re-  
naissance. Heute ermöglicht  
die Kombination aus »Kern-  
spin-Technik« und Computer  
sogar den Blick ins lebende  
Hirn: Im Kopf dieses Patienten  
sitzt ein – hier grau eingefärbter  
– Tumor. Das kleine Bild unten  
ist ein Querschnitt durch den ab-  
gebildeten Kopf in Höhe der bei-  
den Markierungen am Rahmen

## **Anatomie: Blick in das lebende Gehirn**







Synapse

Synapse

Stern-  
zelle

Gliazelle

Mikro-  
glia

Axonfortsatz einer Pyramidenzelle

Gliazelle

Kapillare,  
mit Gliazell-  
füßchen bedeckt

Synapse

Gliazelle

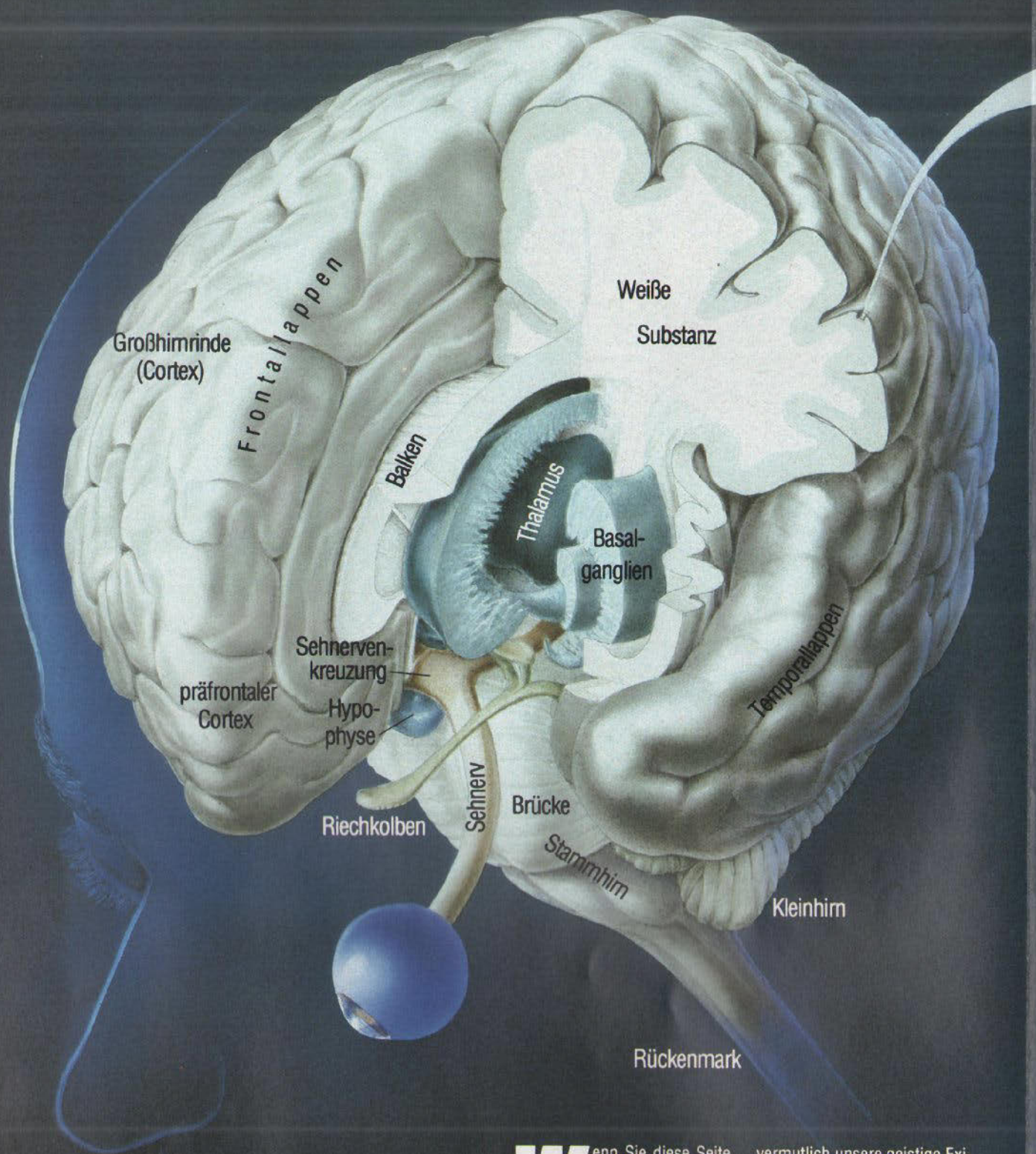
Synapse  
mit  
Vesikeln

Synapse

Dendrit einer Pyramidenzelle

dendritischer  
Dorn





**W**enn Sie diese Seite beim Lesen des Hefes aufgeklappt lassen, behalten Sie stets den Überblick über wichtige Regionen des menschlichen Gehirns: Der **Balken** verbindet die beiden Hemisphären der Großhirnrinde. Die **Basalganglien** sind an der Steuerung der Bewegungen beteiligt. Die **Brücke** besteht aus einem Wulst von Nervenfasern aus dem Kleinhirn. Dem **Cortex** des Großhirns, der grauen »Hirnrinde«, verdanken wir

vermutlich unsere geistige Existenz. Der **Frontallappen** ist der vordere Teil des Cortex. Die **Hypophyse** schüttet Hormone aus. Das **Kleinhirn** sorgt für die Feinsteuerung unserer Bewegungen. Das **Rückenmark** regelt autonom viele Reflexe und vermittelt zwischen Hirn und Körper. Das **Stammhirn** reguliert vor allem entwicklungsgeschichtlich alte, »primitive« Hirnfunktionen wie Atmung und Herzschlag. Der **Thalamus** – eine zentrale Umschaltstation – ist das »Tor des Bewußtseins«



I  
II  
III  
IV  
V  
VI

Schichten des Cortex

Blut-  
kapillare

Glia-  
zelle

Stern-  
zelle

Gliazelle  
umhüllt Axone

Basaldendrit

Pyramiden-  
zelle

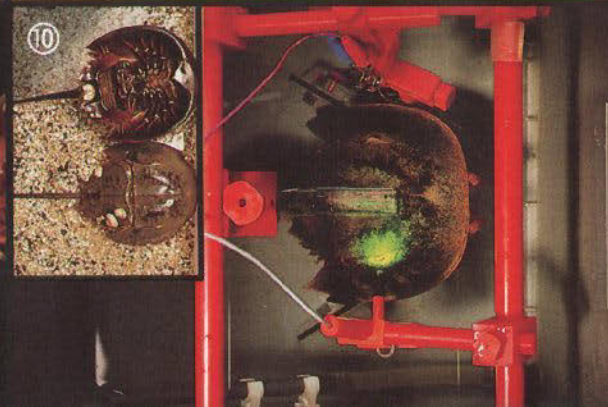
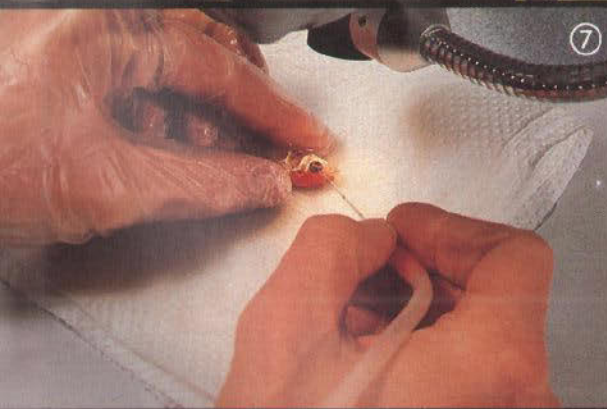
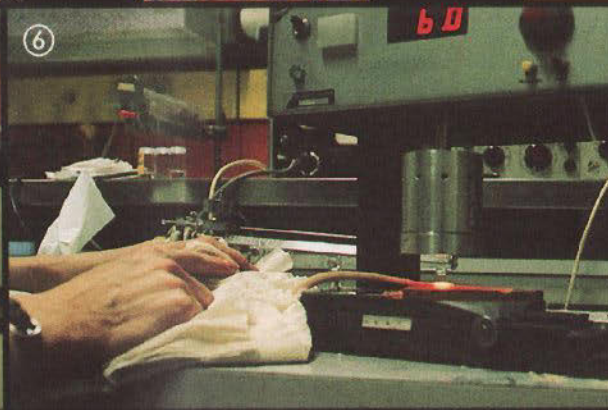
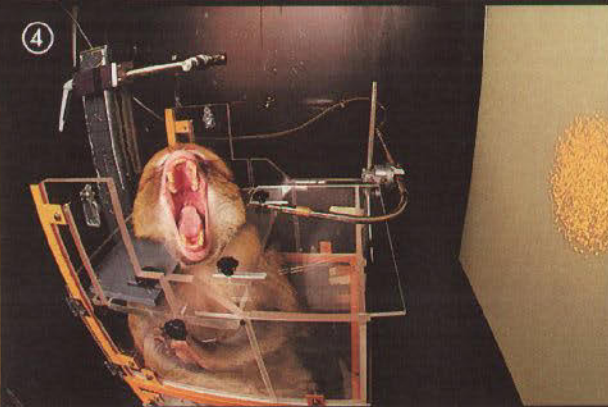
Martinotti-  
zelle

Axon

**Hirnrinde:  
Im Dschungel des  
Cortex wuchern die  
Synapsen**

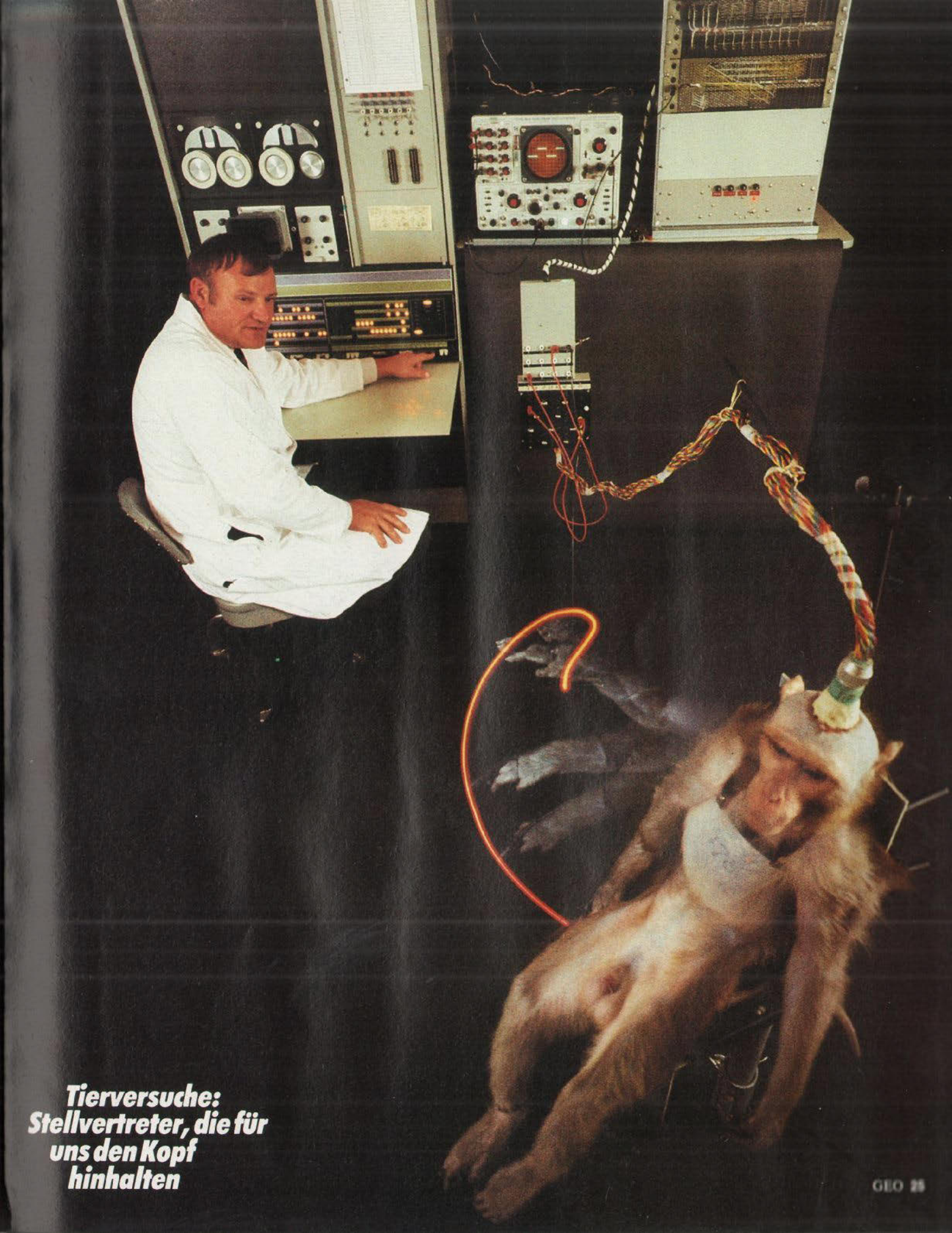
Als würde ein winziges Stück Gewebe aus der menschlichen Hirnrinde mit einer Gummilinse ins Riesenhafte vergrößert: So haben die Illustratoren Rüdiger Himmelhan und Jörg Kühn ihren Blick ins Universum der Nervenzellen angelegt. Das Panorama des Gehirns beginnt mit dem Kopf links – so, wie Anatomen unser Denkkorgan mit seinen bis zu 100 Milliarden Nervenzellen sehen. Das Seziermesser enthüllt in dem Nervengewebe der Hirnrinde freilich ebensowenig das Geheimnis des menschlichen Geistes, wie es ein Blick durch das Lichtmikroskop vermag: Ihm entspricht in unserem Panorama etwa der Anschnitt des Hirngewebes mit den sechs »Schichten des Cortex« (oben), deren Architektur eine Grundvoraussetzung für die gesamte Hirnfunktion ist. Auch bei rund hunderttausendfacher Vergrößerung, wie sie ein modernes Elektronenmikroskop bietet und wie es der rechte Teil des Panoramas wirklichkeitsgetreu nachempfunden, macht sich der Geist nicht bemerkbar, sondern ist nur als ein Gewirr von Nervenzellen, Axonen, Dendriten und Synapsen zu sehen





**S**echzig haarfeine Elektroden wurden dem Rhesusaffen auf dem Experimentierstuhl in verschiedene Bereiche seines Gehirns gepflanzt. Über jede Elektrode können die Forscher mit leichten, nur eine Tausendstelssekunde dauernden Stromstößen ein bestimmtes Hirngebiet reizen. Wird die Reizschwelle überschritten, hebt der Affe, wie die mehrfach belichtete Aufnahme zeigt, den rechten Arm. Mit solchen Experimenten versuchten amerikanische Forscher herauszufinden, wie das Gehirn Einzelaktionen zu komplexen Verhaltensmustern integriert. Solche Versuche decken ein unüberwindbares Dilemma der experimentellen Hirnforschung auf: Die interessantesten Gehirne – die menschlichen – können aus guten ethischen Gründen nicht experimentell untersucht werden, Zellkulturen aber definitionsgemäß nicht die Eigenschaften funktionierender Nervenetzwerke haben. Und an einfach gebauten Tieren wie Schnecken lassen sich »höhere« Hirnfunktionen nicht studieren. So haben auch Affen als Stellvertreter des Menschen buchstäblich ihre Köpfe hinzuhalten – so bei Untersuchungen mit einem »PET«-Tomographen, der Scheibenbilder aus dem lebenden Hirn liefert ①, im Verhaltenstest für Affenbabys mit »künstlicher Mutter« ② oder – wie dieser Pavian – bei Untersuchungen des optischen Wahrnehmungsvermögens ④. Katzen dienen Forschern als »Modell« für Studien, wie sich das Sehsystem entwickelt ⑧. Ratten werden für Lerntests ⑤ und Schmerzmittel-Versuche ⑥ gebraucht. Einfachere neuronale Prinzipien lassen sich an Fröschen ③, Fischen ⑦ und den uralten Pfeilschwanzkrebsen ⑩ erforschen. Standard-Versuchstier für das Studium primitiver Lernvorgänge ist die Meeresschnecke »Aplysia« ⑨.





**Tierversuche:  
Stellvertreter, die für  
uns den Kopf  
hinhalten**

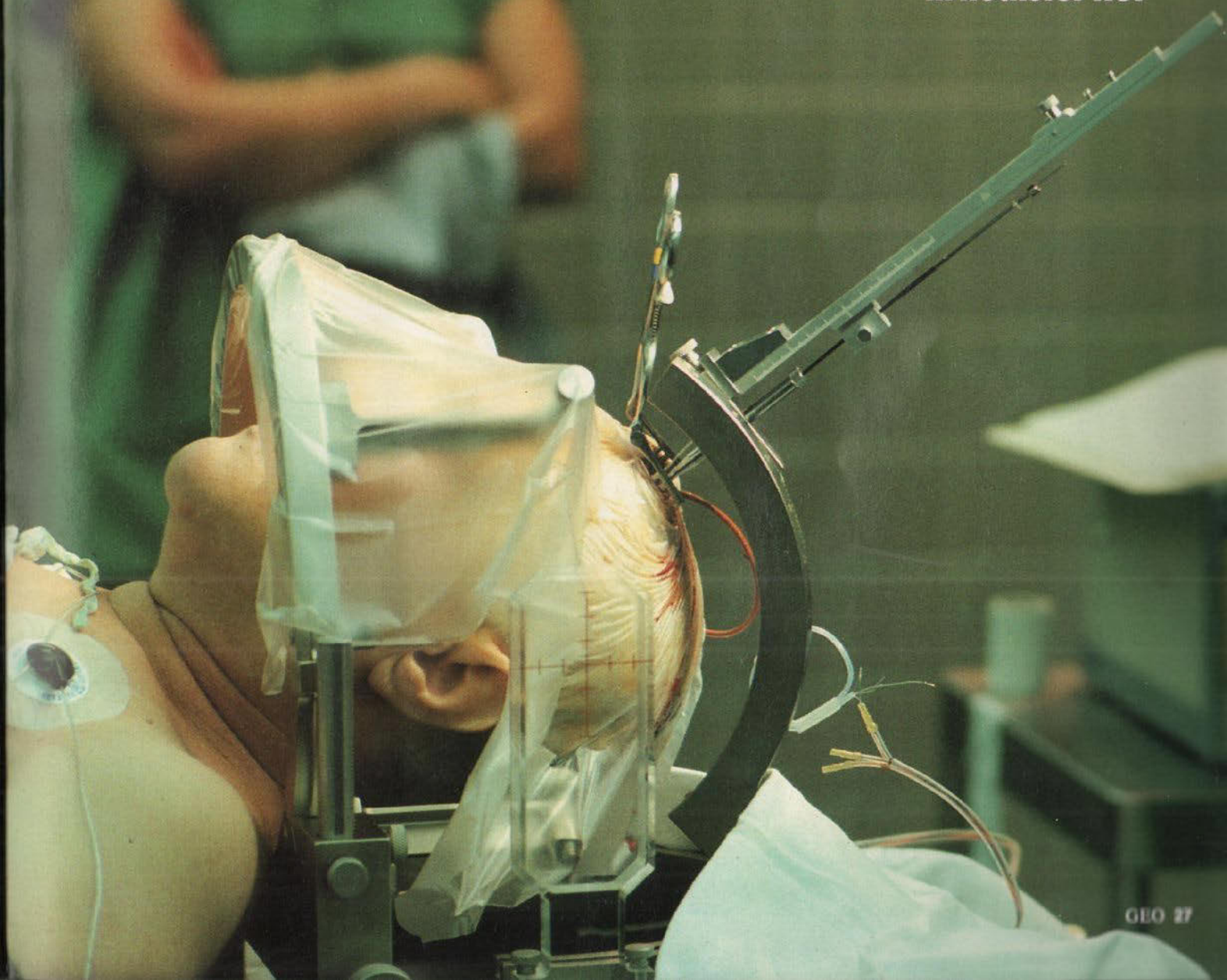






**B**evor Neurochirurgen spezielle Zielgeräte auf den Schädel eines Patienten schrauben (unten), haben sie mit modernsten diagnostischen Techniken den Ort der Hirnerkrankung – einen Tumor oder ein verstopftes Blutgefäß – genau bestimmt. Das erlaubt den Ärzten präzise, nicht selten lebensrettende Eingriffe. Aufschluß über die Tätigkeit des Denkkorgans gibt die Aufzeichnung elektrischer Hirnströme an der Kopfhaut (links). Ein solches Elektroenzephalogramm (EEG) wird stets von mehreren Hirnregionen gleichzeitig abgeleitet. Ein Spezialhelm legt die Position der einzelnen, auf der Kopfhaut klebenden Elektroden exakt fest

**Neurologie:  
Chirurgen als Helfer  
in höchster Not**











**Psychiatrie:  
Wenn das Hirn die  
Hand aufhält**

**F**reude darüber, mit den eigenen Händen malen zu können, strahlt aus dem Gesicht dieses psychisch kranken Menschen, Mitglied der Hamburger Künstlergruppe »Die Schlumper«. Mit den Händen schaffen ist nicht nur Beschäftigungstherapie für geistig Behinderte. Die äußerst präzise Koordination von Hand und Hirn ist vielmehr eine elementare menschliche Eigenschaft: Sie erst machte den Aufstieg des Homo sapiens möglich



**Das alte Weltbild  
der Hirnforschung ist erschüttert.  
Wie wird die Flut neuer Erkenntnisse  
unser Selbstverständnis  
beeinflussen?**

# ...also bin ich

**A**ls Almut Steinhausen zur Bratsche griff, waren die gelehrten Dispute um die Moleküle des Gehirns vergessen. Zwei Tage lang hatten sich fünf Dutzend Neurobiologen auf der „Internationalen Titisee-Konferenz“ die Köpfe darüber heiß geredet, was denn die vielen neuentdeckten Botenstoffe im Gehirn zu bedeuten hätten. Das Bild, so war zu hören, sei „zunehmend komplizierter“ geworden. Aber auch faszinierender: Kaum ein Forscher konnte seinen Blick zum See hinaus abschweifen lassen, der still im milden Oktoberlicht ruhte. Rollos runter, „das nächste Dia bitte“.

Nun, am Freitagabend, sollte unsere Aufmerksamkeit vom molekularen Detail auf Musik gelenkt werden. Die junge Frau im dunkelblauen Abendkleid schüttelte noch einmal ihr langes blondes Haar, hob das Instrument ans Kinn und begann mit geschlossenen Augen zu spielen.

Der erste Satz von Paul Hindemiths „Sonata für Bratsche allein“ hatte uns kaum in die Klangwelt entführt, als sich eine Frage in mein Bewußtsein drängte: Was geht hier vor?

Wir hören Hindemith.

Schön. Aber eigentlich dringen doch nur jene Schallwellen an unser Ohr, die Almut Steinhausen mit dem Bogen auf den Saiten ihrer Bratsche virtuos erzeugt? Woher wissen denn ihre Arm- und Handmuskeln zu jeder Zehntelsekunde exakt, was sie zu tun haben? Und wie kann sie diese in Notenschrift eingefrorenen Gefühle wieder zum Leben erwecken? Wie viele Millionen Nervenimpulse, wie viele Milliarden Moleküle bewegt Almut's Gehirn in jeder Sekunde, damit ein paar Schallsignale an unsere Ohren dringen?

Fragen über Fragen. Und dann: Wie verwandelt mein Gehirn die Bratschenklänge in freudige oder traurige Gefühle? Was geschah in Hindemiths Hirn, als er dieses Stück komponierte?

Wer sich aufmacht, hinter die Geheimnisse des Gehirns zu blicken, hat

sozusagen ein Freilos für Überraschungen. Plötzlich, ohne Vorwarnung, meldet sich das Organ selbst und sagt – in meinem Kopf, in Ihrem Kopf – „Hallo, das bin ja ich!“

Welch ein Kosmos öffnet sich da: Musik und Moleküle, Neugierde und Neurotransmitter, Sex und Synapsen, Angst und Acetylcholin, private Erinnerungen und evolutionäre Erfahrung – kurzum, unsere intimsten Regungen ebenso wie die weitestreichenden Ideen sind Aktionen unseres Gehirns.

Kein Wunder, daß Neurophysiologen wie der Amerikaner William Calvin ins Schwärmen geraten: „Gehirne sind die am elegantesten organisierten Materie-Ansammlungen des Universums.“ Wie schafft es aber diese äußerlich unansehnliche, gewöhnlich knapp drei Pfund schwere Schwabbelmasse im Schädel, sich als ein eigener, sozusagen privater Kosmos zu gerieren? Eine erste Antwort ist: die große Zahl. Manche Wissenschaftler spekulieren, wie Calvins Kollege Barry Jacobs erzählt, „daß die mögliche Zahl der Verbindungen, die von den 100 Milliarden Nervenzellen geknüpft werden könnten, größer ist als die Zahl der Atome im Universum“.

Von alledem ahnen wir im Alltag so gut wie nichts. Die Myriaden allerfeinst abgestimmter Stoffwechselvorgänge werden niemals auf der Ebene der Gefühle und Gedanken bewußt wahrgenommen. Im Gegenteil: Wie eine verwöhnte, selbstgefällige Märchenprinzessin thront unser Geist über einer biologischen Dienerschaft, die diskret und scheinbar mühelos das ausführt, was uns gerade in den Kopf kommt.

Sie wollen diesen Text weiterlesen? Bitte schön. Oder doch lieber blättern? Voilà! Vom nächsten Urlaub träumen? Kein Problem.

So würden wir uns gern sehen: als freie Geister. Doch die Freiheit, be-

wußt denken zu können, hat einen hohen Preis – unter anderem die Kenntnis von der Endlichkeit unserer eigenen Existenz. Unser Gehirn mag zwar das komplizierteste Organ der Natur sein, fähig zum Entfesseln atomarer Kräfte wie zur Enträtselung des Weltalls. Aber es ist mehr als jedes andere Organ auf ständigen Sauerstoffnachschub angewiesen: Wenige Minuten ohne Luft, und der Kosmos im Kopf wird reduziert zu einem Milliarden-Neuronen-Chaos.

Zwischen unbegrenzter Phantasie und schnellem Hirntod liegt das Spektrum menschlicher Erfahrungen, liegen Freud und Leid. Die Ursachen menschlichen Leids sind im Gehirn nicht immer so sichtbar wie bei Boxern oder bei den Opfern von Motorradunfällen. Schlaganfälle und Hirntumoren zum Beispiel, die der Bonner Neurophysiologie-Professor Detlef

Linke „Versuche der Natur am Menschen“ nennt, verändern auf oft teuflische Weise die Persönlichkeit. So können Störungen des Sprachvermögens – Aphasien – einen Menschen zu einer Art intellektueller Einzelhaft im eigenen Kopf verurteilen – bei vollem Bewußtsein.

Nicht immer bleibt das Entsetzen auf den Patienten und dessen Angehörige beschränkt. Vom früheren amerikanischen Präsidenten Woodrow Wilson wird berichtet, daß er nach dem Ersten Weltkrieg als Befürworter einer gemäßigten Haltung gegenüber dem Deutschen Reich zur Konferenz der Siegermächte nach Paris fuhr. Doch dort verließ er abrupt seine zuvor strikt verteidigte politische Linie und schwenkte auf den harten Kurs Frankreichs über. Wie sein engster Berater bemerkte, hatte sich sozusagen über Nacht Wilsons Persönlichkeit gravierend verändert – vermutlich aufgrund eines leichten Schlaganfalls. Die Folgen: Versailler Vertrag, Reparationen etc.

**Größer  
als die Zahl der  
Atome im  
All**



Was könnte uns heute bei ähnlicher Veränderung einer Persönlichkeit im Weißen Haus oder im Kreml drohen?

Von alltäglicheren Katastrophen wissen Psychiater, Physiologen und Hormonforscher zu berichten: Da treiben Störungen in der Steuerung des Hormonsystems durch das Gehirn junge Menschen in den Selbstmord; da zerstört ein geringfügiges Defizit eines Botenstoffes im Gehirn die Persönlichkeit eines Individuums.

Aber auch das, was wir Freude nennen, ist ein Produkt unseres Gehirns, und zwar nicht nur bei so essentiellen Lebensfunktionen wie Essen, Trinken und Sex. Auch jeder Geistesblitz wird von einem positiven Gefühl begleitet – vergleichbar etwa der Befriedigung eines Hirnforschers über ein gelungenes Experiment.

Solche Lust sagt freilich nichts aus über den Wert der neuen Erkenntnisse. Die Geschichte der Hirnforschung liest sich bisweilen wie die Aufzählung teils grotesker Fehleinschätzungen: das Hirn als Kühlorgan des denkenden Herzens. Die in Gramm und Kubikzentimeter vermessene „Intelligenz“. Das

Dunkelangst-Molekül. Die „Großmutterzelle“. Und, noch immer in chiptrunkenen Köpfen spukend: der elektronische Rechner als Modell menschlicher Denkvorgänge.

Spott ist jedoch nicht angebracht, schon gar nicht, wenn – wie bei der Hirnforschung – Objekt und Subjekt eins sind. Niemand weiß, ob es prinzipielle Grenzen der Erkenntnis gibt, die es einem Menschenhirn verwehren, ein Menschenhirn zu verstehen. Den Naturwissenschaften gelingt es freilich zusehends, jene Voraussetzungen aufzudecken, unter denen menschliche Gehirne entstehen und funktionieren können.

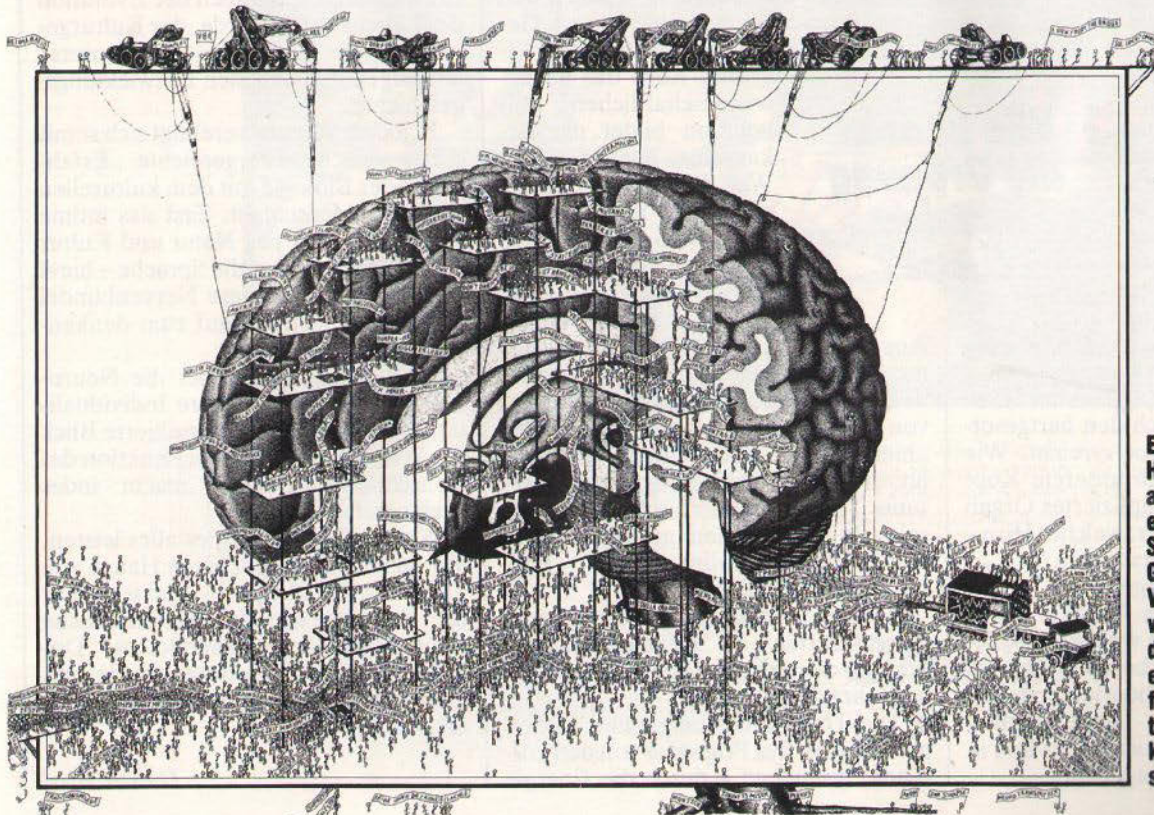
Hier bahnt sich eine Revolution an. Das alte, statische Bild des Hirns ist nicht länger haltbar. Die Forscher interessieren sich heute mehr für die Dynamik von Vorgängen als für statische Strukturen: Wie organisieren sich die Nervenzellen im Embryo zu einem funktionsfähigen Gehirn? Was geschieht

bei der Kommunikation der Nervenzellen? Wie nimmt das Gehirn über die Sinnesorgane Informationen aus der Umwelt auf, wie vergleicht es die Flut der Eindrücke mit seiner Erfahrung, wie formt es seine Reaktionen und Aktionen? Kurz: Wie denken wir?

Bis vor wenigen Jahren konnten die Naturwissenschaftler mit ihrer „harten“, gleichsam „von unten“ an das Problem herangehenden Methodik kaum bessere Theorien über die Funktion des menschlichen Gehirns anbieten als ihre Kollegen aus den „weichen“, von oben her in den Tiefen des Geistes herumstochernden Fächern der Psychologie, Sprachwissenschaft und Philosophie. Doch inzwischen haben sich verschiedene naturwissenschaftliche

Fachdisziplinen zur interdisziplinären „Neurowissenschaft“ zusammengeschlossen, einem mit den Vorgängen in Nervensystemen befaßten Zweig der Biologie. Parallel dazu gewinnt die „kognitive Psychologie“, die Wissenschaft

## Am Menschen experimentiert die Natur



Ein Heer von Hirnforschern wuselt amesengleich um ein gigantisches Gehirn: So sieht der Göttinger Grafiker Uwe Brandt die Versuche der Neurowissenschaftler, Details des Denkkorgans zu enträtseln. Wie aber fügen sich die Einzelheiten zu einer wirklichkeitsnahen Gesamtschau?



vom Denken und Erkennen, im traditionell zersplitterten Fachbereich der Seelenkundler an Boden. Und beide haben begonnen, sich gegenseitig zu befruchten.

Im Herbst 1986 zogen Neurowissenschaftler bei zwei Anlässen Zwischenbilanz. Rund 10 000 Hirnforscher kamen zum Jahrestreffen der „Society for Neuroscience“ in die amerikanische Hauptstadt Washington. Zur gleichen Zeit erschien die 100. Ausgabe der internationalen Fachzeitschrift „Trends in Neuroscience“, kurz TINS genannt.

In Washington erhielten die Konferenzteilnehmer unter anderem eine zweibändige Sammlung der „Abstracts“ – der Kurzfassungen von Forschungsberichten – ausgehändigt. Sie rafft auf 1585 Seiten die Ergebnisse von insgesamt 6178 Vorträgen und „Poster“ zusammen. „Vielfältigkeit“, kommentiert TINS-Chefredakteur David Bousfield, „ist eines der Gewürze der Neurowissenschaft“.

Bousfield hatte gut zwei Dutzend Experten gebeten, für die TINS-Jubiläumsausgabe den explosiven Erkenntnisfortschritt im jeweiligen Fachgebiet während des vergangenen Jahrzehnts zusammenzufassen. Diese Flut von Ergebnissen zwingt die Neurobiologen, von allzu simplen Erklärungen Abschied zu nehmen. Die gewaltige Zunahme der Faktenkenntnis wird begleitet von einer rapide größer werdenden Zahl der Nerven- und Hirnforscher – in nur 15 Jahren von wenigen Tausend auf heute weltweit über 30 000. Das führt, so Bousfield, zu „schweren Wachstums-

schmerzen“ der noch jungen Disziplin „Neurowissenschaft“. Eigentlich müßten die Hirnforscher viel mehr mit ihren Kollegen aus angrenzenden Fachbereichen sprechen. Aber wie soll das geschehen, wenn sich – wie bei der Tagung in Washington – an einem einzigen Tag 108 Seminare und Vorlesungen drängen?

Da hat die Janusköpfigkeit der Hirnforschung endlich auch den hartgesottesten Experimentator erreicht. Wie schmeichelhaft, daß in unserem Kopf ein so wunderbar kompliziertes Organ sitzt. Aber wer – besser: welches Hirn – soll das alles noch überschauen?

Fragen, Fragen, Fragen.

Aus den chaotischen Wirbeln dieser Flut an Details führen wohl nur größere, kanalisierende Theorien heraus. Unter dem Begriff Theorie verstehen Naturwissenschaftler experimentell überprüfbare („falsifizierbare“) und in sich logische Gedankengebäude.

Mangels tieferer Einsicht hängt jede Generation von Wissenschaftlern lange an „modischen“ Erklärungen. Der Siegeszug der Mikroelektronik legte das Modell eines „biologischen Computers“ nahe: Nervenzellen als „Hardware“, Erfahrungen als „Software“. Aber so, das mußten Neuro- und Computerwissenschaftler leidvoll erfahren, kommt Geist weder ins Hirn noch in irgendeine Maschine – noch nicht einmal das, was wir „Intelligenz“ nennen.

Dann erregte ein biochemisches Modell die Hirnforscher: ein Molekül für jede Erinnerung, für jeden Gedanken. Abertausende von Ratten, Mäusen und Fischen mußten für die Erhärtung dieser Theorie ihre Gehirne opfern – vergebens.

Inzwischen sollen „Systemtheorien“ das Durcheinander in den Köpfen der Hirnforscher ordnen. Ob damit die schwierigste Frage der Wissenschaft beantwortet werden kann, muß sich zeigen: Wie kommen Bewußtsein und Gehirn zusammen? Wie kommt es, daß wir mit René Descartes sagen können: „Ich denke, also bin ich“?

Beiträge zur Festigung der neuen Theoriegebäude lieferten so unterschiedliche Wissenschaftsdisziplinen wie die Physik und die Mathematik, die Evolutionsbiologie und die Soziologie. Sie nähren die Hoffnung, endlich den grundlegenden Eigenschaften von Gehirn und Geist auf der Spur zu sein.

Den Kern der neurowissenschaftlichen Revolution bildet die Erkenntnis, daß in dieser Welt das Spiel mit Naturgesetzen, Kräften und Materiebausteinen prinzipiell zu neuen, nicht vorhersagbaren Ordnungszuständen führt:

Aus Elementarteilchen konnten Atome, aus diesen Moleküle, aus diesen lebende Zellen entstehen. Jeder Sprung von einer niedrigeren auf eine höhere „hierarchische Ebene“ war eine Revolution in der Entwicklung des Universums. Diese hierarchischen Ebenen spiegeln sich in den großen wissenschaftlichen Disziplinen wider – Physik, Chemie, Biologie:

Wie der Wandel vom Einfachen zum Komplizierten im Prinzip ablaufen könnte, deutete sich in den beiden letzten Jahrzehnten an:

● Die Theorie des belgischen Nobelpreisträgers Ilya Prigogine von den „offenen Systemen“ – durch die Energie

fließt, wie zum Beispiel bei den Lebewesen – zeigte, daß Neues in diesem Universum grundsätzlich möglich ist.

● Die „Lehre von den Zusammenhängen“ – die Synergetik – des deutschen Physikers Hermann Haken besagt, daß dieser Trend zu Neuem nicht etwa das Chaos, sondern geradezu zwangsläufig eine neue Ordnung schaffen muß.

● Der amerikanische Physiker Mitchell Feigenbaum und andere Naturwissenschaftler fanden heraus, daß der Weg vom Chaos zur Ordnung – und umgekehrt – offensichtlich bestimmten Gesetzmäßigkeiten folgt.

Und nun sind die Hirnforscher dabei, diese Ideen auf „ihrer“ hierarchischen Ebene zu testen – im menschlichen Gehirn. Ihre Stichworte lauten „Selbstorganisation“ und „Emergenz“, „Synaptogenese“ und „Epigenese“. Hinter diesen mysteriösen Begriffen verbergen sich Vorstellungen darüber, wie es ein Lebewesen, genauer: wie es unser Gehirn vollbringt, ein so buntes und dabei wirklichkeitsnahes Bild von der Welt zu gewinnen.

Wenn wir – Sie, liebe Leserin, lieber Leser, und ich – mit Hilfe von etwas bedrucktem Papier ziemlich mühe-los kommunizieren können, so ist dies das Ergebnis von drei sehr unterschiedlichen, jeweils historisch einmaligen Entwicklungen, nämlich der Evolution des Lebens auf der Erde, der Kulturgeschichte der Menschheit und unserer jeweiligen individuellen Entwicklungsgeschichte.

In jedem von uns vereinigt sich somit die genetisch weitergereichte „Erfahrung“ der Biologie mit dem kulturellen Erbe der Menschheit. Erst das intime Zusammenspiel von Natur und Kultur – und hier vor allem die Sprache – hievt das drei Pfund schwere Nervenbündel in unserem Kopf hinauf zum denkenden, bewußten Gehirn.

So liefert ausgerechnet die Neurobiologie Belege für unsere Individualität. Der erste wirklich detaillierte Blick der Wissenschaftler in die Funktion des menschlichen Gehirns macht indes auch bescheiden:

Was muß unser Körper alles leisten, nur damit wir bewußt einen Hauch von Freiheit spüren können – und sei es nur die Freiheit, wie der amerikanische Evolutionsbiologe Theodosius Dobzhansky einmal spottete, als einziges Tier nicht aus seinen Fehlern lernen zu müssen. □

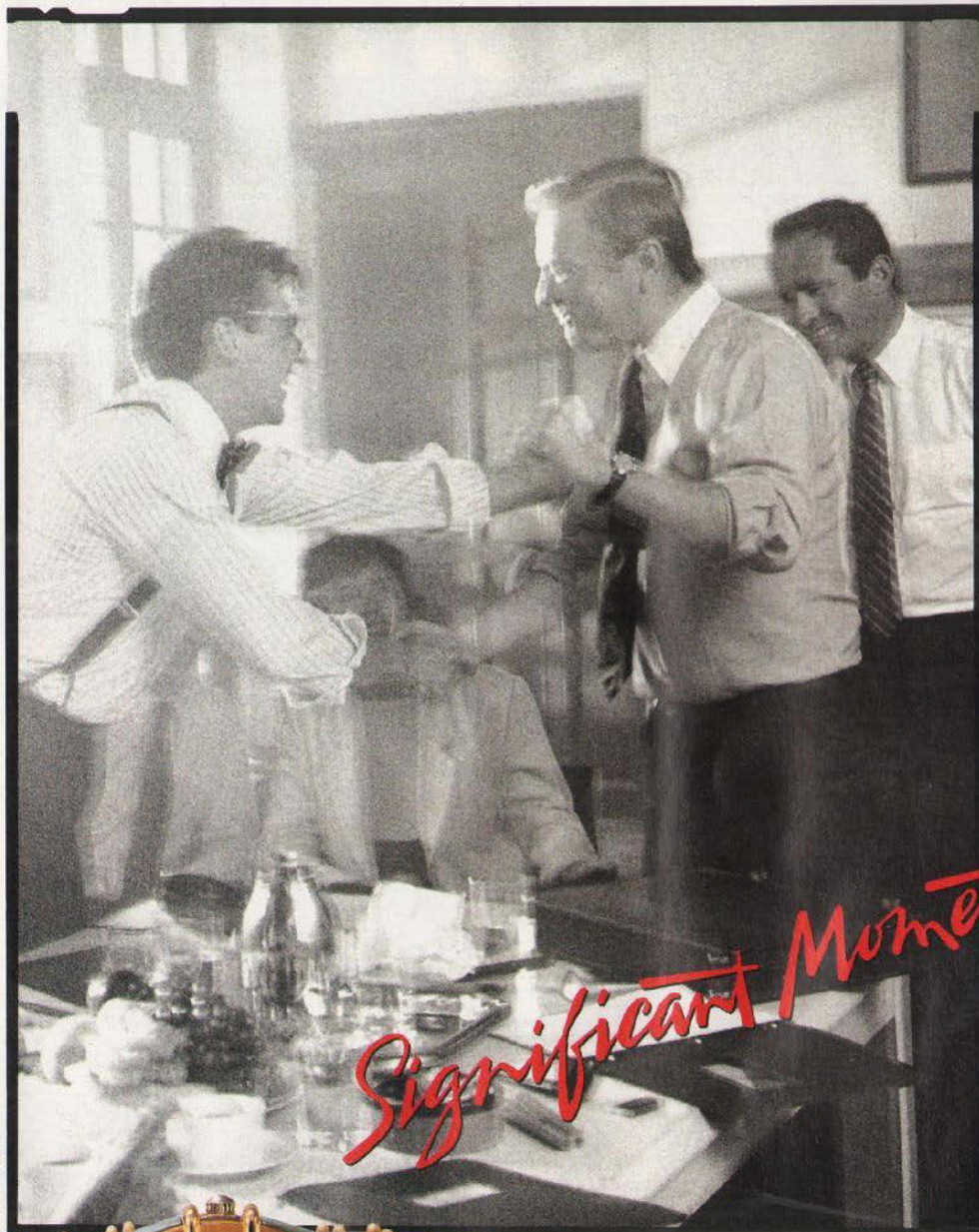
Günter Haaf

**Damit  
wir einen Hauch  
von Freiheit  
spüren**

**Wie kommt  
die Ordnung  
aus dem  
Chaos?**



DER MOMENT, AUF DEN SIE GEWARTET HABEN. DER AUGENBLICK, IN DEM SICH DER ERFOLG EINSTELLT. OMEGA. FÜR DIE FASZINIERENDEN MOMENTE DES LEBENS, DIE UNVERGESSLICH BLEIBEN.



*Significant Moments*



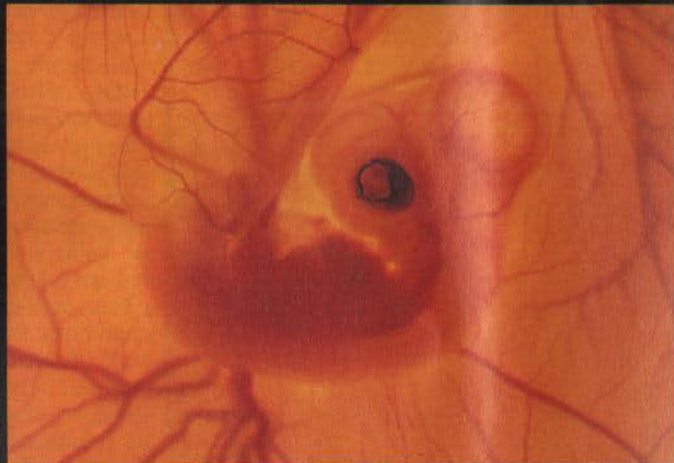
OMEGA. FÜR JENE MOMENTE, DIE ZUM EREIGNIS  
WERDEN. IN DER GESCHICHTE DER OLYMPIADE  
IN DER RAUMFAHRT. IN IHREM LEBEN.  
OMEGA CONSTELLATION. FÜR SIE UND IHN.

Ω  
OMEGA



# Auf den Spuren der Axone

Im Embryo entstehen pro Minute 250 000 neue Nervenzellen.



Der Geist fällt nicht vom Himmel: Er entspringt dem menschlichen Gehirn – und dieses entwickelt sich wie der übrige Körper aus einem befruchteten Ei. Wie das geschieht, wollen Wissenschaftler bei der Erforschung des embryonalen Wachstums erfahren. Da Versuche an lebenden menschlichen Keimlingen – rechts ein sechs Wochen alter Embryo – ethisch nicht zu rechtfertigen wären, studieren sie heranreifende tierische Nervensysteme: an einwöchigen Hühnerembryos etwa, die aus Eiern in offenen Glasschalen erbrütet werden. Denn der junge Embryo eines Huhns hat noch viel gemein mit dem eines Menschen – eine Erinnerung an die gemeinsame evolutionäre Vergangenheit. So hoffen die Forscher, am Tier die Bausteine auch unseres Hirns zu begreifen und die Prinzipien, nach denen sie sich zur »Zitadelle« des menschlichen Geistes fügen

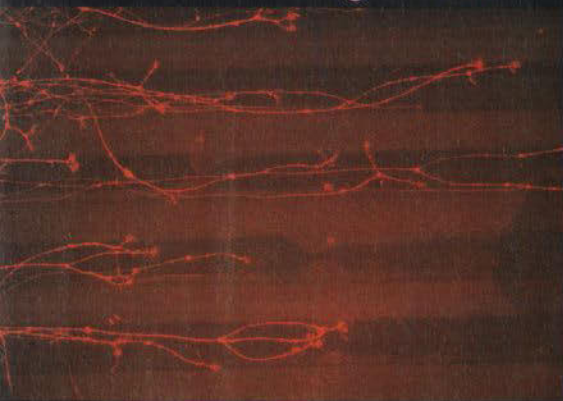


*Wie verknüpfen sie sich zu einem Gehirn?*

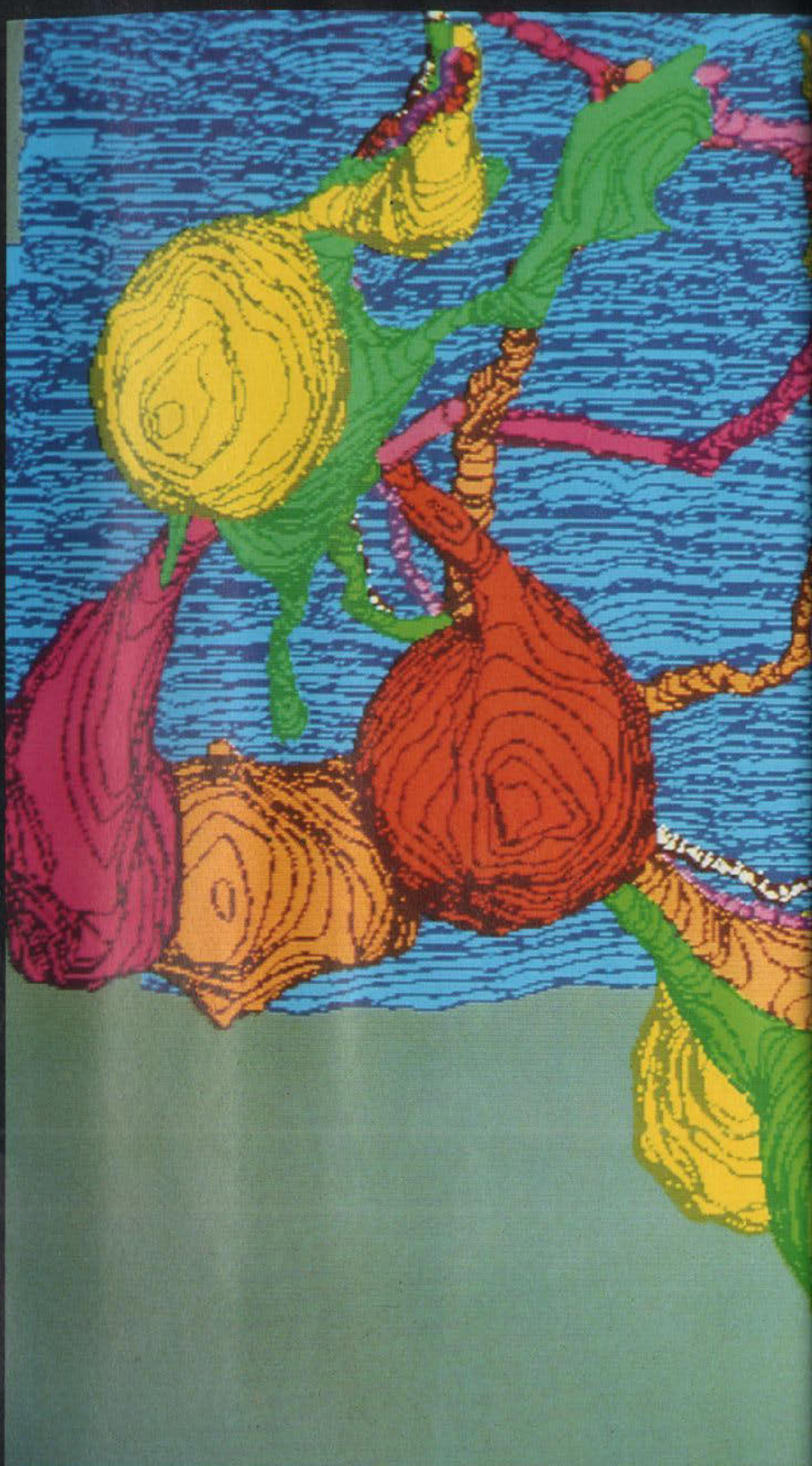




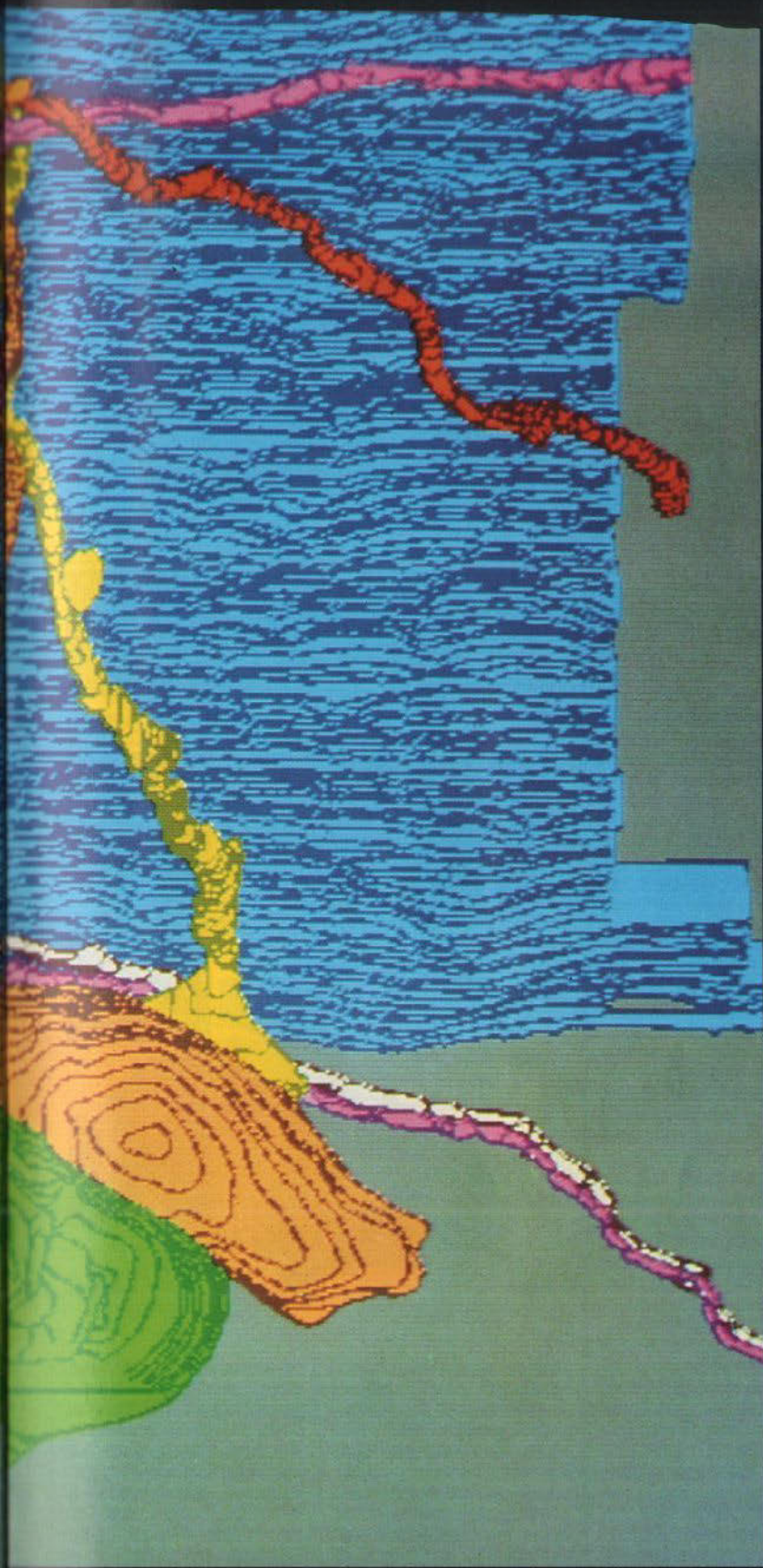
# **Von der Netzhaut ins Gehirn: Wie Nervenfasern ihren Weg finden**



Bunte Knollen und Fasern unter einem blauen Dach – mit Hilfe eines Großcomputers aus 500 elektronenmikroskopisch vergrößerten Schnitten rekonstruiert. So sehen Ganglienzellen in der Netzhaut eines Hühnerembryos aus, wenn ihre Axone in Richtung Gehirn wachsen (rechts). An rot eingefärbten Axonen auf verschiedenen Nährböden wollen die Tübinger Neurobiologen um Friedrich Bonhoeffer – zwischen seinen Kollegen Alfred Gierer und Uli Schwarz – herausfinden, was den Fasern den Weg weist







VON GÜNTER HAAF

**D**as Ding ähnelt der Grapschhand des Film-Monsters aus den Tiefen der Schwarzen Lagune. Nervös zukkende Finger sprossen mal hier, mal dort, tasten sich durch den suppiden Untergrund. Derweil wabern schwimnhautartige Membranen zwischen den Gliedern. Zwar ist die „Hand“ nur mit einem dünnen Ärmchen verbunden. Aber dennoch wühlt sie sich einem unsichtbaren Ziel entgegen, scheinbar getrieben von beängstigender Entschlossenheit.

„Passen Sie auf!“ Friedrich Bonhoeffer, ein kräftiger Mann im Freizeithemd, deutet auf den Bildschirm. Am rechten Rand taucht, einem querliegenden Baum gleich, ein zweites Ärmchen auf. Schon sind die ersten der Fingerchen dran – und zukken wie erschreckt zurück. Doch die Grapschhand gibt nicht auf. Amöbenhaft quillt sie in immer neue Formen und zittert sich schließlich über das Hindernis hinweg.

Bonhoeffer, Direktor am Tübinger Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, schaltet den Videorecorder aus. Der Professor verschränkt die Arme über der breiten Brust und sagt respektvoll: „Ist es nicht unglaublich, daß dieses Ding anscheinend weiß, wohin es will?“ Ebendies würde auch Bonhoeffer – würden alle Hirnforscher – nur zu gern wissen: Woher weiß das seltsame Ding, wohin es sich wühlen muß?

Das Ding ist ein sogenannter Wachstumskegel: die ständig weiter-sproßende Spitze einer „Axon“ genannten Nervenfasern. Der Star in Bonhoeffers Video-Clip tastet sich freilich nicht durchs Gewebedickicht eines lebenden Gehirns, sondern – unterm Mikroskop und im Zeitraffer – über den Nährboden einer Glasschale im Labor. Sogar hier, sozusagen in Kulturhaft, imponiert die Vitalität des Wesens aus der neuronalen Unterwelt.

Die Faszination der Forscher ist alles andere als trivial. Die Frage, woher der Wachstumskegel weiß, wo es längs geht, zielt direkt ins Kernproblem der Hirnforschung: Wie wächst aus ein paar embryonalen Zellen ein menschliches Gehirn? Wie ist es mög-



lich, daß aus einer befruchteten Eizelle mit einem Erbgut von vielleicht 100 000 Genen ein zentrales Nervensystem mit bis zu 100 Milliarden – also einer Million mal mehr – Nervenzellen entstehen kann?

Die Zahlen, mit denen Hirnforscher hantieren, erreichen astronomische Dimensionen: Allein in der Großhirnrinde – dem Cortex – eines ungeborenen Kindes entstehen in jeder Minute rund 250 000 neue Nervenzellen, auch „Neuronen“ genannt. Und der Cortex eines Erwachsenen birgt nach Schätzung des französischen Neurobiologen Jean-Pierre Changeux „mindestens 30 Milliarden Neuronen“, verknüpft durch eine Billiarde – 1 000 000 000 000 000 – Nervenverbindungen oder „Synapsen“.

Wie kommt dieser fein orchestrierte Kosmos im Kopf zustande?

Einige Teilantworten haben die Hirnforscher schon parat, zum Beispiel diese: Ohne Wachstumskegel würde kein Axon ans Ziel kommen. Und ohne Nervenfasern könnte kein Neuron einem anderen etwas mitteilen – es würden keine Sinnesreize weitergeleitet, keine Muskeln erregt, keine Gedanken gedacht. Jedes Neuron hat nur einen einzigen „Ausgang“ für Botschaften an andere Zellen: sein Axon. Eingehende Signale nimmt eine Nervenzelle dagegen über einen weitverzweigten „Baum“ von Fasern auf, den „Dendriten“. Sie sind über Synapsen mit vielen – oft mehreren tausend – Nervenzellen verbunden.

„Das Gehirn“, bezeugt Friedrich Bonhoeffer Respekt vor seinem Forschungsobjekt, „ist so hoffnungslos kompliziert.“ Wie raffiniert müssen allein schon jene vermeintlich simplen Wachstumskegel konstruiert sein, wenn die Forscher eines Max-Planck-Institutes – und nicht nur sie – nach jahrelangem Bemühen deren Funktionsweise erst in Ansätzen zu kennen glauben? Und noch weiter sind die Tübinger Forscher von ihrem eigentlichen Ziel entfernt: Sie wollen die axonale Verknüpfung der Netzhaut-Nervenzellen mit ihren Partner-Neuronen in einem „Tektum“ genannten Teil des Mittelhirns am „Tiermodell Huhn“ erklären.

Schon in den siebziger Jahren war Bonhoeffer gemeinsam mit seinen Kollegen Alfred Gierer und Uli

Schwarz auf die Genese des Gehirns neugierig geworden. Und das, obwohl das Trio zusammen mit dem Zellbiologen Peter Hausen eigentlich das Max-Planck-Institut für Virusforschung leitete. Im Laufe der Jahre rückte das Forschungsprogramm der Tübinger immer mehr von der Virologie ab. So war es schließlich nur noch ein formaler Schritt, als die

Max-Planck-Gesellschaft 1984 der Namensänderung in MPI für Entwicklungsbiologie zustimmte.

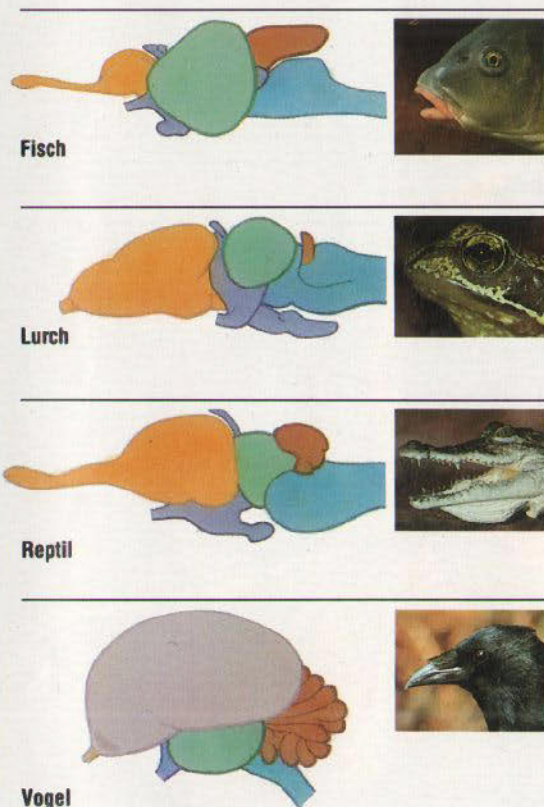
Wissenschaftler verhalten sich mittlerweile ähnlich wie jener Mann im Cartoon, der seinen irgendwo verlorenen Schlüssel nur im Schein der Straßenlampe sucht: Im Licht einer Theorie läßt sich's eben leichter forschen. Die Leuchtkraft neurobiologischer Theo-

## Gehirn-Evolution: Höhenflug aus dem Baukasten

Das Spiel der Natur mit bewährten Bausteinen des Wirbeltierhirns führte Schritt für Schritt zu einer neuen Lösung – zum menschlichen Gehirn

Das Gehirn ist das „menschlichste“ unserer Organe. Dennoch läßt sich seine Besonderheit nicht leicht definieren. Das Gewicht des Gehirns – für sich genommen – eignet sich weder als Maßstab für Intelligenzvergleiche bei Menschen noch für eine klare Trennung von den Tieren. Unsere Nervenzellen unterscheiden sich prinzipiell nicht von tierischen. Und unser Gehirn hat mit den Zentralnervensystemen aller Wirbeltiere den grundlegenden Bauplan gemein: 1. „Vorderhirn“ mit End- und Riechhirn sowie dem Basalganglion; 2. „Mittelhirn“ mit dem „Tektum“, einem Teil des Sehsystems; 3. „Hinterhirn“ mit Kleinhirn, Stammhirn und Rückenmark. Erst bei den Säugetieren entwickelte sich aus dem Riechhirn die Großhirnrinde („Cortex“). Beim Menschen ist die Großhirnrinde stark gefaltet und überwuchert andere Hirnteile fast vollständig. Bei den Vögeln dagegen entwickelte sich das große Endhirn aus dem Basalganglion.

„Keine Zellkategorie, keine Schaltung des Gehirns bildet ein spezielles Merkmal der menschlichen Großhirnrinde“, sagt der französische Neurobiologe Jean-Pierre Changeux: „Weder im Bereich der makroskopischen Anatomie noch im mikroskopischen Aufbau des Cortex markiert irgendeine dramatische qualitative Veränderung den Übergang vom tierischen zum menschlichen Gehirn. Die Evolution ist quantitativer Natur.“



Aber auch innerhalb unserer Spezies gibt es erhebliche Größenunterschiede: Das Hirngewicht gesunder Menschen reicht von 1000 bis 2230 Gramm – bei einem Durchschnitt von 1330 Gramm. Prinzipiell gilt, daß innerhalb einer Art in einem größeren Körper auch ein größeres Gehirn sitzt.

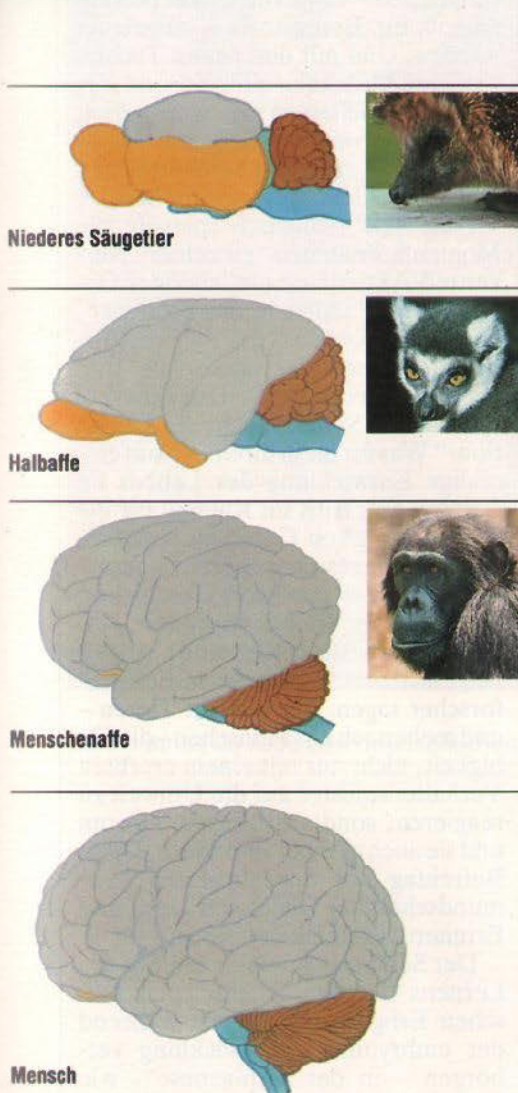
Die schwersten Gehirne haben die großen Wale und Elefanten – gut sechs bzw. 5,7 Kilogramm. Sogar im Verhältnis zwischen Hirn- und Körpergewicht läßt sich keine Sonderstellung des Menschen finden: Blauwal 1 : 10 000, Elefant 1 : 600, Gorilla 1 : 200, Mensch 1 : 45, Seidenäffchen 1 : 12.



rien erhellte bisher freilich vor allem Insektenhirne oder die Ganglien von Meeresschnecken – Nerven-Bündel, deren Leistung schon im Vergleich zu einem Spatzenhirn so bescheiden wirkt wie eine Registrierkasse neben einem Supercomputer.

Aber gerade mit der Bescheidenheit, mit der Reduktion auf experimentell überprüfbare Fragestellungen, ge-

lang und gelingt es den Naturwissenschaftlern immer wieder, zunächst unlösbar erscheinende Rätsel schließlich doch zu lösen. Denn die Natur spielt ständig mit einmal bewährten, relativ einfachen Bausteinen und Prinzipien. Allerdings „findet“ sie dabei oft neue, überraschende Lösungen (siehe Kasten Seite 46).



Niederes Säugetier

Halbaffe

Menschenaffe

Mensch

Ein wirklichkeitsnäheres Kriterium ist der sogenannte Enzephalisations-Koeffizient. Diese „Verhirnungsgröße“ kennzeichnet qualitative Veränderungen zwischen Säugetieren. Wird nämlich das Verhältnis von Hirn- zu Körpergewicht bei der Spitzmaus, einem Vertreter der „primitiven“ Insekten-

fresser, gleich 1 gesetzt, liegt der „theoretische“ Schimpanse bei 11,3 und der Durchschnittsmensch bei 28,7: Eine Spitzmaus mit dem Körpergewicht eines Menschen besäße demnach ein 28,7mal kleineres Gehirn – es wöge nur etwa 46 Gramm. Delphine kommen übrigens mit einem Enzephalisa-

sations-Koeffizienten 20 dem Menschen sehr nahe.

Wird freilich der Cortex eigens mit einem „Progressions-Koeffizienten“ bewertet, ergibt sich eine klare Sonderstellung des Menschen: Dabei dient wieder der Koeffizient der Insektenfresser mit dem Wert 1 als Basis: Affen erreichen zwischen 8 und 25, Schimpansen 58 und der Mensch 156.

Erst dieser Vergleich der Hirnteile zeigt, wie im Laufe der Evolution einzelne Bauteile des Wirbeltierhirns offenbar nach „Bedarf“ größer oder kleiner geworden sind. Diesen „funktionalen Aspekt“ der Hirnentwicklung hat vor allem der amerikanische Psychologe Harry Jerison in den siebziger Jahren untersucht. Er fand auch eine generelle Zunahme des Hirngewichts – also einen evolutionären „Trend“.

Innerhalb einer bestimmten Tiergruppe – etwa Säugern – steigt dieser Trend quantitativ leicht an. Daneben gibt es aber auch qualitative Sprünge in der Stammesgeschichte: Hier sind die Unterschiede von Fischen und Reptilien zu den warmblütigen Vögeln und Säugetieren auffällig, aber auch zwischen „normalen“ Säugern und Primaten. Und nach dieser Skala bildet unser Hirn den letzten qualitativen Sprung in der Gehirn-Evolution. Offenbar beschleunigte eine „positive Rückkopplung“ zwischen der evolutionären Fitness – dem Reproduktionserfolg – und der Flexibilität des Verhaltens das Wachstum des menschlichen Gehirns.

Ein Nervensystem mußte – einmal „erfunden“ – entscheidende Vorteile geboten haben: Die Nervenzellen aller heute lebenden Tiere arbeiten nach einem gemeinsamen, ererbten Grundprinzip. Menschen besitzen keine prinzipiell anderen Nervenzellen als etwa Schnecken. Der Unterschied liegt in den biochemischen Details des neuronalen Stoffwechsels, in der Zahl der Neuronen und in der Organisation des jeweiligen Zentralnervensystems. Hier jedoch gibt es große Differenzen zwischen Wirbellosen und Wirbeltieren: Jedes Froschhirn steht unserem Denkorgan wesentlich näher als irgendein Insektenhirn. Aber auch zwischen Fisch- und Reptilienhirn, Affen- und Menschenhirn bestehen jeweils gewaltige Unterschiede (siehe Kasten links).

Als die drei wissenschaftlichen Grenzgänger – Bonhoeffer und Gierer studierten Physik, Schwarz war ursprünglich Pharmazeut – begannen, Gehirnen einige Geheimnisse abzuluchsen, wagten sie es natürlich nicht, direkt gegen „die Zitadelle“ anzurennen, wie Charles Darwin das Menschenhirn einmal genannt hatte. Sie beschieden sich darin, in Hühner-Embryonen das Wachstum jener Axone zu studieren, die von der Netzhaut zum Tektum streben.

Im Sprichwort muß das Hausgeflügel zwar als Beispiel für mindere geistige Leistungen herhalten. Aber wie alle Vögel besitzen auch Hühner hochentwickelte Gehirne. Und Hühner haben einen Vorteil, den weder Mäuse noch Menschen bieten können: Ihre Embryonen sind, so Bonhoeffer, „groß, zugänglich und billig“.

Friedrich Bonhoeffer verläßt die winzige Video-Kammer seines Instituts und geht in den Keller. Dort öffnet er eine Doppeltür, schickt die beiden Besucher durch und schließt dann rasch die Schleuse von innen. In dem engen Raum herrscht brütende Hitze. An der linken Wand steht ein Stahlregal, gefüllt mit Blechtablets. Bonhoeffer schiebt an einem die Abdeckung beiseite: Hier werden keine Brötchen gebacken, hier reifen Hühnerembryonen heran.

Bis zu tausend Eier der handelsüblichen Hühnerrasse „White Leghorn“ lassen die Tübinger Forscher pro Woche erbrüten. Bonhoeffer greift vorsichtig eine Schale vom



Blech und plazierte sie auf die Durchleuchtungsampe des Labortisches im Brutraum. Dort bietet das, was auf den ersten Blick so alltäglich aussieht wie ein halbgares Spiegelei, eine Einsicht, die unter die Haut geht: Gebettet auf den gelben Dottersack, der nahezu die ganze Glasschale ausfüllt, und umgeben von der Aderhaut liegt hier ein Hühner-Embryo, dessen Form einem frühen menschlichen Keimling ähnelt – eine Erinnerung an ein Stück gemeinsame Evolution des Vogels Huhn und des Säugers Mensch (siehe Seite 34/35).

Der Embryo ruckt und zuckt, sein Herz pulsiert. Markant heben sich die relativ großen, dunkel gefärbten Augen ab. Schon sechs Tage nach Brutbeginn besteht die Retina – die Netzhaut – eines Hühner-Embryos aus rund 50 Millionen Nervenzellen. Ein natürliches Pigment färbt die Retina, einen sich sehr früh entwickelnden Teil des Gehirns, schwarz. Der Farbstoff spielt möglicherweise eine Rolle als Startsignal für die Axone der Netzhaut-Ganglienzellen.

In diesem Augenblick müssen sich in dem Embryo Hunderttausende von Wachstumskegeln von der Netzhaut zum Tektum vorwärtstasten. Dort suchen und finden sie ihre zellulären Ziele. Dabei geht es sehr geordnet zu: Wenn die Axone die Netzhaut verlassen, bündeln sie sich zum Sehnerv und wachsen parallel dem Mittelhirn entgegen. Dort verbinden sich

benachbarte Axone mit benachbarten Zellen des Tektums, auf das somit die räumliche Anordnung der Netzhautzellen „projiziert“ wird. Nur so können später im Leben die Nervensignale eines erblickten Bildes in diesem stammesgeschichtlich alten Sehzentrum sinnvoll verarbeitet werden: Hier wird die visuelle Aufmerksamkeit auf plötzlich auftauchende oder sich verändernde optische Reize gelenkt – beim Huhn wie beim Menschen.

Gewiß, in groben anatomischen Übersichten des Gehirns gibt es so gut wie keine weißen Flecken mehr. Und seit der Pionierarbeit des Spaniers Santiago Ramón y Cajal, Medizin-Nobelpreisträger von 1906, sind die Bausteine des Gehirngewebes im wesentlichen bekannt: die verschiedenen Nervenzell-Typen samt ihrer faserigen Fortsätze, der Dendriten und Axone. Ramón y Cajal gab auch den Wachstumskegeln ihren Namen.

Nervensignale müssen an den Kontaktstellen zwischen zwei Nervenzellen – den Synapsen – stets einen schmalen Spalt überwinden. Dabei wird das Nervensignal in den allermeisten Fällen kurzfristig von elektri-

schen auf chemische Träger umgespurt. Wie dies geschieht, erforschen Neurophysiologen und Biochemiker mit Hilfe zusehends raffinierterer Methoden bis ins atomare Detail. So gelang zum Beispiel Erwin Neher und Bert Sakmann vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen im Jahr 1976 eine meßtechnische Revolution: Seitdem können nicht nur elektrische Impulse von einzelnen Nervenzellen, sondern sogar von einzelnen Zellmembran-Bestandteilen – etwa von „Rezeptorkanälen“ für Botenstoffe – abgeleitet werden. Und mit den neuen Techniken der Molekularbiologie und der Immunologie lassen sich ganz gezielt bestimmte, im Nervensystem aktive Substanzen aus dem biochemischen Ozean des Gehirns herausfischen.

Nur: Wie realistisch spiegeln die Momentaufnahmen einzelner Nervenzell-Aktivitäten ein lebendes Gehirn wider? „Alles in der Biologie“, lautete der Kernsatz des 1975 verstorbenen russisch-amerikanischen Biologen Theodosius Dobzhansky, „macht nur Sinn im Licht der Evolution.“ Was für die in ihrem Ablauf einmalige Entwicklung des Lebens im Großen gilt, trifft im Kleinen für die Entwicklung von Gehirnen ebenfalls zu: Auch sie resultieren jeweils aus einer nicht wiederholbaren Geschichte. Und je höher ein Nervensystem entwickelt ist, desto größer muß auch seine „Plastizität“ werden, wie die Hirnforscher sagen. Sie verleiht Tieren – und mehr noch uns Menschen – die Fähigkeit, nicht nur mit einem ererbten Verhaltensmuster auf die Umwelt zu reagieren, sondern in ihr zu agieren und sie auch aktiv zu verändern. Diese Befreiung aus der absoluten Vormundschaft der Gene setzt Lern- und Erinnerungsfähigkeit voraus.

Der Schlüssel zum Verständnis des Lernens liegt im Wechselspiel zwischen Erbgut und Umwelt während der embryonalen Entwicklung verborgen – in der „Epigenese“, wie Biologen eine über die genetischen Rahmenbedingungen hinausgehende Entwicklung nennen. Sie kann auch die alte Streitfrage beantworten, was denn wichtiger sei, „Natur“ oder „Kultur“: Beide sind untrennbare Ingredienzen der vor- und nachgeburtlichen Entwicklung.

Weder anatomische Beobachtungen an Embryonen noch molekular-

## Auf wirren Pfaden zurück zu den Partnern im Hirn

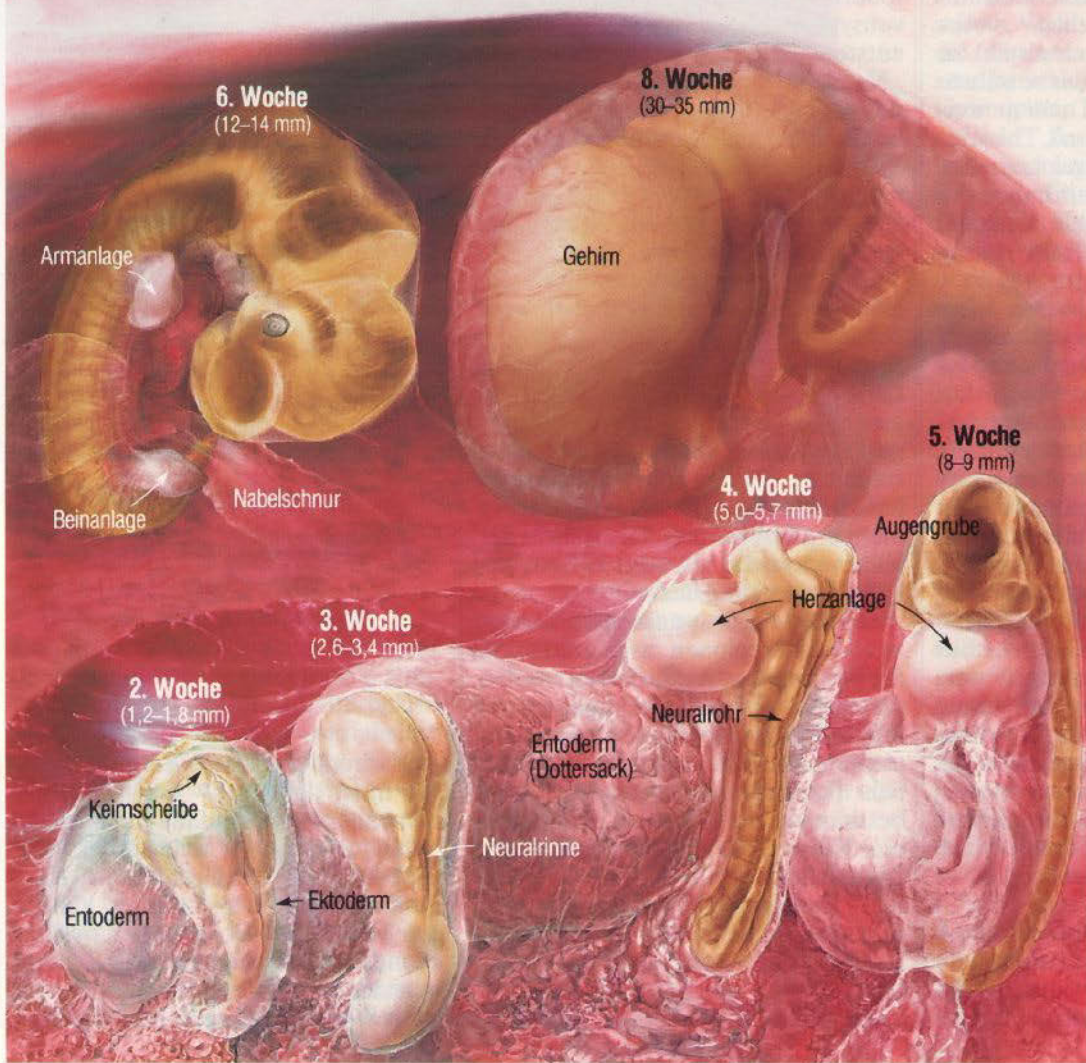


Sorgfältig durchtrennt die Tübinger Biologin Claudia Stürmer den Sehnerv eines betäubten Goldfisches. Was einen Menschen unwiderruflich erblinden ließe, ist bei Goldfischen reparabel: Zunächst kreuz und quer, dann aber zielgenau wachsen die durchtrennten Nervenfasern auf ihre Partnerzellen im Sehzentrum zu – eine Fähigkeit, die Menschen mit der Geburt verlorengelht

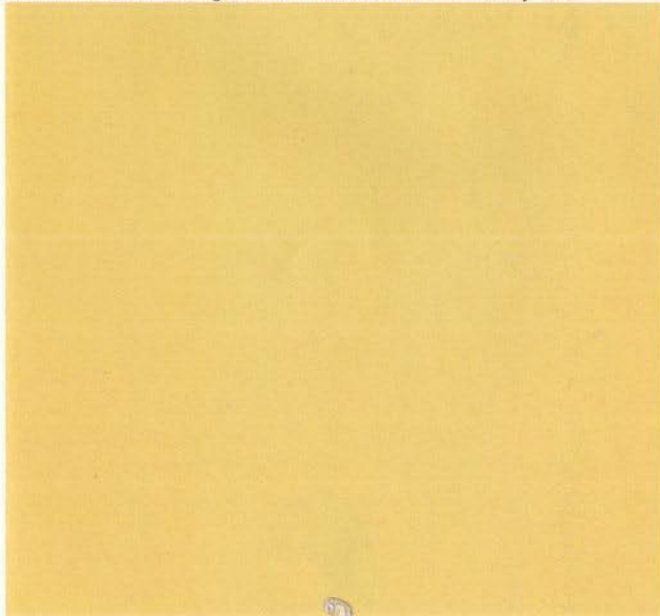


## Auf dem Weg vom Ei zum Ich

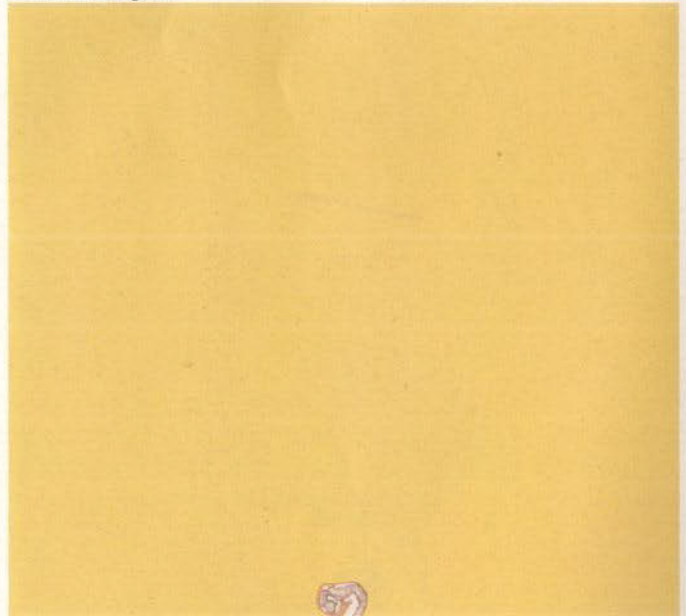
Ein menschlicher Keim hat sich etwa eine Woche nach der Befruchtung in die Schleimhaut der Gebärmutter eingeknistet (großes Bild). In der zweiten Woche bildet sich eine Keimscheibe mit zwei aufeinanderliegenden Zellschichten: Ento- und Ektoderm (inneres und äußeres Keimblatt). Wenig später kommt ein mittleres Keimblatt hinzu – das Mesoderm. Im Ektoderm entsteht Ende der dritten Woche zunächst die Neuralrinne, dann das Neuralrohr, der Vorläufer des Zentralnervensystems. Zwischen der vierten und der achten Woche, der »Embryonalperiode«, werden äußere Körperform und die Organe angelegt sowie die Sinneszellen von Auge, Ohr und Nase. Die unten beginnende und sich auf den nächsten Seiten fortsetzende Bildsequenz illustriert das Gehirnwachstum bis zur Geburt (Maßstab: etwa vier Fünftel der natürlichen Größe)



Gehirn eines 25 Tage alten menschlichen Embryos



Nach 35 Tagen





biologische Momentaufnahmen im Labor vermögen freilich dieses höchst komplizierte Wechselspiel zu erfassen. Hier kann nur das bewährte naturwissenschaftliche Tandem weiterhelfen: Experiment und Theorie. Beide, so scheint es, erreichen jetzt die nötige Reife. Erstmals haben die Neurobiologen eine echte Chance, herauszufinden, wie die Entwicklung vom Ei zum Ich verläuft.

Anatomen hatten im letzten Jahrhundert beschrieben, wann in einem Embryo die einzelnen Organe entstehen. Zellbiologen vertieften den Blick im Laufe der letzten Jahrzehnte, indem sie den Werdegang einzelner Zelllinien – auch des Nervensystems – verfolgten. Doch anders als bei primitiven Tieren aus relativ wenigen Zellen verloren die Forscher bei Wirbeltier-Embryonen die Spur in dem rasch auf viele Millionen Neuronen anwachsenden Gehirn. Sie mußten sich auf allgemeine Kriterien des Nervenzellwachstums beschränken. Immerhin enthüllten die Arbeiten fünf prinzipielle Entwicklungsschritte während der „Neurogenese“ der Gehirne von Wirbeltieren inklusive des Menschen: Zell-Geburt und -Wanderung, -Differenzierung, -Reifung und -Tod.

Schon kurz nach den ersten Zellteilungen formen sich im rasch wachsenden Embryo drei grundsätzliche Zelllinien; aus einer von ihnen, dem „Ek-

toderm“, bilden sich Haut und Nervensystem. Nach knapp 20 Tagen entsteht daraus beim Menschen die „Neuralrinne“, ziemlich im Zentrum des winzigen Keimlings gelegen (siehe Grafiken auf den Seiten 41 bis 45).

In diesem frühen Stadium bestimmen genetische Vorgaben die räumliche Anordnung der einzelnen Teile des späteren Nervensystems. Die Vorläufer der Nervenzellen, die „Neuroblasten“, sind noch nicht sonderlich spezialisiert, weshalb kleinere Schäden – etwa durch Strahlen oder Gifte – durch das gesunde Gewebe ausgeglichen werden können. Wenige Tage später, wenn sich die Neuralrinne zum „Neuralrohr“ geschlossen hat, können geschädigte Teile nicht mehr ergänzt werden: Dann stirbt der Keim entweder ab, oder es reift ein behindertes Kind heran.

Geht alles gut, wachsen die einzelnen Gehirnregionen rasch an. Durch die Teilung von Neuroblasten werden die ersten Nervenzellen „geboren“. Mit einer geschickt genutzten radioaktiven Markierungsmethode können Forscher in Tierexperimenten bestimmen, zu welchem Zeitpunkt eine Nervenzelle sich nicht mehr teilt: Dieses Datum gilt als ihr „Geburts-tag“. Freilich entstehen Neuronen zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten. Beim Menschen sind erst bei der Geburt alle Nervenzellen vorhanden; danach teilen sie sich nie wieder.

Ein gewaltiger Aufwand ist nötig, um die elektrische Aktivität einer einzigen Nervenzelle abzuleiten. Neuronen können mit der Substanz »Lucifer Yellow« eingefärbt und damit unter dem Mikroskop besser sichtbar gemacht werden



## Wenn einzelne Neuronen belauscht werden

Während manche Neuronen noch gar nicht „geboren“ sind, begeben sich andere schon auf die für Nervenzellen typische Wanderschaft: Sie bleiben nie am Ort ihrer Geburt, sondern suchen zielstrebig ihren künftigen Einsatzort. Doch woher sie den kennen, weiß niemand. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die vitalen Wachstumskegel. Der eigentli-

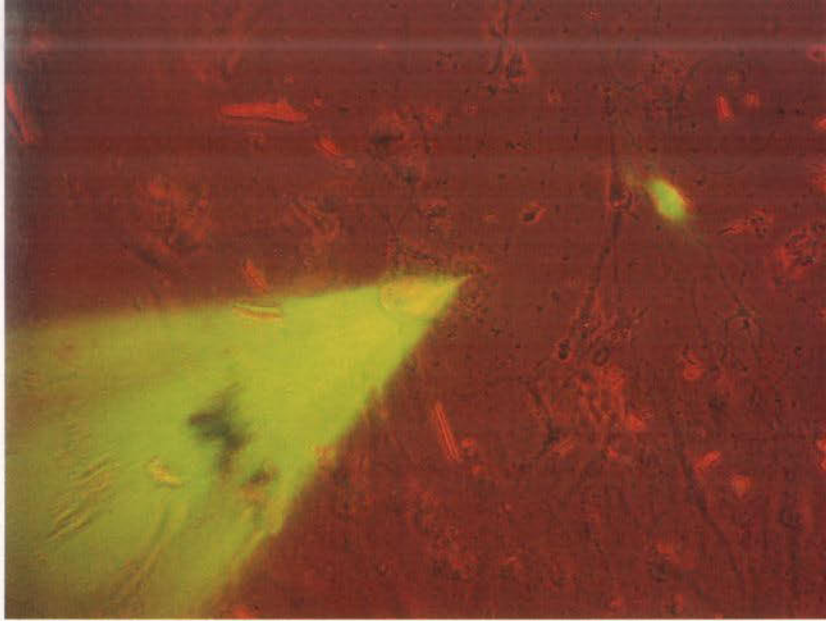
Das Gehirn eines 40 Tage alten menschlichen Embryos



Nach 50 Tagen







Neuronen einer Region gleichzeitig reifen. Während dieser Phase werden die dünnen Axone mit einer isolierenden Schicht des Eiweißstoffs Myelin umhüllt.

Nicht „funktionstüchtige“ Axone haben entweder ihr Ziel nicht gefunden, oder ihre Partnerzellen sind unfähig zur Kooperation. Dann leben beide – Axon und einsam gebliebene oder gewordene Nervenzelle – nicht mehr lange. Aber auch neuronale Verbindungen, die während der Entwicklung bestimmte Aufgaben erfüllt haben, gehen ein. Denn im Mikrokosmos des Nervensystems herrschen offenbar ähnliche Regeln wie im Makrokosmos der Tier- und Pflanzenwelt: Nur die am besten angepassten Individuen überleben.

In der Embryonalphase sterben viele Neuronen den „Zell-Tod“ – bei Fröschen bis zu Dreiviertel aller Nervenzellen einer bestimmten Hirnregion. Und Untersuchungen von Gehirnen tot geborener oder früh gestorbener Kinder lassen den Schluß zu, daß die gleichen Vorgänge auch im unreifen menschlichen Gehirn ablaufen.

Der Hauch von Darwin im neuronalen Netzwerk elektrisiert viele Wissenschaftler: Verbirgt sich hinter der Selektion funktionierender Synapsen und dem Massentod von Nervenzellen schon vor der Geburt eine grundlegende Strategie der Natur? Ermög-

che Zellkörper folgt bei den Wanderungen in relativ großem Abstand.

Während noch Millionen von Zellen „geboren“ werden und auf Wanderschaft gehen, beginnen viele Nervenzellen mit ihrer „Differenzierung“. Ihr Stoffwechsel spezialisiert sich nun auf ganz bestimmte Aufgaben, vor allem auf die Ausschüttung und Erkennung bestimmter chemischer Botenstoffe – der „Neurotransmitter“: Hier fällt die Entscheidung, ob ein Neuron künftig andere Nervenzellen hemmt oder erregt. Nun formen sich auch die ersten Synapsen, die Kontaktstellen zwischen zwei Neuronen. In diese Phase fällt die Ar-

beit der Tübinger Forscher: Auch die Suche der retinalen Axone nach Partnerzellen im Tektum zählt zur Differenzierung.

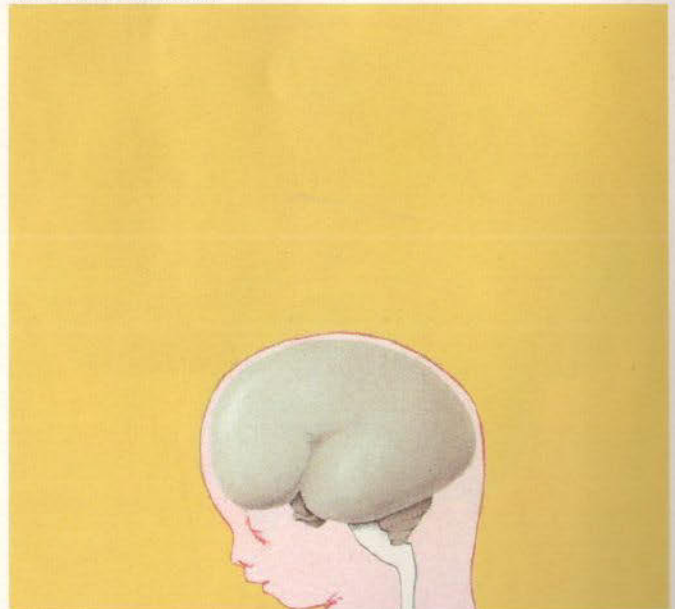
Die Zell-Differenzierung überlappt sich ebenfalls mit der nächsten Entwicklungsstufe, der „Reifung“. Offenbar kann das Gehirn nur dann richtig funktionieren, wenn nicht alle

## **Nach ihrer »Geburt« beginnen Nervenzellen zu wandern**

Das Gehirn eines menschlichen Fetus nach 100 Tagen



Nach fünf Monaten





licht nur eine solche „selektive Stabilisierung“ die Selbstorganisation eines lernenden Gehirns?

„Wir tendieren dazu, den Tod als Schlußpunkt des hohen Alters zu betrachten“, sagt Gordon Sheperd von der amerikanischen Yale University, „aber das ist falsch aus dem Blickwinkel der Entwicklung.“ Aus dieser Perspektive sind Degeneration und Tod bestimmter Zellen, Fasern und synaptischer Verbindungen ein untrennbarer Bestandteil der Entwicklung, ja sogar Voraussetzung für den Erfolg der komplexeren Struktur. Und Sheperds Frankfurter Kollege Wolf Singer, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung, pflichtet ihm bei: „Meiner Meinung nach geht die Natur dieses Risiko ein, weil sie dadurch Funktionen realisieren kann, die mit genetischen Anweisungen allein nicht zu verwirklichen wären“ – nämlich, einem Individuum das Lernen zu ermöglichen.

Zwar warnt Alfred Gierer davor, diese bisher nur bei der Entwicklung des Sehsystems bestimmter Tiere beobachtete Strategie vorschnell als Erklärung auch für „höhere Formen des Lernens“ zu akzeptieren. Aber auch Gierer ist fasziniert von der offenbar „tiefreichenden Beziehung zwischen der Entstehung und Funktion des Gehirns, die auf einer formalen Ebene gefunden werden kann“.

Einen ersten theoretischen Einstieg in die Welt der neuronalen Selbstorganisation, der sich auch experimentell überprüfen ließ, fand der amerikanische Hirnforscher Roger Sperry Anfang der sechziger Jahre. Er hatte damals Experimente an Fröschen, Salamandern und vor allem an Goldfischen gemacht, bei denen er den Sehnerv durchtrennte und Teile der Netzhaut entfernte. Der spätere Nobelpreisträger entdeckte, daß die durchschnittlichen Nervenfasern aus dem unversehrten Teil des Auges nicht nur erneut ihren Weg ins Tektum fanden. Sie erreichten sogar die richtige „Empfangsstation“, zuständig für das übrig gebliebene Stück Netzhaut. Sperry überlegte nun, wie die Wachstumskegel der Axone ihr Ziel finden könnten: Am einfachsten wäre es, wenn es bestimmte „Raummarkierungen“ – englisch: „spatial markers“ – gäbe, am Ausgangsgebiet der jeweiligen Nervenfasern in der Netzhaut ebenso wie am Zielgebiet im Tektum.

Solche „spatial markers“ könnten nach zwei unterschiedlichen Prinzi-

pien funktionieren. Die erste Version: Ein spezielles Marker-Molekül für jedes Ursprungs- und Zielgebiet. Dies würde jedoch vom Organismus einen sehr großen biochemischen Aufwand und von den Axonen ausgedehnte Suchaktionen verlangen. Die zweite, einfachere Version: Die verschiedenen Ursprungs- und Zielgebiete unterschieden sich durch verschiedene Konzentrationen nur weniger Stoffe. Ein suchender Wachstumskegel würde von solchen „Gradienten“ – Konzentrationsab- oder -zunahmen – zum Ziel geleitet.

Alfred Gierer konnte 1981 in einer theoretischen Studie zeigen, daß relativ einfache Arten von Wechselwirkungen ausreichen, um die vielen verschiedenen Axone zuverlässig in ihr Zielgebiet zu lenken und sogar Fehler in der Wachstumsrichtung zu korrigieren. Und Gierers Kollege Friedrich Bonhoeffer ersann mit seinem Team eine raffinierte Versuchsanordnung, mit der sich das Gradientenmodell auch für Nervenfasern aus hochentwickelten Gehirnen testen läßt. Diese „Entscheidungs-Assays“ genannten Experimente erlauben es, das Wachstum von Axonen auf unterschiedlichen Nährböden im Laborgefäß zu studieren: Wachsen die neuronalen Pfadfinder lieber auf Unterlagen, die aus den Membranen des Nervenzelltyps X oder des Typs Y gewonnen wurden?

## Ein Hauch von Darwin im neuronalen Netzwerk

Vorgeburtliches Gehirnwachstum nach sechs Monaten



Nach sieben Monaten







## Noch vor der Geburt sterben schon Neuronen

Die jeweilige Vorliebe der Wachstumskegel ist unter dem Mikroskop deutlich sichtbar (siehe Foto Seite 36): Sie bevorzugen bestimmte Nährböden. Nun sind die Wissenschaftler vom Tübinger Max-Planck-Institut gemeinsam mit anderen Forschergruppen dabei, in ungezählten Versuchsreihen herauszufinden, welche Substanzen in welchen Nährböden besonders attraktiv für bestimmte Axone sind. Zwar konnte noch keiner der postulierten „spatial markers“ eindeutig nachgewiesen wer-

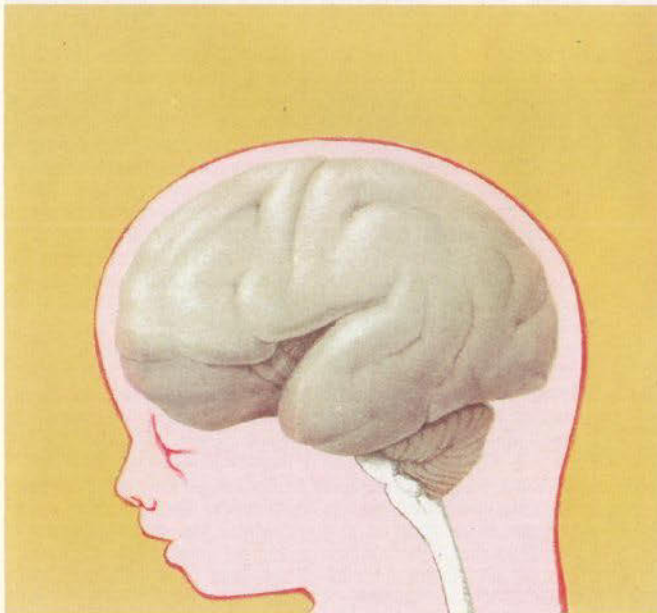
»Etwas Verrücktes« entdeckte das Team um die Neurobiologin Carla Shatz, hier mit einem Kollegen vor dem Schnittbild eines fetalen Katzenhirns: Die vom Sehsystem heranwachsenden Nervenfasern – Axone – warten fast anderthalb Monate lang, bis ihre Partnerzellen in der Hirnrinde entstehen. In dieser Zeit scheinen die Axone mit Neuronen Kontakt zu pflegen, die bald absterben

den. Und auch die Frage, ob es beim Wachstum anderer Gehirnstrukturen ähnlich zugeht wie bei der „retinotektalen Projektion“, ist noch offen. Aber nun ist klar, daß die Wachstumskegel zwischen bestimmten Substanzen auf den Zellmembranen unterscheiden können. Jetzt suchen die Forscher nach den molekularen Wegweisern der Nervenfasern – ein mühsames Geschäft.

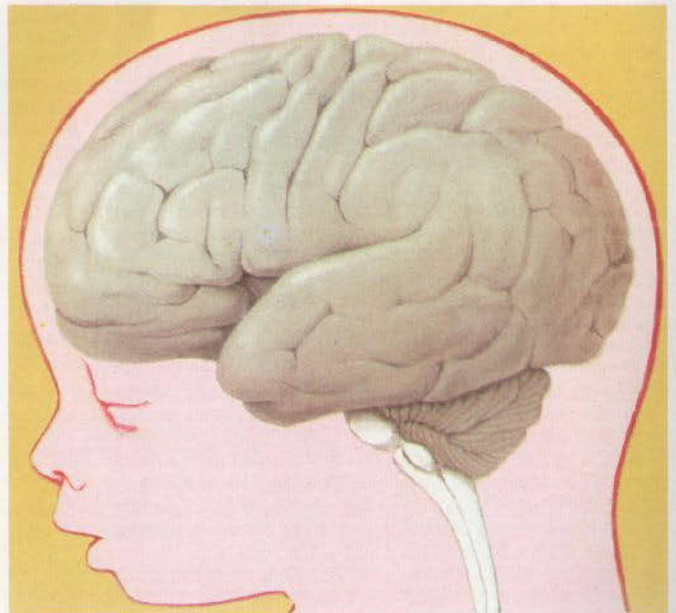
„Im Augenblick backen wir noch ganz kleine Brötchen“, bekennt Uli Schwarz und ist dabei fast fröhlich. Der dritte im Bund der Tübinger Max-Planck-Direktoren, die auf die Karte „Entwicklungsbiologie“ gesetzt haben, deckt einen Stapel Stereo-Fotografien auf. Die bunten unregelmäßigen Flecken und Fäden auf den paarweise angeordneten Abzügen erinnern zunächst an abstrakte Kunst. Doch der Blick durch den Stereo-Betrachter läßt sogar die prächtige Aussicht aus dem Laborfenster hinüber auf die Schwäbische Alb vergessen. Dreidimensional schlängeln sich bunte „Fäden“ durch außerirdisch anmutende Räume: „Sie sehen hier Nervenfasern aus der Netzhaut eines Hühnerembryos“, erklärt Schwarz, „so, wie das einzelne Axon es ‚sieht‘, das hier durchmuß.“

Das Problem der Entwicklungsbiologen war: Wie lassen sich die elektronenmikroskopischen Aufnahmen

Nach acht Monaten



Nach neun Monaten





feinster, in Serie geschnittener Scheiben embryonalen Netzhautgewebes sinnvoll auswerten – bis zu 500 Schnittbilder mit schwer überschaubaren Schwarzweiß-Mustern pro Versuch? Schwarz und sein Mitarbeiter Dieter Meissner baten die Kollegen vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München um Hilfe: Sie werten Himmels-

aufnahmen mit Hilfe eines Großcomputers aus. Und mit dieser Technik lassen sich auch die Scheibenbilder aus der Retina Tübinger Hühnerembryonen zu wirkkeitsgetreuen 3-D-Bildern zusammensetzen und – der Anschaulichkeit halber – einfärben: So wird sichtbar, wie sich Axone durchs Gewebe schlängeln (siehe Foto Seite 36/37).

Uli Schwarz möchte bei der Erforschung des Hirnwachstums „möglichst eng am Embryo bleiben“, also Labortests mit Zellkulturen auf ein Mindestmaß beschränken. Dies hat sich auch Claudia Stürmer vorgenommen. Die junge Biologin mit der rotbraunen Mähne leitet seit Juli letzten Jahres eine eigene Forschergruppe am Friedrich-Miescher-Laboratori-

**A**n einem grauen Samstagnachmittag, Ende November letzten Jahres, kam es in Kiel anlässlich des „Phylogenetischen Symposiums“ zu einer Kollision zweier wissenschaftlicher Welten. Im überfüllten alten Hörsaal des Zoologischen Museums prallten die Anhänger der gar nicht so alten Idee, daß die Gene die Herrscher über das individuelle Schicksal der Lebewesen seien, auf eine kecke Truppe meist jüngerer Forscher, die die angebliche Allmacht des „egoistischen Gens“ bei der Entwicklung eines Organismus auf ein bescheidenes Maß zurechtstutzten.

Im Reich des Lebens, so lautet die neue Botschaft, gibt es keinen absoluten Machtanspruch, weder der Gene noch der Umwelt: Beide fließen stets untrennbar ein in die „Selbstorganisation“ eines Organismus.

Die Aufregung der Zoologen und Genetiker über die grundlegenden Strategien des Lebens hat Hirnforscher ebenso erfaßt wie Mathematiker und Physiker, Chemiker und auch Soziologen. Denn bei der Suche nach den Erfolgsrezepten der Natur sind die Forscher offenbar auf eine neue Goldader gestoßen: ein möglicherweise zusammenhängendes Bündel von Theorien über komplexe Vorgänge mit Auswirkungen vor allem auf die Hirnforschung.

Noch fehlt ein einheitlicher Name für das Theorien-Bündel. Aber die gleichsam ineinandergeschachtelten Rahmenbedingungen für eine Selbstorganisation von Lebewesen – inklusive ihrer Gehirne und Sozialverbände – sind wenigstens in Umrissen bekannt:

- Erstens die rein mathematische Erkenntnis, daß Chaos prinzipiell zu neuen Ordnungszuständen führen kann.

- Zweitens die Erkenntnis der Physiker, daß nur eine Welt außerhalb des „thermodynamischen Gleichgewichts“ – also

ein „offenes System“ – aus Chaos Ordnung gebiert.

- Drittens die Erkenntnis, daß einzelne „Strukturen“, wie etwa Lebewesen, nur so lange in Raum und Zeit stabil bleiben, solange sie durch die Aufnahme von Energie ihr „Fließgleichgewicht“ aufrechterhalten können.

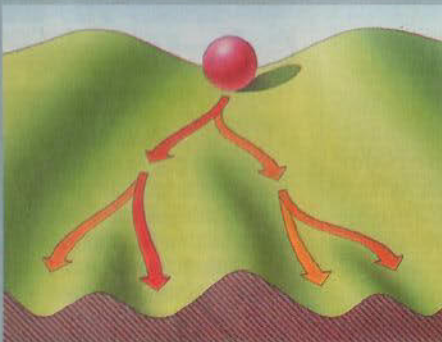
- Viertens die Erkenntnis, daß diese offenen Rahmenbedingungen einen starken selektiven Druck auf Lebewesen ausüben und damit gleichsam „kreativ“ wirken – ja daß dieses „Selektionsprinzip“ nicht nur einer der beiden Stützpfeiler der Darwinschen Evolutionstheorie (neben dem „Angebot von Vielfalt“) ist, sondern eine offenbar „angeborene“ Eigenschaft des Universums. Und diese blinde, nicht zielgerichtete Auslese der am besten den jeweiligen Bedingungen angepaßten Strukturen – Wolkenwirbel wie Wolfrudel wie Wirtschaftsunternehmen – scheint die wundersame Eigenschaft „Selbstorganisation“ nicht nur zu ermöglichen, sondern sogar zu erzwingen, wie auch alle bisherigen Computersimulationen nahelegen.

Das klingt sehr kompliziert, kann jedoch mit dem einfachen Modell einer „epigenetischen Landschaft“ des 1975 verstorbene britischen Biologen Conrad Waddington verständlich gemacht werden (siehe obere Graphik): Die Kugel symbolisiert ein zur Selbstorganisation fähiges System, etwa eine befruchtete Eizelle; die „Höhen“ sind physikalisch oder chemisch „verbotene“, aber auch biologisch-genetisch „unerreichbare“ Zustände. Vor der Kugel liegt die sich in immer mehr Täler aufspaltende „epigenetische Landschaft“. Wenn sie nun zu rollen beginnt, wird letztlich eine Kette von Zufällen bestimmen, welche Abzweigungen sie an den Gabelungen der „Täler“ nimmt.

Waddingtons Modell birgt eine entscheidende Erkenntnis: Die

## Selbstorganisation: Per Chaos zur Ordnung

Die Entwicklung  
des Gehirns verrät eine raffinierte  
Strategie der Natur



Wohin die Kugel des Lebens rollt, bestimmt der »geordnete« Zufall: Das illustriert die »epigenetische Landschaft« des britischen Biologen Conrad Waddington. Die »Täler« symbolisieren mögliche Entwicklungspfade. Wissenschaftler nennen die hinter der Epigenese stehende Strategie der Natur »Selbstorganisation« – einen Begriff, den Maurits C. Escher in seiner Grafik »Zeichnen« vorwegnahm



in der „Landschaft“ festgelegten Rahmenbedingungen leiten das jeweilige System – die „Kugeln“ – gleichsam automatisch in stabile Zustände. Die Kugel braucht also den Weg gar nicht zu „wissen“. Lebewesen haben freilich gegenüber unbelebten, sich selbst organisierenden Strukturen wie etwa Wasserwellen die Fähigkeit, sich zu vermehren und dabei ihre „vorteilhaften“ Eigenschaften mit dem Erbgut weiterzugeben. Ja sie sind im Laufe ihrer Evolution derart optimiert worden, daß sie die Rahmenbedingungen geschickt nutzen können – zum Beispiel so: Selbstorganisation bedeutet ein „Prinzip zur Verringerung des Befehlsumfanges, den ein Organismus zu Gestaltbildung oder Handeln be-

nötigt“, erklärt Klaus Schulten, Physik-Professor an der Technischen Universität München. Eine Nervenzelle muß also zum Beispiel nicht alles über das Gehirn und den Rest der Welt wissen, um ein brauchbarer Bestandteil des neuronalen Netzwerks zu sein – ein relativ geringer Vorrat gemeinsamer und auch individueller Befehle genügt. Schulten zufolge zeigte sich immer wieder, „daß einfache Wechselwirkungen zwischen einer großen Anzahl gleichartiger Komponenten zu einer reichen Vielfalt des Gesamtverhaltens führen können“. Mehr noch: „Trainierte Netzwerke von Neuronen“ können „astronomisch viele Aggregatzustände besitzen“, wobei „der Zufall auch in Netzwerken aus vielen Neuronen einen bestimmenden Einfluß auf den Gesamtzustand, vielleicht sogar eine Steuerfunktion ausübt“. Das geschickte Zusammenspiel vieler Milliarden Nervenzellen mit dem steuerbaren – dem „deterministischen“ – Chaos könnte der Trick sein, der die Freiheit des menschlichen Geistes ermöglicht.

Selbstorganisationsprinzipien tauchen auch bei der Vernetzung der Neuronen auf. Diese von dem Göttinger Anatomen Joachim R. Wolff „Synaptogenese“ genannte Vernetzung spielt eine entscheidende Rolle bei allen Lernvorgängen: Die Synapsen wissen nichts vom Inhalt der Botschaften, die sie übertragen. Sie funktionieren „nur“ nach den ihnen biologisch mitgegebenen Verhaltensregeln. Doch da sie einen Ordnungszustand einnehmen können, lassen sie sich willig vom Gesamtzustand des Systems Gehirn „versklaven“. Denn „nach längerem Gebrauch des Gehirns“, erläutert Schulten, „ordnen sich die synaptischen Verbindungen von selbst, der Zusammenhang von Informationseingabe und -ausgabe wird sinnvoll. Das Gehirn lernt“.



um, einem Institut der Max-Planck-Gesellschaft direkt neben dem MPI für Entwicklungsbiologie. Dort untersucht sie, wie bei Goldfischen die Axone aus der Netzhaut wieder ins Tektum wachsen, wenn der Sehnerv durchtrennt wird: Was bei allen höheren Wirbeltieren zur unwiderruflichen Erblindung führen würde, ist bei Fischen nach wenigen Monaten wieder vollständig repariert. Goldfische hören nie auf zu wachsen – möglicherweise ein Grund dafür, weshalb sich auch ihr Sehnerv wieder regenerieren kann.

„Schon nach zehn Tagen“, erzählt Claudia Stürmer, „sind die ersten durchtrennten Nervenfasern wieder im Zielgebiet.“ Allerdings wachsen die Axone nach dem Schnitt nicht wohlgeordnet wie im embryonalen Stadium, sondern zunächst kreuz und quer durchs Fischhirn. Aber nach „bemerkenswerten Navigationsmanövern“ finden die Fasern dann doch zu ihren Partnerzellen im Sehzentrum des Tektums: ein Indiz für „spatial markers“, die den Wachstumskegeln sagen, wie sie zum Ziel kommen.

Die mühsam zusammengetragenen Momentaufnahmen aus Hühner- oder Fischgehirnen lassen ahnen, wie weit die Tübinger Entwicklungsbiologen, wie weit alle Hirnforscher noch von einer wirklichkeitsgetreuen Beschreibung des embryonalen Hirnwachstums bei Wirbeltieren – und erst recht beim Menschen – entfernt sind.

„Dort scheint etwas sehr Seltsames vorzugehen“, sagt Carla Shatz. Die quirliche Professorin für Neurobiologie an der kalifornischen Stanford University, zu Besuch in Tübingen, zeigt mit dem Stock auf das an die Wand projizierte Schnittbild eines embryonalen Katzenhirns. Auf dem Foto sind die Schichten des noch unreifen Nervensystems sichtbar. In einer der Schichten markieren injizierte Farbstoffe „etwas Verrücktes“, wie Shatz abermals betont: nämlich Nervenzellen, die nach der Geburt nicht mehr vorhanden sind und erst kürzlich von der Stanford-Gruppe entdeckt worden waren.

In dieser Region unterhalb der „Schicht VI“ der Katzen-Sehrinde ist vier Monate nach der Geburt nur die „Weiße Substanz“ zu sehen, jene Ansammlung von Nervenfasern, die – neuronalen Kabelsträngen gleich –



**Babys kommen weder total »blank« noch völlig hilflos zur Welt. Forscher wie Barry Lester von der amerikanischen Brown University versuchen herauszufinden, was Neugeborene alles können – und was nicht: Bestimmte Schreie geben mitunter frühe Hinweise auf Hirnschädigungen**

## **Lernen macht das Hirn schwerer**

Signale zu allen möglichen Teilen des Nervensystems leiten. Während des embryonalen Wachstums jedoch geschieht dort offenbar etwas ganz anderes: Schon am 15. Tag nach der Befruchtung kommen die ersten Axone aus dem „lateralen Kniehöcker“ an, einem Teil des Sehsystems im Zwischenhirn, ohne freilich ihre Partnerzellen aus der Sehrinde vorzufinden. Denn die wandern erst zwischen dem 56. und 65. Tag, kurz vor der Geburt des Kätzchens, an ihren vorgesehenen Platz. Fast anderthalb Monate lang sitzen also die Axone vor Ort – aber, wie Shatz und ihre Kollegen herausfanden, keineswegs passiv. Im Gegenteil: Sie scheinen mit den nun entdeckten mysteriösen Neuronen eine aktive Verbindung einzugehen. Aber welche Signale werden da ausgetauscht? Niemand weiß es.

Die Entdeckung ganz neuer, auf alsbaldigen Abbau angelegter Nervenzell-Kontakte im Katzenhirn bestärkt eine weitere Ahnung: Was muß erst im noch viel komplizierteren Gehirn eines werdenden Menschen ablaufen? Wir werden es, schon aus ethischen Gründen, niemals im Detail erfahren.

So bleibt nur das Staunen, wie sicher ein Kind erst seine Umwelt begreifen lernt und sich dann seines Selbst bewußt wird. Was in seinem Kopf vorgeht, läßt sich nur in größten Zahlen ausdrücken: Es kommt mit allen Nervenzellen, aber nur mit einem Viertel des endgültigen Hirngewichts zur Welt.

Dreiviertel der Masse unseres Denkkorgans kommen, so scheint es, während der Verknüpfung und Stabilisierung des neuronalen Netzwerks hinzu – letztlich durch jene typisch menschliche, bis ins hohe Alter anhaltende „Plastizität“ der Nervenverbindungen: also durch „Lernen“. Und das beginnt vielleicht mit dem Vorwärtstasten der ersten Wachstumskegel lange vor unserer Geburt.

Uli Schwarz hat bei seiner Suche nach der Spur der Axone jedenfalls eines gelernt: „Hier ist Bescheidenheit am Platz.“ □

Günter Haaf, 40, ist Redakteur von GEO-Wissen.



# SCHMERZ

Chronischer Quälgeist,  
Bruder der Sucht und der Lust,  
aber auch bellender Wachhund  
der Gesundheit

Was normalen Menschen schon beim Zuschauen Qualen bereitet, erträgt der Fakir im Labor des Tübinger Neurologen Wolfgang Larbig scheinbar stoischen Gleichmuts. Hier werden uralte Methoden psychischer Schmerzunterdrückung naturwissenschaftlich überprüft. Tatsächlich kann unser Gehirn reale Schmerzen unterdrücken, aber auch Phantomschmerzen erzeugen. Auf besseres Verständnis solcher Zusammenhänge hoffen Millionen Menschen – alle, die an chronischen Schmerzen leiden







# Foul! In drei Etappen rast der Schmerz in das Bewußtsein

Eine ganze Palette von Stoffen wurde mittlerweile dingfest gemacht, deren Zusammenspiel nötig ist, damit zum Beispiel ein Fußballspieler den Tritt gegen sein Schienbein als Schmerz empfindet. Schritt für Schritt geschieht bei einem Foul folgendes:

Im Moment des Trittes schütten Schmerzfühler – „Nociceptoren“ – und bestimmte Zellen des Nervensystems einen Eiweißstoff aus, der Substanz P heißt, P wie „pain“. Die Substanz P bindet sich an sogenannte Mastzellen, die daraufhin Histamin freisetzen. Aus Blutkapillaren kommt Bradykinin hinzu, ein weiterer Eiweißstoff. Dritter molekularer Mitspieler ist das Prostaglandin  $E_2$ . Es entsteht über eine Enzymreaktion aus der Arachidonsäure, einem im Körper fast allgegenwärtigen Stoffwechselprodukt. Hier greifen übrigens auch Aspirin und vergleichbare Schmerzmittel ein: Sie unterbinden die Bildung des Prostaglandins.

Geraten Histamin, Bradykinin und Prostaglandin  $E_2$  mit einem freien Nervenende in Kontakt, dann kann dort der Tritt in ein elektrisches Signal verwandelt werden. So steht es im Lehrbuch. Neueren Hypothesen zufolge sind jedoch weit mehr Stoffe an der Entstehung des Schmerzsignals beteiligt; Substanzen mit geheimnisvollen Namen wie „dIHETE“ oder das kürzlich entdeckte „CGRP“. Diesen Eiweißstoff halten einige Biochemiker heute für einen entscheidenden Stein im Puzzle der peripheren Schmerzentstehung („peripher“ sind alle Schmerzleitungen außerhalb des Gehirns und des Rückenmarks).

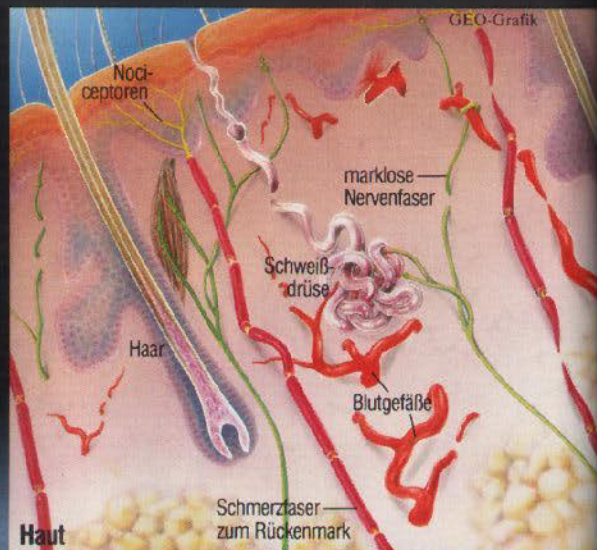
Wie aber die freien Nervenenden diese vielen Signalstoffe bei der Umsetzung in einen elektrischen Impuls nutzen, liegt noch völlig im dunkeln. Dafür ist der weitere Weg des Schmerzreizes bekannt, eine Art Staffellauf über drei Etappen – wenn freilich auch dort der Teufel noch in manchem Detail steckt:

**Etappe 1:** von der Wunde zum Rückenmark;

**Etappe 2:** vom Rückenmark zum Thalamus, dem Hauptteil des Zwischenhirns;

**Etappe 3:** vom Thalamus in die höheren Hirnregionen.

**1** Der Impuls führt über zwei unterschiedliche Arten dünner Nervenfasern, eine „schnelle“ und eine „langsame“ Bahn: Markhaltige, elektrisch isolierte „A-Delta-Fasern“ übertragen rasch den stechenden ersten Schmerz von der Haut zum Rückenmark; leicht verzögert trifft dort der zweite Impuls ein, die dumpe Empfindung, über marklose und nicht isolierte „C-Fasern“. Im Rückenmark wird der Schmerzreiz



**2** ● Über motorische Nervenfasern werden die Muskeln „alarmiert“: In einem Reflex zieht der Fußballer sein Bein zurück.

● Das vegetative Nervensystem warnt direkt die anderen Organe: Der Blutdruck ändert sich, Schweiß tritt aus.

● Von der Relaisstation im Rückenmark führt ein Teil der zweiten Etappe geradewegs

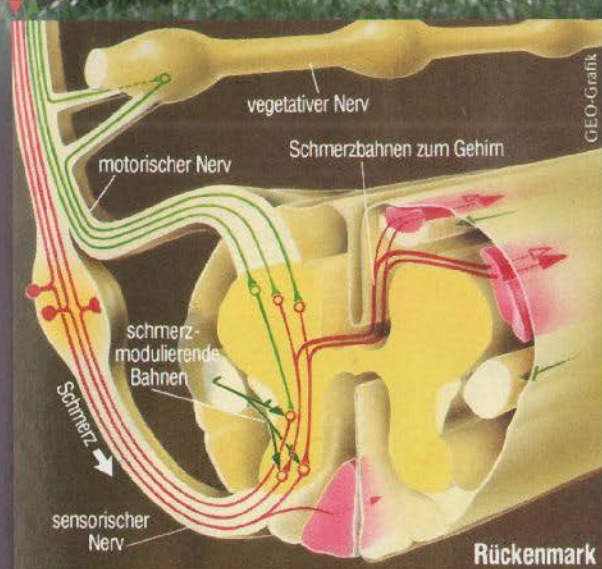
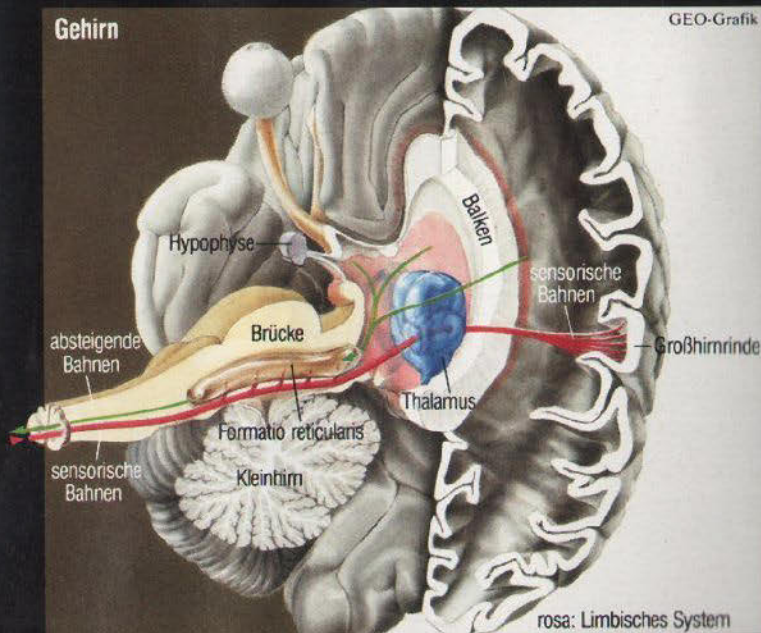
ins Gehirn. Einige Hundertstelsekunden nach der „Verletzung“ trifft das Signal im Thalamus ein, der praktisch alle Reize aus der Umwelt zentral erfäßt und ans übrige Gehirn weitermeldet. Im Bedarfsfall hat der Thalamus „Entscheidungsbefugnis“ für umfassendere Reaktionen auf den Schmerz – er löst zum Beispiel Flucht aus.



vom peripheren aufs zentrale Nervensystem übertragen (zu dem das Rückenmark zählt). Für die Überbrückung des „synaptischen Spaltes“ bedienen sich die Nervenzellen besonderer Botenstoffe, der Neurotransmitter (siehe Seite 56). Die Schmerz-Synapsen warten mit einer Besonderheit auf: Sie haben ihren eigenen Transmitter – jene Substanz P, die schon bei dem Tritt gegen das Schienbein eine Rolle spielte.

**3** Im Thalamus verzweigt sich der Weg zur dritten Etappe. Zum einen gelangt die Information zum Weckzentrum des Gehirns, der Formatio reticularis, die bei Bedarf die Aufmerksamkeit erhöht. Ein weiterer Zweig führt in die Großhirnrinde, wo der Schmerz dem Sportler erstmals zu Bewusstsein kommt: Hier wird er lokalisiert und bewertet, etwa als harmlos. Über einen dritten Pfad erreicht die Meldung auch das limbische System, das Zentrum der Gefühle: Es gibt der Schmerzempfindung Qualität und Bedeutung. Da wird etwa ein „stechender“ Schmerz „unerträglich“. Das Gehirn sendet eine „Gegenbotschaft“ los. Über „absteigende Nervenbahnen“ kann es die Übertragungsstellen der „aufsteigenden“

Nerven im Rückenmark, die Schmerzsynapsen, beeinflussen. Auf den Schmerzreiz hin werden in bestimmten Regionen des Hirns Endorphine freigesetzt. Diese aktivieren absteigende Nervenfasern, deren elektrische Signale ins Rückenmark gelangen. Dort wird an Synapsen der Botenstoff Serotonin ausgeschüttet. Der wiederum hemmt die Freisetzung der Substanz P. Dieser Transmitter überträgt an den Verschaltungsstellen im Rückenmark die Schmerzsignale von der Peripherie. Endorphine werden aber auch im Rückenmark selbst ausgeschüttet und hemmen vor und nach der synaptischen Umschaltung die Schmerzübertragung – der Schmerz wird nun nur noch schwach oder, im Eifer des Gefechts, gar nicht mehr wahrgenommen.







Der Lauf übers Feuer, ein archaisches Schmerzritual, gehört auf der thailändischen Insel Phuket zu Volksfesten. Nun macht die Mutprobe im Westen Mode: In Jeans oder händchenhaltend im Abendanzug holen sich Teilnehmer amerikanischer »Seminare für geistige Revolution« heiße Sohlen und die nicht so neue Erleuchtung: Der Mensch erträgt mehr, als er glaubt. Der Sieg über die Angst vor Schmerz sei, so predigt der Seminar-Guru Tony Robbins, die Eintrittskarte zum Erfolg

**Erleuchtung  
auf glühenden  
Kohlen**



# N

och ziemlich wackelig auf kurzen Beinchen, da stoßen wir uns auch schon den Kopf, drückt uns der Bauch, brechen unsere ersten Zähnnchen durch – und immer haben wir das gleiche Erlebnis: Es tut weh.

Schmerz – der „bellende Wachhund der Gesundheit“, die Warnanlage, die dem Körper mitteilt, ihm drohe Schaden. Schmerz – eine Empfindung aber auch, die das Leben zur Hölle machen kann. Schmerz – eine alltägliche Erfahrung.

Vorgestern frierende Finger, gestern die Begegnung mit einer Reißzwecke und heute die Flamme meines Feuerzeuges. Um die Erinnerung an die Schmerzempfindung aufzufrischen, halte ich den linken Zeigefinger hinein. In selben Moment, da ich den Finger zurückziehe, fühle ich einen stechenden, nur einen Augenblick später einen zweiten, dumpfen Schmerz.

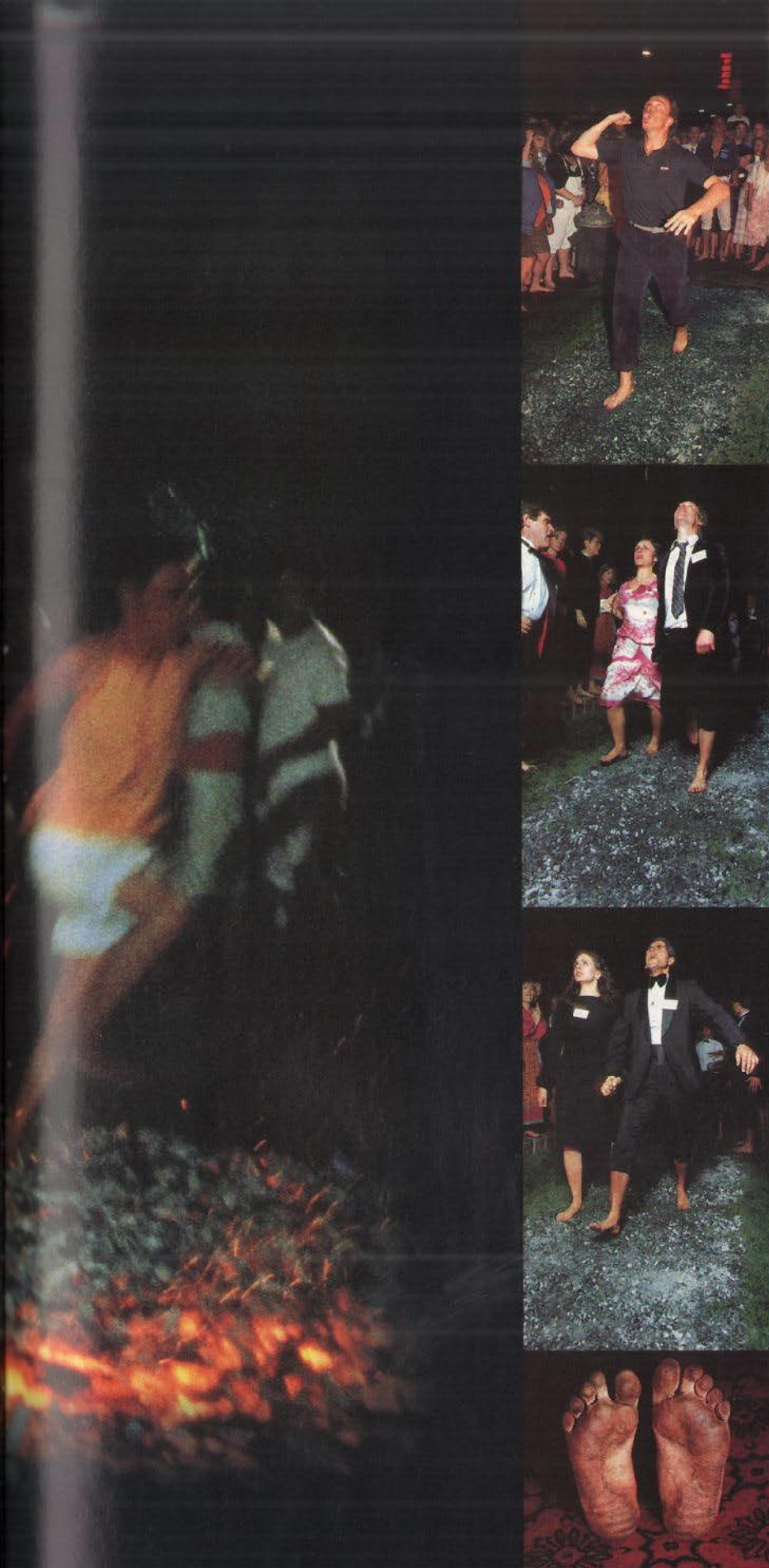
Aber: Nicht der Finger hat den Schmerz, sondern mein Gehirn – also ich – hat ihn im Finger.

Die ersten Zähnnchen und die Feuerzeugflamme bewirken das gleiche: Sie verletzen, wenn auch gering, das Gewebe. Zusätzlich reizen der Druck der hochdrängenden Knochengebilde oder die Hitze – von einer gewissen Intensität an – freie Nervenenden. Diese Nociceptoren – was nichts anderes heißt als Schmerzempfänger – liegen in der menschlichen Haut dicht an dicht, auf der Innenseite meines Unterarms etwa 100 bis 200 auf jedem Quadratzentimeter.

Inzwischen weiß die Wissenschaft, daß diese „Nociception“ eine höchst komplizierte Angelegenheit ist. An den Reaktionen (Flucht, Schreien, Ruhigstellen) beteiligt sich der ganze Körper in einem diffizilen Wechselspiel von elektrischen Nervensignalen und körpereigenen chemischen Substanzen.

Eine ganze Palette solcher Stoffe wurde mittlerweile dingfest gemacht, deren Zusammenspiel etwa einen Tritt gegen das Schienbein als Schmerz empfinden läßt.

Wie aber die freien Nervenenden jenes biochemische Füllhorn bei der Umsetzung in einen elektrischen Impuls nutzen, liegt noch völlig im dunkeln. Den weiteren Weg des Schmerzreizes allerdings, eine Art neuronaler Staffellauf über drei Etappen, glau-





ben die Forscher inzwischen ziemlich gut zu kennen:

- Etappe 1: Von der Wunde zum Rückenmark;
- Etappe 2: vom Rückenmark zum Thalamus, dem Hauptteil des Zwischenhirns;
- Etappe 3: vom Thalamus in die höheren Hirnregionen.

Akuter Schmerz geht vorüber. Er ist, wie Fachleute sagen, eigentlich kein Problem. Doch Nadelstich, Flammenhitze oder frierende Finger sind nur die eine Seite der Medaille.

Die Kehrseite ist der chronische Schmerz. Da sind Migräne und Trigeminal-Neuralgie, Angina pectoris, Rheuma oder Gicht. In diesem düsteren Kontinent des Leidens hausen allein drei Millionen chronisch an Schmerzen leidende Bundesbürger – Patienten, deren Beschwerden länger als ein halbes Jahr andauern.

An diesen Gepeinigten können die Wissenschaftler – nicht zuletzt aus ethischen Gründen – den chronischen Schmerz freilich nicht erforschen. Um auf ihre Fragen Antworten zu finden, die das Leid vielleicht einmal verringern können, müssen sie sich mit Versuchstieren behelfen. Nicht verwunderlich also, daß ich keine Patienten zu sehen bekomme, als ich zum erstenmal Forscher aufsuche, die den Geheimnissen des chronischen Schmerzes auf der Spur sind. Dafür erlebe ich im Physiologischen Institut der Universität Würzburg gleich den Alltag der Neurobiologen.

### **Katzen müssen sterben, weil Menschen unter Schmerzen leiden**

Eine Katze, eingespannt in eine Stahlrohrkonstruktion, künstlich beatmet und über Kabel verbunden mit zu Türmen aufgebauten Meßgeräten. Das Tier ist voll narkotisiert, spürt keinen Schmerz. Nur ein regelmäßiger Piepton verrät das auf Reste reduzierte Leben. Bewußtlos dämmern hier die Versuchstiere ihrem Ende entgegen. Gewöhnlich „verbrauchen“ die Physiologen drei Katzen pro Woche, degradiert zum „Tiermodell“ – zum Wohle der Menschheit.

Die Szene erinnert an einen Operationssaal. Gedämpftes Licht. Nur der kräftige Strahl der OP-Lampe erhellt das freipräparierte Rückenmark der Katze, durchtrennt in Höhe der Nieren. Das Gehirn nimmt am Experiment nicht teil, „weil spinal (im Rückenmark) viel läuft, was zerebral (im Gehirn) modifiziert werden könnte“. Hans-Georg Schaible, dessen Habili-

tationsarbeit 1986 mit dem Preis der Schmerzforscher ausgezeichnet wurde, will mit seinen Versuchen helfen, „Gelenkentzündungen zu verstehen“.

Die Katzen kommen gesund zur Narkose. Auf dem Operationstisch löst die Injektion einer Chemikalie im Kniegelenk eine „experimentelle Gelenkentzündung“ (Arthritis) aus. An Nervenfasern, die vom Gelenk zum Rückenmark und solchen, die von dort zurück in gelenknahe Muskeln führen, leiten die Forscher Nervenimpulse ab. Davon erhoffen sie sich einen Einblick in den Reflexbogen des Schmerzes, der für den chronischen Leidenden oft zum Teufelskreis wird.

Dieses Circulus vitiosus wegen ist die Wechselwirkung zwischen Entzündungsherd und Rückenmark das bevorzugte Experimentierfeld der Würzburger Psychologen. Versprechen kann und will freilich niemand, daß diese Versuche zu anwendbaren Resultaten führen werden.

Die Experimente ziehen sich oft über 24 Stunden hin. Nervosität herrscht wie in einem Notfall-OP. Um acht Uhr früh hat ein australischer Gastforscher mit der Operation des Tieres begonnen. Er ist sichtlich unzufrieden: „Ich habe da zu lange rumgefummelt, ich muß die Faser finden.“ In das monotone Piepen mischt sich ein Knacken. Scheren und Zangen arbeiten sich vorwärts. Grundlagenforschung kann Knochenarbeit sein.

Gegen Mittag übernimmt Schaible das präparierte Tier. Unter dem Binokular sehe ich mir zwanzigfach vergrößert die Elektrode an, die Impulse des *Nervus musculis biceps femoris* ableitet. Ein Bild wie im Lehrbuch. Fast vergesse ich, daß an dem Nerv noch eine Katze hängt, die dem Experiment das wissenschaftliche Prädikat *in vivo*, „im Lebendigen“, verleiht.

Es kommt zu Komplikationen. Unter den hektisch hantierenden Händen des Physiologen bewegt sich ruhig das warme Fell im Atemtakt der Pumpe. „Katzen sind teuer“, sagt Schaible und versucht zu retten, was er retten kann. Um 17 Uhr werden die Oszillographen eingeschaltet.

„Aktivität ist da.“ Zeiger zittern. Aus einem Lautsprecher sickert ein unergründliches Krächzen. „Unsere Ohren“, erklärt der Forscher, „können Unterschiede in den elektrischen Aktivitäten besser ausmachen als die Augen beim Blick auf den Oszillographenmonitor.“

Manche Schmerzforscher haben, wie ich höre, bis zu ihrer Habilitation

noch nie einen Patienten gesehen. Hans-Georg Schaible kennt als ausgebildeter Mediziner auch die Schmerzen der Menschen. Was er über die Tierversuche denkt? „Diese Experimente sind ethisch vertretbar. Vielleicht helfen sie, Rheumaerkrankungen zu verstehen und zu behandeln.“ Wegen des „vielleicht“ müsse der Forscher auch Fanatiker sein.

Beim Heimweg kommen mir Zweifel. Selbst wenn diese Tierversuche

## **Folter: Durch die Hölle der Neuronen**

Geblendete Inder, türkische Folteropfer, ein uruguayischer Gefangener auf der gefürchteten »Cabellete«, ein geknebelter Ugander, das Opfer einer Auspeitschung in Pakistan: Der beste Helfershelfer aller Tyrannen heißt bis heute Schmerz. Denn Folter ist mehr als der Augenblick der Peinigung. Erwartung und Erinnerung erhöhen die Qual





helfen, die Ereignisse im Gelenk besser zu verstehen: Welche Relevanz haben solche Experimente unter Ausschluß des Gehirns für die Wirklichkeit?

Das menschliche Gehirn ist nämlich, nachdem ihm der Schmerz gemeldet worden ist, mit ihm keineswegs fertig. Es kann die Pein kontrollieren, ja sogar unterdrücken. Das Phänomen ist bekannt: Schwerverletzte spüren zunächst keinerlei Schmerz, Fußballspieler spielen mit angebrochenem Bein weiter.

Bei der Enträtselung dieses Phänomens ist die Wissenschaft schon weit vorgedrungen. Schon 1969 hatte der Amerikaner David Reynolds eher zufällig entdeckt, daß sich bei Laborratten durch elektrische Stimulierung des Gehirns starke Betäubungen hervorrufen lassen. Auf der Suche nach der biochemischen Ursache dieser Erscheinung wurde sein Landsmann Solomon Snyder 1973 fündig: In unserem Körper gibt es mikroskopisch kleine Haftstellen, sogenannte Rezeptoren („Empfänger“) für Morphin, also einen körperfremden Stoff. Zwei Jahre später waren die ersten körpereigenen Schmerzblocker isoliert: Sie besitzen eine dem Morphin

ähnliche narkotische Wirkung und erhielten deshalb den Kunstnamen Endorphine, zusammengezogen aus *endogene* („körpereigene“) *Morphine*.

### Durch ein Loch im Schädel wird der Schmerz betäubt

Eine der führenden Gruppen im internationalen Forschungswettbewerb um die körpereigene Schmerzkontrolle arbeitet im Max-Planck-Institut für Psychiatrie am Stadtrand von München. Albert Herz und seine Mitarbeiter in der Abteilung für Neuropharmakologie versuchen, Ordnung in die verwirrende Vielfalt der körpereigenen Schmerzunterdrücker zu bringen: Etwa 20 sind derzeit bekannt – und die lösen auch noch über mindestens drei unterschiedliche Rezeptoren Reaktionen bei verschiedensten Zelltypen aus. Ob Dünndarm oder Samenleiter, Mittelhirn oder Thalamus – in den unterschiedlichsten Geweben fanden Forscher Rezeptoren. In diese passen Endorphine ebenso wie Morphin und andere Opiate hinein wie Schlüssel ins Schloß (siehe Grafik Seite 57 und Kasten „Sucht“, Seite 62).

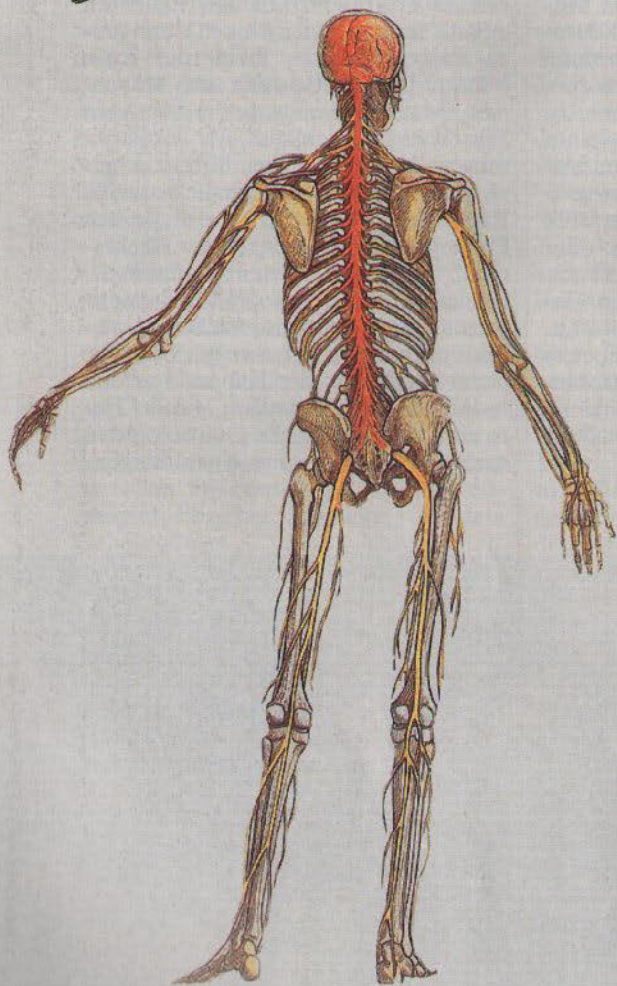
Die Gruppe um Albert Herz arbeitet an einer weiteren Klasse interessanter, den Schmerzreiz beeinflussen der Stoffe – nach ihrem Rezeptor-Typ „Kappa-Liganden“ genannt. Suchtgefahr droht durch diese Substanzen nicht: Ihnen fehlt etwas, das den Griff zu Opiaten so reizvoll macht: „Kappa-Liganden“ verursachen keine Euphorie, kein Wohlbefinden. Allerdings lösten sie in klinischen Versuchen bei Patienten deutliche psychische Veränderungen aus.

„Bis Kappa-Liganden vielleicht einmal in großem Stil den Patienten zugute kommen, wird noch eine ganze Zeit vergehen“, meint der Brite Mark Millan, Assistent am Münchener Max-Planck-Institut, seit acht Jahren in Deutschland. Als ich ihn in seinem Labor besuche, füttert er gerade sein Bürotier, eine dicke weiße Ratte. Sie lebt zwischen den prallen Papierpacken auf seinem Bücherregal. „Ich liebe Ratten“, gesteht er. Als er mir ein paar Standardexperimente der Schmerzforschung vorführt, mit denen er die Wirksamkeit neuer Stoffe wie der Kappa-Liganden testet, redet er freundlich auf die Tiere ein. Ein Hämmerchen saust auf den nackten rosa Schwanz eines Jungtie-





# NERVEN



## Von Kopf bis Fuß ein neuronaler Mensch

Nerven erreichen mit ihren Ausläufern jeden Körperteil, ob Hand oder Herz, Auge oder Zehenspitze. Gehirn und Rückenmark bilden das zentrale, die dort ein- oder von dort ausgehenden Nerven das periphere Nervensystem.

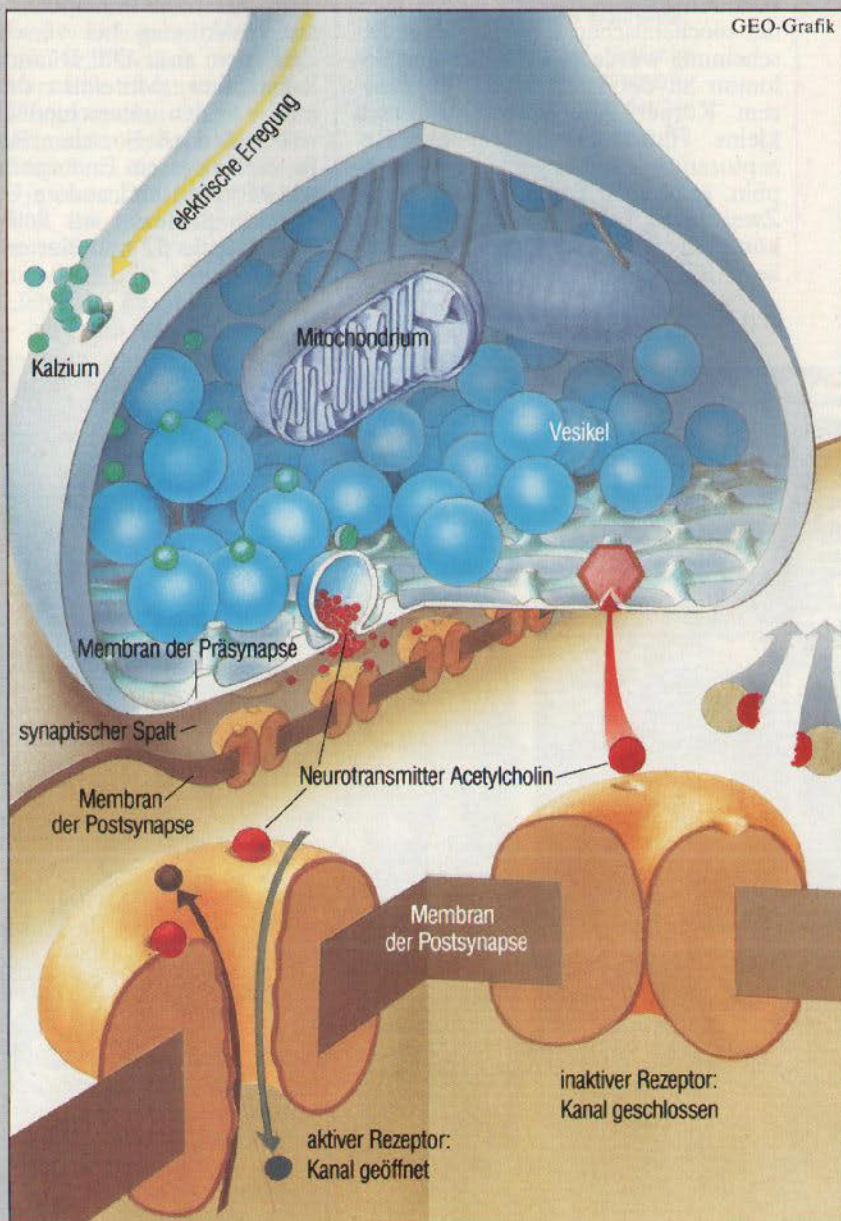
## Synapsen: Einbahnstraßen für den Geist

Synapsen schlagen die biochemische Brücke von Nervenzelle zu Nervenzelle. Dieser molekulare Signaltransport funktioniert in der Regel nur in einer einzigen Richtung; an den Synapsen wird somit die Nervenbahn zur Einbahnstraße. Dazu muß ein kleines, aber bedeutendes Hindernis überwunden werden: der sogenannte synaptische Spalt, eine Strecke von etwa 0,000001 Zentimeter Länge, gefüllt mit Flüssigkeit. Kurzfristig schaltet das Nervensystem also von elektrischer auf che-

mische Signalübertragung um. Das ankommende Signal verändert das elektrische Potential in der synaptischen Membran. Folge: Kalzium-Ionen dringen ein. Diese positiv geladenen Teilchen sorgen dafür, daß kleine Bläschen – die Vesikel – sogenannte Neurotransmitter-Moleküle in den synaptischen Spalt schütten. In weniger als einer Tausendstelsekunde wandern die Moleküle durch den winzigen Spalt an die Membran der gegenüberliegenden Zelle. Dort heften sie sich an und öffnen

entweder direkt – wie es der Neurotransmitter Acetylcholin tut – oder über einen biochemischen Umweg die Kanäle für positiv geladene Natrium-Ionen. Beim Acetylcholin ist ein und derselbe Eiweißstoff Rezeptor und Kanal zugleich. Da Wissenschaftler dieses Rezeptor-Kanal-Molekül in relativ großen Mengen aus den Riesennervenzellen des Zitteraals isolieren können, ist der Acetylcholin-Rezeptor der am besten erforschte Rezeptor überhaupt.

In der Grafik ist daher – modellhaft – die Situation für eine Acetylcholin-Synapse gezeigt: Einem Schlüssel vergleichbar öffnen die Transmitter-Moleküle (rote Punkte in der Grafik) von der „Prä-Synapse“

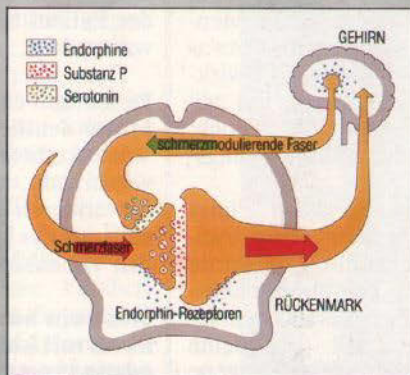


GEO-Grafik



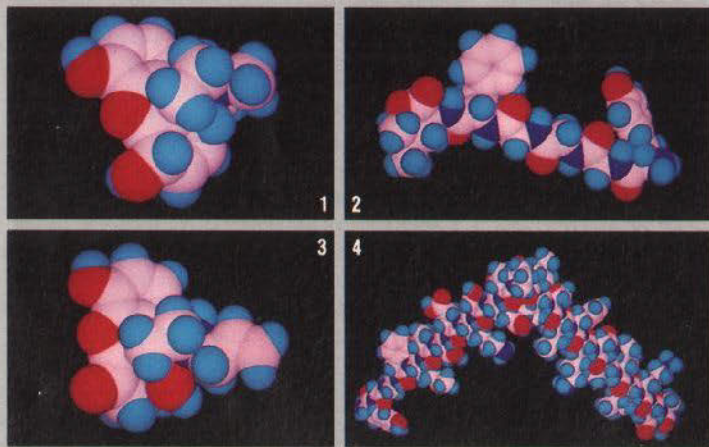
das „Schloß“, nämlich die Kanäle in der Membran der gegenüberliegenden „Post-Synapse“. Dadurch können positiv geladene Natrium-Ionen in die Zelle einströmen. Nun baut sich eine elektrische Spannung auf, die sich entlang der Nervenmembran fortplant. Zu dieser Erregung kommt es jedoch nur dann, wenn ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird. Die Übertragungsstellen zwischen den Nerven arbeiten also wie Ventile: Ist der Reiz zu schwach, wird er ignoriert. Sobald das eintreffende elektrische Signal abbricht, werden die ausgeschütteten Transmitter-Moleküle auch schnell wieder abgebaut.

## Modulatoren: Wenn Moleküle da- zwischenfunken



Die Signalübertragung von einer Nervenzelle zur anderen kann moduliert werden. An einer Synapse können zum Beispiel weitere enden, die dann die Übertragung hemmen, so zur Schmerzkontrolle im Rückenmark: In bestimmten Regionen des Gehirns setzt der Schmerzreiz Endorphine frei. Die aktivieren absteigende Nervenfasern, deren elektrische Signale an Synapsen im

Rückenmark die Ausschüttung des Botenstoffs Serotonin bewirken. Der wiederum hemmt die Freisetzung der Substanz „P“, die an den Verschaltungsstellen im Rückenmark die Schmerzsignale von der Peripherie überträgt. Endorphine werden auch im Rückenmark ausgeschüttet und hemmen vor und nach der synaptischen Umschaltung die Schmerzübertragung.



Es ist seit langem bekannt, daß Morphin, eine Substanz aus dem Extrakt der Opiumpflanze, sehr wirksam Schmerzen unterdrücken kann. Doch erst seit der Entdeckung körpereigener Schmerzkiller – der Endorphine – wissen die Forscher auch warum: Morphin (Bild 1) hat eine dem Beta-Endorphin (4) und dessen hochwirksamem Tochter-Molekül leu-Enkephalin (2) sehr ähnliche Raumstruktur. Diese sogenannten Kugelkalotten-Modelle – es sind Computer-Grafiken – zeigen den räumlichen Aufbau der Moleküle; die unterschiedlichen Atome sind mit verschiedenen Farben markiert.

## Morphin: Ein falscher Schlüssel im Schloß

Endorphin und Enkephalin passen wie Schlüssel in das gleiche Schloß, den Opioid-Rezeptor. Obwohl Morphin eine, chemisch gesehen, ganz andere Substanz ist, paßt sie wie ein Nachschlüssel ebenfalls in den Rezeptor und kann auf diese Weise die Wirkung der Endorphine simulieren – eine Laune der Natur. Mit Naloxon (Bild 3) kann die Endorphin- und Morphin-Wirkung verhindert werden: Die Moleküle des Naloxon heften sich an die Rezeptoren und verdrängen – wenn sie im

Überschuß vorhanden sind – die Moleküle des Morphins und des Endorphins. Endorphine sind Neurotransmitter, wie auch Serotonin, Substanz P oder Acetylcholin. Wenn sie der Veränderung eines Signals dienen, werden sie „Neuromodulatoren“ genannt. Das Nervensystem bedient sich vieler unterschiedlicher Moleküle. Allein an den Verschaltungen im Rückenmark sind, nach heutigem Stand der Kenntnis, etwa 30 Transmitter oder Modulatoren beteiligt.

res nieder, ein kräftiger Lichtstrahl heizt das Schwanzende einer anderen Ratte auf. Die Reaktionszeit bis zum Reflex dient als Maß für die Wirksamkeit eines zuvor eingespritzten Mittels. Solche „Tail Flick“-Experimente gehören in der Pharmaindustrie zur täglichen Routine.

„Aber Schmerz leiden die Tiere nicht“, sagt der Rattenfreund ungefragt.

Immerhin kann die Wissenschaft inzwischen die körpereigene Schmerzkontrolle recht gut beschreiben. Das Gehirn startet eine Art „Gegenverkehr“ zum Meldegang des Schmerzsignals. Über „absteigende Nervenbahnen“ hat es die Übertragungsstellen der „aufsteigenden“ Nerven im Rückenmark, die Schmerzsynapsen, im Griff (siehe Kasten Seite 56).

So sehr es mich fasziniert, in die subtilen Mechanismen von Schmerzwahrnehmung und körpereigener Schmerz-Kontrolle eingeweiht zu werden, so schwer fällt es mir, die Brücke zur Schmerzempfindung zu schlagen.

Dabei können die Schmerzforscher Ergebnisse vorweisen. Die Entdeckung der körpereigenen Schmerzunterdrückungssysteme führte zur „periduralen Applikation“ von Opiaten: Die Schmerzkiller werden über (oft eingepflanzte) Pumpen direkt dem Rückenmark zugeführt. Dadurch wird die Opiatwirkung verlängert, werden negative Begleiterscheinungen weitgehend ausgeschaltet. So können beispielsweise Krebspatienten ihre letzten Monate ohne Qualen und ohne Rausch verbringen.

Auch David Reynolds Entdeckung, daß die elektrische Stimulierung bestimmter Hirnregionen betäuben kann, hat seit 1974 Eingang in das Arsenal der Schmerzbe kämpfungsverfahren gefunden. Nach anfänglichen Schwierigkeiten gilt die Methode heute als Routine – wenn nichts anderes mehr hilft.

Im Hospital der University of California in San Francisco haben Ärzte mehr als 350 solcher Eingriffe vorgenommen. Dabei bohren sie dem Patienten bei örtlicher Betäubung ein kleines Loch in die Schädeldecke. Da Verletzungen des Gehirngewebes – paradoxerweise – selbst keinerlei Schmerzen verursachen, kann ein Mensch erleben, wie – mit äußerster Akribie – eine Sonde in seinen Kopf eingeführt wird. Während der Operation ermittelt der Neurochirurg mit Probestimulationen, deren Wirkung er beim Patienten abfragt, exakt die



richtige Stelle im Gehirn. Auf einem Röntgenscreen verfolgt er die Elektrode auf ihrem Weg durchs Hirngewebe. „Anfangs lag die Erfolgsquote bei 50 Prozent, heute liegen wir bei über 90“, freut sich der Chirurg Yoshio Hosobuchi.

Nicht alle seine Kollegen teilen jedoch diese optimistische Einschätzung. Ronald Dubner von der Schmerzklinik in Bethesda bei Washington winkt ab: „Das ist alles viel komplizierter.“ Die von seinem Team durchgeführten Operationen wiesen eine sehr viel geringere Erfolgsrate auf. Und selbst diese sei wahrscheinlich kein Effekt der Stimulation, sondern ein Placeboeffekt.

Damit nennt Dubner das Stichwort, das bei Schmerzforschern meist eine gewisse Ratlosigkeit hervorruft.

„Jede unspezifische, biologisch wirkungslose Scheinbehandlung“, so Schmerzforscher Robert Schmidt, Herausgeber und Autor einer Reihe von Lehrbüchern der Physiologie, „ist ein Placebo.“

„Der Mechanismus des Placebo-Effektes ist noch völlig unklar, aber sein Vorteil liegt auf der Hand: Er hilft und ist doch vollkommen harm-

los“, schreibt Schmidt in seinem Buch „Medizinische Biologie des Menschen“. Für den Physiologen ist etwas offenbar nur dann „biologisch“ wirksam, wenn sich die Wirkung mit seinen Methoden messen läßt. Jedoch: Wie kann etwas, das hilft, wirkungslos sein?

Ich bin zum spannendsten Punkt meiner Entdeckungstour vorgedrungen: Bei Scheinbehandlungen wurde der Placebo-Effekt bei durchschnittlich der Hälfte aller Versuchspersonen beobachtet. „Auf irgendeine Weise können wir unsere eigene Schmerzunterdrückung einschalten“, wundert sich Jon Levine von der University of California in San Francisco.

Levine hat 1978 in einer vieldiskutierten Arbeit nachweisen können, daß die Placebo-Wirkung zumindest teilweise durch Endorphine ausgelöst wird. Vor drei Jahren hat er gezeigt, daß das Placebo, etwa eine Salzlösung, tatsächlich „biologisch unwirksam“ ist: Bei Patienten, denen zuvor Weisheitszähne gezogen wurden – „ein exzellentes menschliches Schmerzmodell“ – zeigten heimliche Infusionen mittels einer automatisch gesteuerten Pumpe keinerlei Wir-

kung, Infusionen, von denen also weder Patient noch Pfleger oder Arzt etwas wußten.

Dann aber wurde einer Gruppe von Patienten ein angeblich wirksames Mittel deutlich sichtbar – über einen Venenkatheter neben ihrem Bett – verabreicht, während ein Pfleger einer anderen Gruppe vom Nebenzimmer aus das gleiche Mittel heimlich in den Venenkatheter beförderte.

### Wie sehr es schmerzt, kann mit keinem Apparat gemessen werden

Ergebnis: Nicht nur der Schmerz der Patienten, die *gesehen* hatten, daß irgend etwas in den Tropf gefüllt worden war, wurde so wirksam betäubt wie mit einer normalen Morphindosis, sondern auch der Schmerz jener, die scheinbar nichts wußten. Geringste Einflüsse, vielleicht ein besonderer Tonfall des Pflegers, der von den Patienten unbewußt registriert worden war, könnten den Placebo-Effekt schon ausgelöst haben.

Denn die individuelle, subjektive Empfindung Schmerz entzieht sich den messenden Wissenschaften. Letztlich sind nur die Aussagen der Leidenden selbst verfügbar: Die bewußt wahrgenommene, mit dem Begriff „Schmerz“ verbundene Empfindung ist eine Abstraktion. Da helfen keine Versuche mit Ratten oder Katzen, da muß der Mensch selbst ins Labor.

Obwohl der individuelle Schmerz nicht „objektiv“ gemessen werden kann, hat sich eine Forschungsrichtung mit dem Namen „Algesimetrie“ – Schmerzmessung – etabliert.

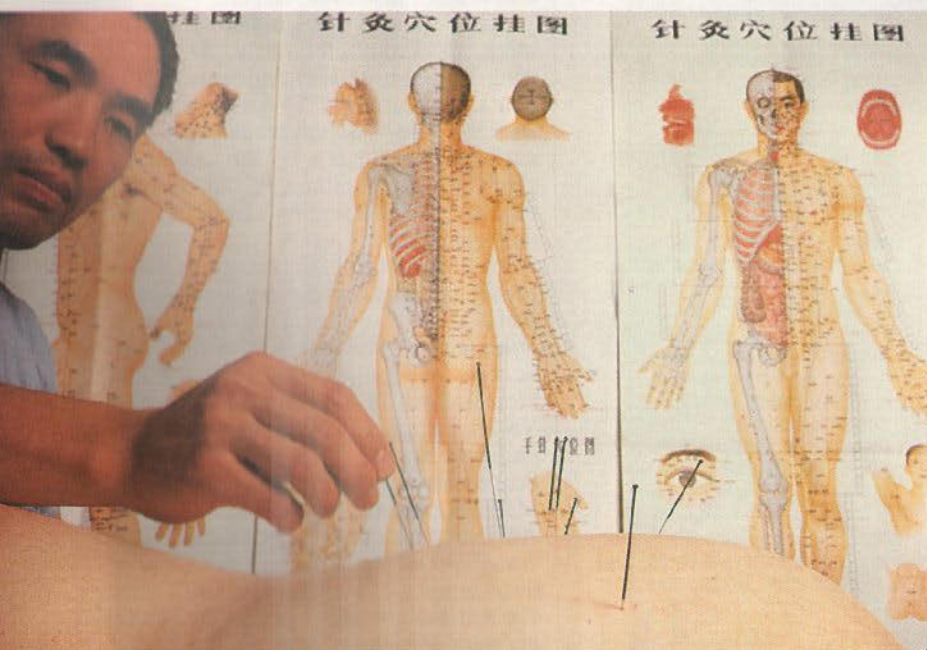
„Möglichst gleiche Menschen“ finden sich als Versuchspersonen im Meßraum des Hamburger Instituts ein, in dem die Gruppe des Physiologen Burkhard Bromm sich mit Schmerzmessung beschäftigt. Es sind Studenten, die, so Bromm, „in keinem Parameter mehr als zehn Prozent von der Norm abweichen“ dürfen. Selbst das Frühstücksbrötchen ist standardisiert. Hier sollen nicht kranke, sondern gesunde Menschen anhand einer Skala von eins bis zehn einen akuten Schmerz bewerten, ausgelöst etwa durch einen scharfen Hitze-Impuls.

„Denn der Schmerz im Labor“, davon geht Bromm aus, „ist viel zuverlässiger als der in der Klinik.“

Nur so ließen sich vergleichende Aussagen über die Wirkung schmerzstillender Behandlungen machen. Kürzlich konnte seine Gruppe mit ih-

## Wenn Nadelstiche Leiden lindern

Sorgfältig sticht ein chinesischer Akupunkteur feine Nadeln in die Haut seines Patienten. Schautafeln an der Wand zeigen, an welchen Punkten des menschlichen Körpers eine ganz bestimmte Schmerzempfindung beeinflusst werden kann. Lange war diese uralte Therapie in der westlichen Schulmedizin umstritten. Inzwischen jedoch kann die schmerzlindernde Wirkung der Akupunktur naturwissenschaftlich erklärt werden





ren standardisierten Methoden demonstrieren, daß ein Mittel gegen Depressionen eindeutig schmerzlindernde Wirkung hat.

„Die Schmerzforschung in Deutschland ist weltweit anerkannt“, beteuert Bromm in Hamburg, wo im kommenden Juli erstmals der Welt-Schmerzkongreß mit 2500 Wissenschaftlern stattfinden wird. Seine Einschätzung aber gilt allenfalls für die Grundlagenforschung. Eine kürzlich veröffentlichte „Schmerz-Expertise“ konstatiert dagegen: „Auf internationaler Ebene kommt die klinische Schmerzforschung aus der BRD mit einem Anteil von etwa einem Prozent unter den englischsprachigen Publikationen über Schmerz nicht zur Geltung.“ Autoren der Expertise sind der Physiologe Manfred Zimmermann, Präsident der „Gesellschaft zum Studium des Schmerzes“, und seine Mitarbeiterin Hanne Seemann, eine Psychologin.

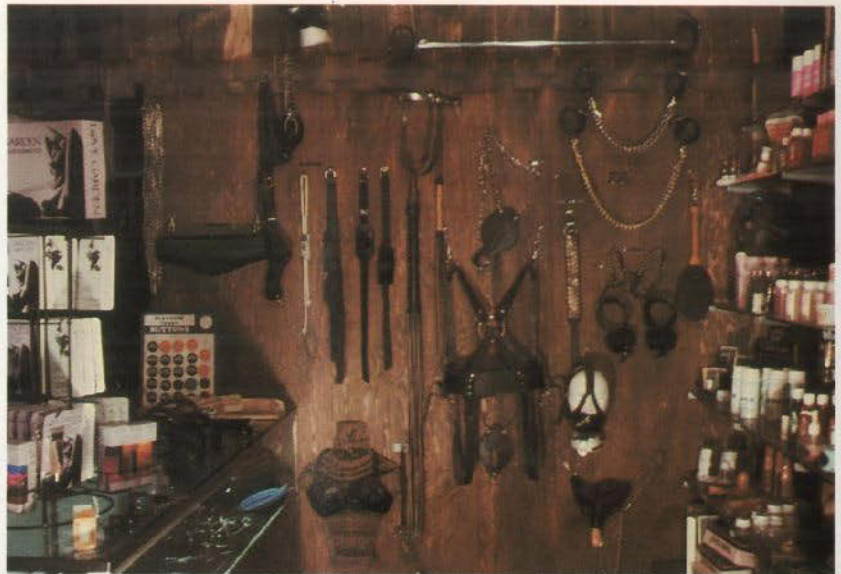
Unter den wenigen klinischen Arbeiten ist die Therapieforschung mit Schmerzmitteln (Analgetika) laut Expertise „überproportional vertreten“. Die Ergebnisse gibt es in unseren Apotheken: Bundesbürger können unter 623 Analgetika wählen, 300 Millionen Schmerzmittelpackungen verbrauchen sie jährlich, jeder sechste versorgt sich täglich mit einer Schmerztablette, inklusive Nebenwirkungen.

Neben dieser chemischen Notbremse aber gibt es die „außerordentliche Vielfalt von Möglichkeiten, in Schmerzwahrnehmung und -erlebnis modulierend einzugreifen“, wie der Physiologe Zimmermann die heilsamen Kräfte der Psychologie einschätzt.

Um die kümmert sich in seinem Institut in erster Linie Hanne Seemann. Als Psychologin fühlt sie sich im Kreis der messenden Forscher oft wie „im Vakuum“. Den Ansatz, am Tiermode das wahre Wesen des Schmerzes beim Menschen zu ergründen, hält sie für notwendig, aber nicht hinreichend. „Da müssen auch andere Wege beschritten werden.“

Einen anderen Weg, des Schmerzes Herr zu werden, versucht Wolfgang Larbig zu gehen. Der Neurologe am Psychologischen Institut der Universität Tübingen will verstehen, wie Schmerz in Extremsituationen unterdrückt oder kontrolliert wird. Er reist um die Welt und sieht sich archaische Schmerzrituale an, Feuerläufer in Griechenland, Hakenhänger in Sri Lanka.

Einen Fakir hat Larbig in sein Labor geholt und während diverser Mar-



Mit bizarren Folterinstrumenten suchen Sado-Masochisten schmerzhaft Lust. Zwar sind durch Folter erlittene Schmerzen physiologisch völlig identisch mit jenen lustvollen Qualen. Aber deren Signale werden im Gehirn unterschiedlich wahrgenommen. Auch Schmerzen, die sich Flagellanten wie diese philippinische Frau freiwillig zufügen, gewinnen dort eine rauschhafte Komponente

**Lust, die sich aus Qualen nährt**

terübungen dessen Hirnströme per EEG aufgezeichnet. Wie bei einem Weltklassesprinter vor dem Start zeigte der Körper des Fakirs höchste Leistungsbereitschaft, peitschten die Stresshormone Adrenalin und Noradrenalin seinen Kreislauf auf Alarmstufe eins.

**Das Hirn dämpft nicht nur den Schmerz, es macht ihn sich auch**

Gleichzeitig aber beobachtete der verblüffte Larbig, wie die Hirnaktivitäten langsamer wurden. Die Steuerzentrale versenkte sich in einen schlafähnlichen Zustand. Das Gehirn „arbeitet“ offenbar mit derart großem Erfolg an der Unterdrückung des Schmerzes mit, daß der Fakir selbst viele Fleischwunden ohne Qual zu erdulden vermag.

Larbig und sein Kollege Wolfgang Miltner gehen nun einen Schritt weiter. Sie wollen herausfinden, ob auch „normale Mitteleuropäer“ die Fähig-

keit der Schmerzkontrolle erlernen können. Für diesen Zweck haben die Wissenschaftler ein Trainingsprogramm entwickelt, bei dem sich die Probanden allmählich durch „Try and Error“, durch „Versuch und Irrtum“, vortasten.

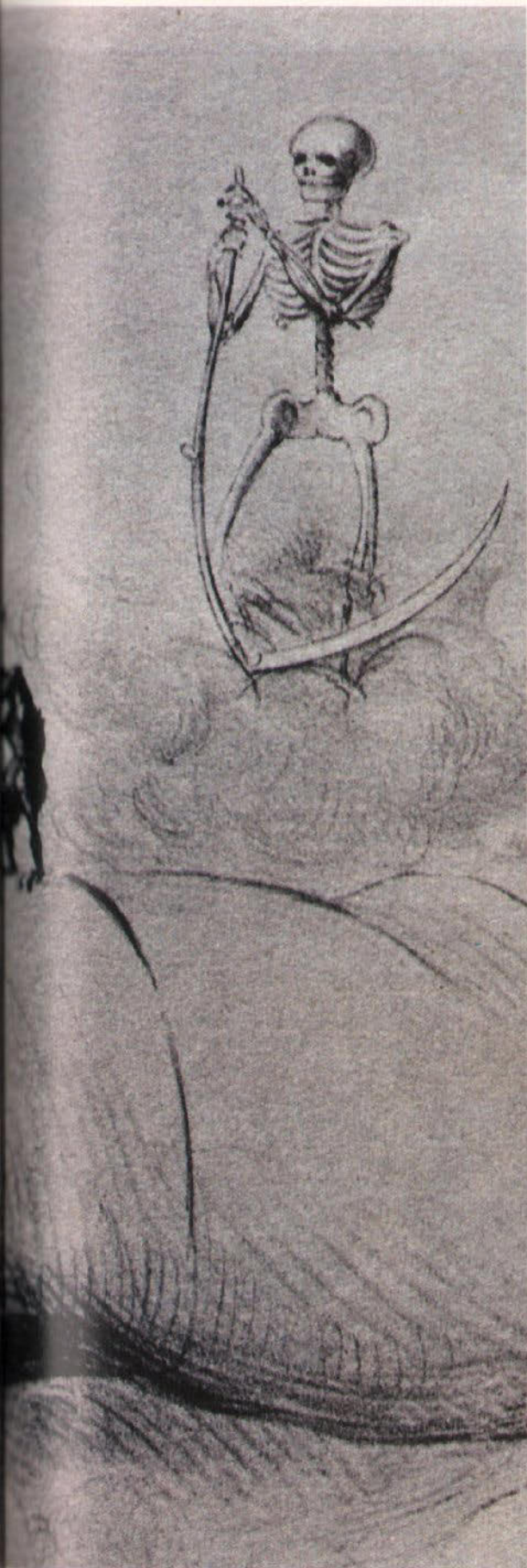
Nach einem elektrisch ausgelösten Schmerzreiz an einem Finger zeigt das EEG die Stärke der Gehirnreaktion an. Die Meßkurven werden auf einem Bildschirm in einfache Symbole umgesetzt. Daran können die Versuchspersonen erkennen, ob es ihnen gelungen ist, die Reaktion ihres Gehirns auf den Schmerzreiz willentlich zu beeinflussen.

Wie wir allerdings die psychische Schmerzunterdrückung in Gang setzen, ist noch nicht bekannt. Vermutlich spielen auch hier die Endorphine eine Rolle. Bis vor zwei Jahrzehnten galt noch eine Art „Klingelknopf-Theorie“, die der Naturwissenschaftler und Philosoph René Descartes im Jahre 1644 entwickelt hat: Halte ich meinen Finger in die Flamme,









## **Migräne: Martern, die nicht enden wollen**



Wenn der Schädel vor Schmerzen zu zerspringen scheint, verspricht der Griff zu Pille rasche Hilfe: Diese Botschaft der Pharmazeuten – hier ein amerikanisches Plakat aus dem letzten Jahrhundert – zieht noch immer. Bundesbürger konsumieren alljährlich drei Milliarden Schmerzpillen und -zäpfchen. Als Waffen gegen chronische Pein sind diese Analgetika nur bedingt geeignet: Dauerschluckern drohen Sucht und weitere Nebenwirkungen

dann läuten im Gehirn die Alarmglocken.

1965 aber revolutionierten Ronald Melzack und Patrick Wall diese Vorstellung mit der sogenannten „Gate Control Theory“, der „Torwächter-Theorie“. Sie vermuteten „Torwächter“ im Rückenmark, die manche Schmerzreize passieren lassen, anderen jedoch den Weg versperren. Diese Theorie – zwar immer noch umstritten – hat die durch die Psyche gesteuerte Schmerzhemmung als körpereigene Instanz wissenschaftlich salonfähig gemacht.

„Damit“, sagt Ernst Pöppel, Leiter des Instituts für Medizinische Psychologie der Universität München, „hat sich unser Verständnis vom Schmerz grundlegend gewandelt.“ Die Hierarchie wurde praktisch auf den Kopf gestellt. „Statt von unten nach oben heißt es jetzt von oben nach unten. Das Gehirn ist nicht ein bloßer Empfänger von Reizen.“

Nach Pöppels Ansicht ist Schmerz eine Sinneswahrnehmung, vergleichbar dem Sehen und Hören. Er erinnert an die Arbeiten der amerikanischen Medizin-Nobelpreisträger von 1981, David Hubel und Torsten Wiesel. Deren Ergebnisse kommentiert Pöppel so, daß die Welt im Gehirn nicht nur passiv abgebildet wird. Vielmehr fügen sich Klänge und Bilder in bereits vorhandene Kategorien. Unterschiede in diesen Kategorien wie Musikempfindung und Weltsicht sind „geprägt“, wie Verhaltensforscher sagen.

Geprägt ist auch die Fähigkeit, Schmerzen zu empfinden. Ronald Melzack ließ zwei Gruppen von Foxterriern unterschiedlich aufwachsen, die eine, ohne daß sie irgendeinen Schmerz erleben konnten, die andere „normal“. Als Melzack die ausgewachsenen Hunde mit einem offenen Feuer konfrontierte, prüften die „Normalen“ die Flammen und schnüffelten daran – aber nur ein einziges Mal. Die schmerzfrei aufgezogenen Hunde hingegen scheuten das Feuer nicht: Immer wieder verbrannten sie sich die Schnauze. Sie waren offenbar „schmerzblind“.

Genau das Gegenteil berichtet Melzack von Naturvölkern, deren Frauen bis unmittelbar vor der Niederkunft auf dem Feld arbeiten. Sobald sie ihr Kind geboren haben, kehren sie zur Arbeit zurück. Der Mann dagegen legt sich währenddessen mit schwersten „Geburtswehen“ nieder – mit Sicherheit ohne nociceptive Signale aus der Gebärmutter.

„Schmerz hat viele Quellen“, glaubt Pöppels Mitarbeiter Wolfgang



Keeser, „und die Nociception ist nur ein kleiner Teil.“ Melzack vermutet eine Art „Schmerz-Gedächtnis“. Bei einem oft unbedeutenden äußeren Reiz „erinnert“ sich dieses Gedächtnis an einen Reaktionsablauf und spult sein Programm gnadenlos ab. Zumindest ein Teil des sogenannten Phantomschmerzes – wenn etwa ein längst amputiertes Bein schmerzt – kann damit erklärt werden. Ebenso

# SUCHT

## Die tückische Schwester des Schmerzes

Opiate wie Morphinum oder Heroin machen süchtig. Sucht hat mindestens zwei Gesichter: Abhängigkeit und Toleranz. Abhängigkeit entsteht vermutlich, wenn das Nervensystem der hemmenden Opiatwirkung ständig entgegenwirkt. Fällt die Droge weg, reagieren die Nerven „überschießend“. Folge: Entzugserscheinungen. Toleranz könnte entstehen, weil die ständig besetzten Rezeptoren weniger effektiv „arbeiten“ und immer mehr Rezeptoren für die gleiche Wirkung besetzt werden müssen. Folge: Verlangen nach höherer Dosis. Auch Endorphine, körpereigene Schmerzdämpfer, können süchtig machen. Aber der Körper baut sie rasch ab.

wie das Hirn Schmerz unterdrücken kann, ist es, argumentiert Pöppel, auch fähig, „sich ihn zu machen“.

Solche Erkenntnisse der Psychologie sind besonders wichtig für jene Menschen – allein 400 000 Leidende in der Bundesrepublik –, deren chronischer Schmerz als „therapieresistent“ gilt. Die „Problempatienten“ haben im Durchschnitt eine zehnjährige „Karriere“ hinter sich und die unterschiedlichsten Therapien über sich ergehen lassen, ohne das sich ihr Zustand gebessert hätte. Sie können von Glück sagen, wenn sie schließlich in eine Schmerzzambulanz überwiesen werden – wie die in Gießen.

„Die Ärzte dieser Patienten haben immer wieder versucht, organische Schäden mit spezifischen Therapien zu behandeln und nicht beachtet, daß meist der Schmerz selbst die Krankheit ist“, sagt Horst Ferdinand Herget. Der Anästhesiologe betreibt seit 1974 die Schmerzzambulanz an der

Gießener Universität. Neurologen, Internisten, Psychologen, Anästhesiologen und auch schon mal Orthopäden oder Gynäkologen treffen sich hier regelmäßig zu „Schmerzkonferenzen“. Gemeinsam entscheiden sie dann, wie der einzelne Patient am besten zu behandeln ist. Vielfach beginnt die Behandlung mit Entzug: Die – bisweilen süchtigen – Patienten sollen erst einmal die Schmerzmittel absetzen, die oft inzwischen selbst die Schmerzen verursachen.

Meist therapieren die Gießener „multifaktoriell“: Mehrere Behandlungsformen werden gleichzeitig eingesetzt. Und das sind neben gängigen Verfahren – Tabletten, lokale Schmerzbetäubung, gezielt ins Rückenmark gegebene Opiate oder Akupunktur – auch Therapien, die, so Herget, „bedauerlicherweise Außen-seitermethoden genannt werden“.

In der Gießener Schmerzzambulanz wird eine andere Sprache gesprochen als gemeinhin in Arztpraxen. Da soll die „Schmerzverarbeitung moduliert“ werden. Da kommen auch einst bewährte Verfahren zu Ehren – Schröpfköpfe etwa oder Blutegel. Auch wenn Pflanzenextrakt-Medikationen in ihren Wirkungen physiologisch oder biochemisch oft nicht erklärbar sind: Die meisten Patienten verlassen die Ambulanz mit deutlicher Linderung ihres Leidens.

„Man muß vorurteilsfrei sein“, fordert Hergets Mitarbeiter Volker Lüben. „Wenn ich etwas nicht verstehe, heißt das noch lange nicht, daß es nichts taugt.“ Placebo hin oder her: „35 Prozent erfolgreiche Behandlungen durch sogenannte Placebo-Effekte sind ein wichtiges Potential. Die nehme ich doch gerne mit.“

### Wer den Schmerz wegbringt, macht mitunter Menschen krank

Bei einer so komplexen Erscheinung wie dem Schmerz spiele, sagt Horst Ferdinand Herget, auch der Lebensrhythmus eine wichtige Rolle, nicht minder die Ernährung. „Auch ich glaube nicht an Geistheilungen, aber ich weiß doch selbst, wie beeinflussbar man ist.“

Es gibt jedoch auch Ärzte, die Schmerzfreiheit als Ideal verneinen. „Wir müssen den Menschen behandeln, nicht nur die Krankheiten“, sagt Christof Müller-Busch, Narkosearzt und Schmerztherapeut am „Gemeinschaftskrankenhaus“ in Herdecke. Hier wird versucht, mit den Möglichkeiten einer „anthroposophisch-er-

weiterten“ – einer „ganzheitlichen“ – Medizin dem Phänomen Schmerz näherzukommen.

„Wenn etwa einer mit Rückenschmerzen kommt“, erläutert Müller-Busch, „dann muß ich auch viel über seine Lebenssituation wissen. Vielleicht hat er ja symbolisch ‚sein Kreuz zu tragen‘.“ Den Schmerz grundsätzlich wegbringen zu wollen, könne zu Problemen führen. Es komme vor, daß – oft durch eine spektakuläre neue Therapie – die Schmerzen erfolgreich bekämpft würden, sich jedoch nach kurzer Zeit eine neue schwere Erkrankung einstelle.

„Der Patient muß lernen, daß ein Schmerz auch Sinn hat“, fordert der Arzt. „Er soll seine Rolle als Kranker anders empfinden.“

„Drei-Minuten-Medizin bringt überhaupt nichts“, kritisiert Müller-Busch die hieszulande übliche Praxis. Solange bei uns eingehende Beratung und Betreuung nur dürftig, Spritzen und Verschreibungen jedoch reichlich honoriert würden, werde sich nichts ändern. Schließlich stünden gewichtige wirtschaftliche Argumente der Gesellschaft den ökonomischen Interessen der Ärzte und der Pharmaindustrie gegenüber.

„Rund 200 Millionen Arbeitstage“, rechnet der Kritiker vor, „gehen jährlich durch chronische Schmerzen in der Bundesrepublik verloren.“ Die Kosten werden auf 30 bis 35 Milliarden Mark im Jahr geschätzt. Dennoch gelangen nach Schätzung des Herdecker Arztes nur etwa zwei Prozent der Problempatienten in geeignete Schmerzzentren, -praxen oder -ambulanzen.\*

Bei alledem sind wir zu sehr bereit, den Schmerz als das eigentliche Übel zu bekämpfen und machen uns über dessen – meist sogar problemlos abstellbare – Ursachen viel zu selten Gedanken. Auf die besinnen wir uns, wenn überhaupt, oft erst, wenn die Ärzte mit ihrem Latein am Ende sind.

Auch bei mir meldet sich jetzt der „bellende Wachhund der Gesundheit“: Vom tagelangen Schreibtischsitzen und Maschineschreiben schmerzt das Kreuz. Ich immerhin kann dem abhelfen. □



**Dr. Jürgen Neffe**, 30, hat Biologie studiert und als Biochemiker gearbeitet. Der Preisträger des Wettbewerbs „Reporter der Wissenschaft“ ist seit 1985 GEO-Redakteur.

\* Anschriften sind erhältlich bei der Gesellschaft zum Studium des Schmerzes, 2. Physiologisches Institut der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 326, 6900 Heidelberg.



# Intelligenz im Büro nimmt neue Formen an.



**M**usterbeispiele dieser neuen Form von Intelligenz sind die Kompakt-Computer T2100 und T3100 von TOSHIBA, die den Umgang mit Computern, ihre Einsetzbarkeit und ihren Nutzen kategorisch verändern bzw. erweitern. Beide Geräte sind extrem kompakt, um so verblüffender sind dabei ihre Kapazität und Leistungsfähigkeit. Zählt man zu Größe, Leistungsfähigkeit und Kapazität ihre Mobilität, läßt sich aus der Summe dieser Eigenschaften eine neue Ära der EDV im Büro ableiten.

So tauchen die beiden Kompakt-Computer dort auf, wo aus Gründen der Handlichkeit und der Ästhetik bislang kein Computer Zugang fand: in Konferenzen, beispielsweise, in Besprechungen, in Verhandlungen, in extrem kleinen Büros, in Büros mit anspruchsvollem Design.

Handlich und mobil wie sie sind, machen die Kompakt-Computer auch nicht halt vor dem herkömmlichen, fest installierten Computer-Arbeits-

platz: Er wird überflüssig, aus einem Computer-Arbeitstisch wird ein normaler Schreibtisch. Teure Investitionen in Hardware, Mobiliar und entsprechende Quadratmeter Bürofläche entfallen, weil die Kompakt-Computer von Mitarbeiter zu Mitarbeiter weitergegeben werden, weil sie nicht in Abteilungen festsitzen, sondern praktisch durch den ganzen Betrieb wandern:

Der Computer taucht immer exakt dort auf, wo er auch gebraucht wird, Computerarbeit wird nicht mehr umständlich und zeitaufwendig delegiert, sie wird, ganz gleich von wem, sofort vorgenommen.

Die flexible Einsetzbarkeit der Kompakt-Computer geht über den Binneneinsatz hinaus: So kann die Kette der Anwendungen z.B. vom Lager über den Außendienst, vom Außendienst über eine Tagung, von der Tagung zu einem Seminar, vom Seminar zurück ins Büro in eine Konferenz reichen.

Ein generalisierendes Fazit für die beiden Kompakt-Computer T2100 und T3100 lautet: Nicht mehr der Mensch geht zum Computer, der Computer geht zum und mit dem Menschen. Die Intelligenz des Computers wird zur ständigen Begleitung, Intelligenz



wird stets verfügbares, selbstverständliches Werkzeug, macht wirtschaftlicheres Arbeiten in mehr Branchen möglich, als der herkömmliche Computer bislang vermochte.

Wenn Sie mehr über die beiden Kompakt-Computer von TOSHIBA wissen wollen, schreiben Sie an: TOSHIBA Europa (I.E.) GmbH, IPS-Division, Hammer Landstr. 115, 4040 Neuss 1.



Der T2100: Microprocessor 8086. Maximale Speicherkapazität 640 KB. Zwei eingebaute 3,5" Diskettenlaufwerke mit 720 KB oder ein Diskettenlaufwerk und 3,5" Festplatte 10 MB. Plasmabildschirm. Netzbetrieb. Kompatibel zum IBM PC XT. 6 kg leicht.



Der T3100: Microprocessor 80286. Hauptspeicher von 640 KB auf 2,6 MB erweiterbar. 3,5" Diskettenlaufwerk und 3,5" Festplatte mit 10 MB, eingebaut. Plasmabildschirm. Netzbetrieb. Kompatibel zum IBM PC AT. 7 kg leicht.

**TOSHIBA**  
IHR ANSCHLUSS AN DIE ZUKUNFT.



# Die Macht der Moleküle

**Gesteuert vom Gehirn, beherrschen Hormone unser Leben**



Wenn wir unser Herz verlieren, ist das Gehirn schuld. Bei Liebe und Sex regt es in kompliziertem Wechselspiel über die Hirnanhangsdrüse männliche wie weibliche Hormondrüsen an. Die Geschlechtshormone herrschen nicht nur über die körperliche Seite des sexuellen Verhaltens: Sie beeinflussen auch Zentren im Gehirn, die für das Gefühlsleben zuständig sind

VON CHRISTINE BROLL

**D**rei Jahre lang ging die 33jährige Marta Simons\* von Psychiater zu Psychiater. Die Diagnose lautete immer gleich: Depressionen. Doch die Ärzte konnten ihr nicht helfen. Erst als ihr Gesicht immer stärker aufquoll und sie ständig unter zu hohem Blutdruck litt, er-

\* Die Namen der Patienten wurde geändert. Red.

kannte der behandelnde Arzt, daß Marta Simons kein Fall für den Psychiater, sondern für den Hormonspezialisten war. Dessen Diagnose lautete: Cushing-Syndrom – eine Überproduktion des Hormons Cortisol.

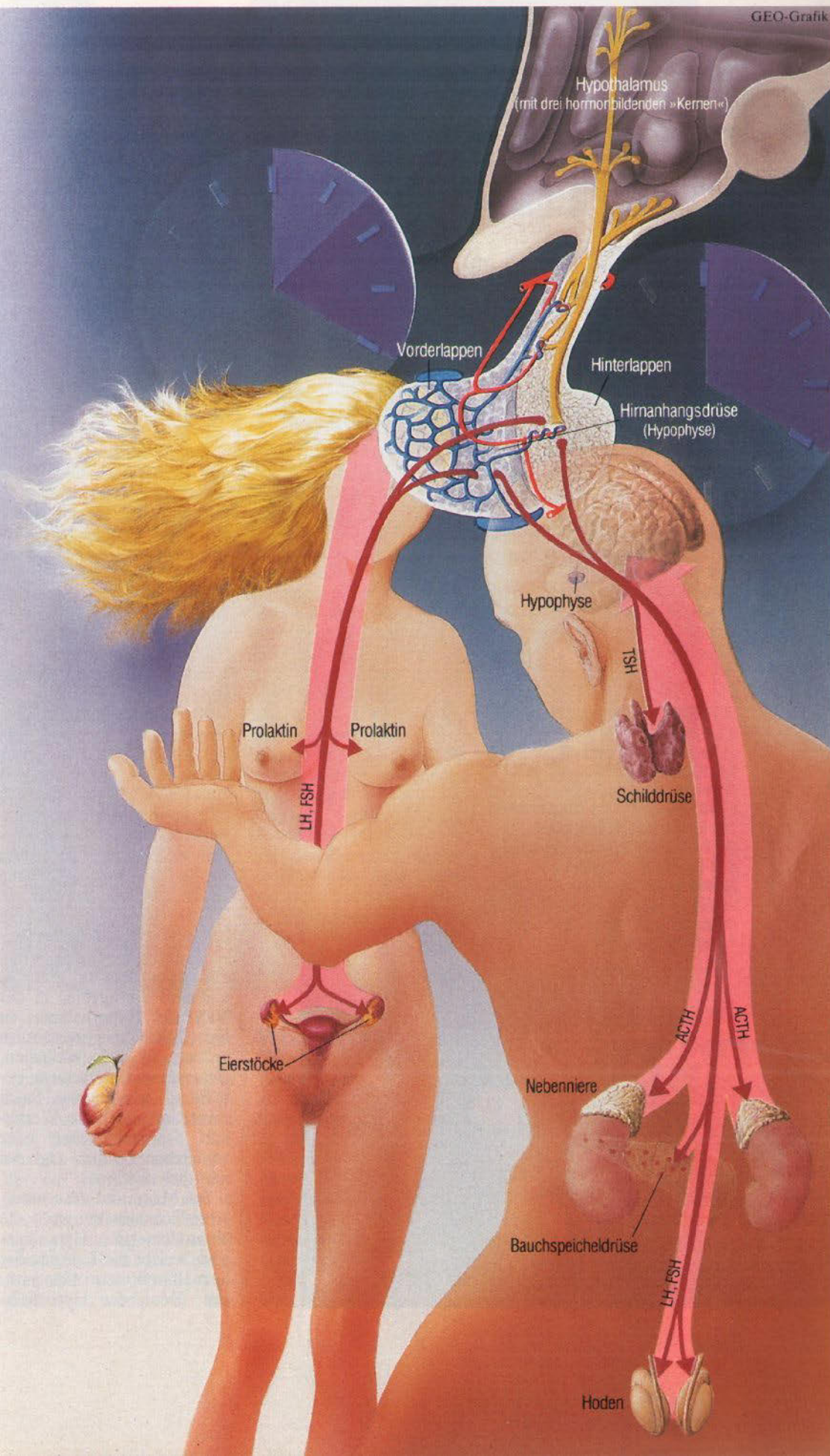
Denn je mehr von diesem Hormon im Blut eines Menschen kreist, desto stärker werden dessen Depressionen. Die zwei bis drei Wochen, die Cushing-Patienten mitunter auf die exakte Diagnose warten müssen, können für sie sogar eine Zeit zwischen Leben und Tod sein.

„In den letzten Jahren haben wir während dieser kurzen Phase zwei Patienten durch Suizid verloren“, erfahre ich von Horst Fehm, Leiter der endokrinologischen Ambulanz der Universitätsklinik in Ulm. Ein 20jähriges Mädchen, bei dem er zwar ein Cushing-Syndrom vermutete, aber dessen Labordaten er noch nicht hatte auswerten können, hatte er aus Sorge vor einem drohenden Selbstmord sogar in ein psychiatrisches Krankenhaus überwiesen. Doch dort schätzte man den Fall nicht so problematisch ein und entließ sie übers Wochenende nach Hause. „Während des Wochenendurlaubs hat sich das Mädchen erhängt. Dabei hätten wir sie durch eine Normalisierung der Cortisol-Produktion heilen können.“

Bei Marta Simons war ein Tumor der Hirnanhangsdrüse, der Hypophyse, Grund für die Hormonstörung: Er vergrößerte die Hypophyse so sehr, daß sie zuviel ACTH produziert. Dieses „adrenocorticotrope Hormon“ stimuliert seinerseits die Nebennierenrinde zur Cortisolproduktion – bei Marta Simons folglich zu sehr. Sie wurde depressiv. Nachdem die richtige Diagnose gestellt war, wurde der Tumor entfernt, und die Cortisolwerte normalisierten sich.

Hormone beeinflussen also unsere Psyche, umgekehrt kann aber auch die Psyche das Hormonsystem durch-





Wenn es Adam zu Eva drängt, wenn es um Fortpflanzung oder Wachstum geht – stets rauscht eine Kaskade der Hormone vom Gehirn zu den Drüsen des Körpers. Und jedesmal empfängt die Zentrale im Kopf hormonelle Rückmeldungen (breite, aufsteigende Pfeile). Ausgangs- und Kontrollorgan der Hormonkaskade ist der Hypothalamus, ein Teil des Zwischenhirns (ganz oben). Seine spezialisierten »Kerne« schütten unterschiedliche »Releasing-Hormone« aus. Sie wandern in die Hirnanhangsdrüse (gelbe Pfeile). Dort, im gefäßreichen Vorderlappen, werden daraufhin andere Botenstoffe produziert und mit dem Blut auf die Reise geschickt, davon vier an die Körperdrüsen (dunkelrote Pfeile): TSH an die Schilddrüse, ACTH an die beiden Nebennierenrinden sowie LH und FSH an die Keimdrüsen, die dann ihrerseits Östrogen oder Testosteron ausschütten. Der Befehl für die Kaskade der Sexualhormone kommt in Pulsen: Der Hypothalamus sendet alle vier Stunden einen Schub »Gonadotropin-Releasing-Hormon« los, bei der Frau aber in der Zyklus-Phase vor dem Eisprung alle 90 Minuten. Die beiden Uhren symbolisieren den unterschiedlichen Rhythmus

## Die Kaskade der Lust



einanderbringen. Denn das Gehirn, der Sitz unserer Gefühle und Gedanken, ist zugleich die oberste Hormondrüse. Es ist die Zentrale, in der alle Körperfunktionen geregelt werden und die das komplizierte Zusammenspiel zwischen Molekülen, Zellen, Geweben und Organen ausbalanciert. Hier werden nicht nur Nervensignale gesendet, empfangen und verarbeitet – das Gehirn schickt auch Hormone als Kuriere aus. Gleichzeitig mißt es unablässig die Konzentration dieser Hormone im Blut und gibt die notwendigen Koordinationsbefehle.

Erst im Jahre 1969 fanden zwei Wissenschaftlergruppen den Beweis für diesen Sachverhalt. Nach einem jahrzehntelangen Wettstreit miteinander war es den Teams der amerikanischen Einwanderer Roger Guillemin und Andrew Schally gelungen, das Gehirnhormon TRH (Thyreotropin-Releasing Hormone) zu isolieren. Die-

ses veranlaßt in der Hypophyse die Produktion des Hormons TSH (Thyreoid-Stimulating Hormone), das wiederum die Schilddrüse zur Freisetzung von Thyroxin anregt.

Mittlerweile haben die Wissenschaftler ein recht konkretes Bild von dieser Hormonkaskade, die im Gehirn ihren Ausgangspunkt hat. Nur ein winziger Bereich im Zwischenhirn – knapp so groß wie eine Kirsche – sorgt für die Verschaltung von Psyche, Nervensystem und Hormonhaushalt: der Hypothalamus. Hier laufen Nervensignale aus allen Gehirnarealen zusammen und werden in die Sprache der Hormone übersetzt. Aber der Hypothalamus ist nicht nur Schaltstelle für das Hormonsystem. Er ist auch beteiligt an der Kontrolle von Körpertemperatur, Kreislauf, Sexualität und Schlaf.

Adressat der Hypothalamushormone ist die Hypophyse, die direkt unterhalb ihres Befehlsgebers an der

Basis des Gehirns sitzt. Sie wertet die Botschaften des Hypothalamus aus, übersetzt sie in die Sprache ihrer eigenen Hormone und gibt diese in die Blutbahn ab. Einige der Hypophysenhormone wirken direkt auf den Organismus, andere dagegen haben eine andere Hormonfabrik als Ziel: die Schilddrüse, die Nebennierenrinde, die Hoden oder die Eierstöcke. Diese „untergeordneten“ Drüsen übersetzen wiederum die Sprache der Hypophysenhormone in ihre eigene.

### MIH macht das Embryo zum Manne

Schließlich kreist eine Flut unterschiedlichster Hormone durch unser Kreislaufsystem, auf der Suche nach Körperzellen, in deren Oberflächenstruktur sie passen wie ein Schlüssel ins Schloß: Denn nur in Zellen, die über den richtigen Rezeptor verfügen, können sie ihre Wirkung entfalten.

Im Gehirn steuern Hormone aber auch Zentren an, die für unser Gefühlsleben zuständig sind. So steigern männliche Geschlechtshormone das Verlangen nach Sex, Prolactin dagegen brems es. Weibliche Sexualhormone können Frauen die Tage vor den Tagen zur Qual werden lassen, und sogar unsere Konzentrationsfähigkeit

kann durch Hormone beeinflusst werden.

Letztlich entscheiden die Hormone und deren Rezeptoren sogar darüber, ob wir Mann oder Frau werden. Drei Hormone – zwei männliche Sexualhormone und das „Müllersche inhibierende Hormon“ (MIH) – braucht ein Mensch, um im Mutterleib zum Mann zu werden. MIH wird nur gebildet, wenn das männliche Y-Chromosom vorhanden ist. Es ist zuständig für die Entstehung von Hoden und Samenleiter. Fehlt das Y-Chromosom, fehlt folglich auch das MIH – und der Embryo wächst sich zum Mädchen aus.

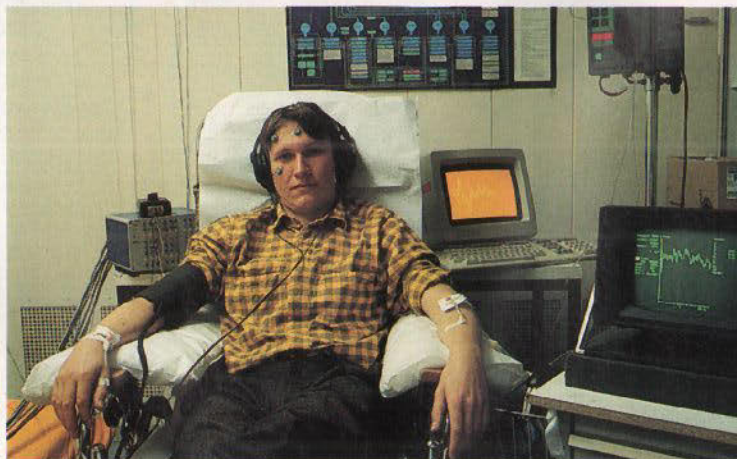
Augenzwinkernd erläutert mir der Endokrinologe Wolfgang Wuttke in der Göttinger Universitätsfrauenklinik, wie er den Einfluß von Sexualhormonen auf den Embryo sieht: „Männlein sein ist ein aktiver Vorgang, Weiblein wird man von allein.“ Und er erklärt auch, daß Testosteron während der Embryonalentwicklung sogar die Gehirnprogrammierung verändert.

Tatsächlich sind im Hypothalamus und in einem Teil des sogenannten limbischen Systems, das für unser Gefühlsleben mitverantwortlich ist, die Neuronen bei Männern und Frauen unterschiedlich verschaltet. Bei Ratten könne er, sagt Wolfgang Wuttke, sogar mit bloßem Auge erkennen, ob es sich um einen Gehirnschnitt von einem männlichen oder weiblichen Tier handelt: Ein bestimmtes Kerngebiet in der Nähe des Hypothalamus ist bei Männchen wesentlich größer als bei Weibchen. „Was diese Unterschiede bewirken, wissen wir noch nicht, und über die Wertigkeit des männlichen oder weiblichen Gehirns sagt das natürlich nichts aus.“

Bei Mann und Frau unterschiedlich arbeiten auch die Neuronen im Hypothalamus, welche die Kaskade der Sexualhormone in Gang setzen. Denn der Hypothala-

**Die Ulmer Forschergruppe um Horst Fehm (Bild links) untersucht, wie das von der Hirnanhangsdrüse ausgeschüttete Hormon ACTH aufs Gehirn wirkt. Fehms Mitarbeiter Jan Born fand bei Versuchen mit Freiwilligen (unten) heraus, daß ACTH die selektive Aufmerksamkeit vermindert, so die Fähigkeit, stereophon gehörte Piepstöne nur in einem Ohr zu zählen**

**Pieps  
oder nicht Pieps,  
das war die  
Frage**







phot. Gerlach  
Berlin



mus schüttet das Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH) – dessen Adressat die Hypophyse ist, in Schüben aus. Allgemein feuern die GnRH-Neuronen alle vier Stunden und setzen dabei das Hormon frei. Bei Frauen aber verkürzt sich in der Zyklusphase vor dem Eisprung dieses Intervall auf 90 Minuten. Nach der Ovulation fällt die GnRH-Ausschüttung wieder in den

Vier-Stunden-Takt zurück. Die Rezeptoren – „Empfangsstationen“ – für GnRH an den Zellen der Hirnanhangdrüse, welche die gonadotropen Hormone LH und FSH bilden, „verstehen“ nur diesen Rhythmus. Wird er gestört, so können die Zellen diese Hormone nicht produzieren. Folge: Der weibliche Geschlechtszyklus fällt aus.

Wo aber sitzt die innere Uhr, die im Gehirn den

## Mit 16 maß die »Lange Dora« 2,19

**Kleine Ursachen, große Wirkungen: Eine winzige Menge Wachstumshormon zuviel, von der Hirnanhangsdrüse ins Blut ausgeschüttet, läßt Jungen wie Mädchen hochaufschießen. Zwei Meter sind dann keine Grenze, wie bei dem**

**15jährigen Mädchen in Friesentracht, dem 19jährigen Texaner – er überragt mit 2,30 Meter seine Eltern bei weitem – oder der »Langen Dora«: Sie war schon mit 16 Jahren 2,19 Meter lang**



männlichen oder weiblichen Takt schlägt? Wolfgang Wuttke Hypothese: zu den GnRH-produzierenden Zellen im Hypothalamus führen lange Nervenfortsätze aus dem Mittelhirn, die den Neurotransmitter Noradrenalin ausschütten. Allerdings feuern diese Fortsätze in anderen Gehirnarealen, in die sie ebenfalls hineinreichen, keineswegs pulsartig. Offenbar sind, so meint Wuttke, noch andere Nervenzellen an der Entstehung der Pulse beteiligt, und er folgert weiter, daß das Noradrenalin die GnRH-Neuronen lediglich auf die Hormonausschüttung vorbereite.

Gleichzeitig geben andere Neuronen den Neurotransmitter Gamma-Aminobuttersäure (GABA) ab, der die Hormonausschüttung der GnRH-Zellen hemmt. Wenn aber sämtliche GnRH-Neuronen im Hypothalamus bereit sind zum Feuern, sinkt die GABA-Konzentration: Alle GnRH-Neuronen können ihr Hormon jetzt freisetzen – als Ergebnis einer Koordination von Erregung und Enthemmung.

Soweit die Hypothese. Bekannt ist jedoch schon heute, daß die GnRH-Neuronen über andere Gehirnzentren einem ganzen Konzert von Informationen aus Umwelt und Psyche ausgesetzt sind. Kein Wunder also, daß der weibliche Zyklus auf äußere Einflüsse sensibel reagiert.

Wie aber wirken sich umgekehrt Sexualhormone auf das Befinden und Verhalten aus? Wuttke: „Sowohl im Hypothalamus als auch im limbischen System hat man sehr viele Rezeptoren für Geschlechtshormone gefunden. Wenn sich zum Beispiel Östrogene an diese Rezeptoren binden, verändert sich die Aktivität jener Nervenzellen, die das Sexualverhalten regulieren.“

Viele Frauen bekommen Monat für Monat zu spüren, wie die Sexualhormone auf ihr Gehirn wirken. „Wenn

## **... aber Weiblein wird man von allein**



**Warum manche Männer, die körperlich mit allen Merkmalen eines Mannes ausgestattet sind, lieber Frauen sein möchten oder zumindest gern als Frauen posieren, weiß bis heute niemand. Eindeutig geklärt aber ist, daß ein Embryo männlicher Hormone bedarf, um ein Mann zu werden.**

**»Männlein sein ist ein aktiver Vorgang«, erläutert der Endokrinologe Wolfgang Wuttke von der Göttinger Universitätsfrauenklinik, »Weiblein wird man von allein«**







**K**aum hat der Student seine Prüfung hinter sich, droht ihm neue Gefahr: Da während des Prüfungsstress seine körpereigene Abwehrkraft erlahmt, ist er nun anfälliger für Krankheiten. Was bei Prüfungskandidaten wissenschaftlich belegt ist, kennt aber auch jeder Mensch aus eigener Erfahrung: Wenn man sich gestresst oder niedergeschlagen fühlt, ist, zum Beispiel, eine Erkältung nicht mehr weit. „Kummer macht krank“, sagt dann der Laie, denn intuitiv weiß er, daß die Seele auf Krankheiten einen Einfluß hat. Auch Medizinmänner vertrauen auf ihre Intuition, wenn sie körperliche Leiden mit „Zaubersprüchen“ bekämpfen.

Trotz solcher Erfahrungen im Alltag hätten vor zehn Jahren ernst zu nehmende Wissenschaftler noch bestritten, daß es einen Zusammenhang zwischen Psyche und dem körpereigenen Abwehrsystem gibt. Heute kann ihn niemand mehr leugnen. Zu zahlreich sind die Beweise, von der neuen Wissenschaft der Psychoimmunologie erbracht, daß Psyche und Immunsystem miteinander kommunizieren können: Lymphozyten, jene Zellen, die bei der Abwehr von Infektionen eine Schlüsselstellung einnehmen, senden Botenstoffe zum Gehirn. Das Gehirn kann über Nervenbahnen und Hormone die Aktivitäten der Immunzellen beeinflussen. Tiere können sogar durch Training erlernen, ihre Immunabwehr zu bremsen oder anzukurbeln.

Wie stark die Psyche das Immunsystem beeinflussen kann, entdeckten Marvin Stein und Steven Schleifer von der Mt. Sinai School of Medicine in New York. Stein und Schleifer untersuchten dazu Männer, deren Frauen an Brustkrebs im fortgeschrittenen Stadium litten. Während der Krankheit ihrer Frau reagierte das Immunsystem der Ehepartner zwar nicht auf die seelischen Belastungen, doch zwei Wochen nach dem Tod der Krebskranken waren die Abwehrkräfte der Männer stark geschwächt. Bei einigen „trauerte“ das Immunsystem 14 Monate lang.

Doch nicht nur der Tod eines geliebten Menschen beeinträchtigt die körpereigene Abwehrkraft. Bei Medizinstudenten, die Ronald Glaser und Janice Kiecolt-Glaser von der University of Ohio am Examenstag untersuchten, war vor allem die Aktivität der Killerzellen stark reduziert, deren Aufgabe es

## Die Brücke zwischen Krankheit und Seele

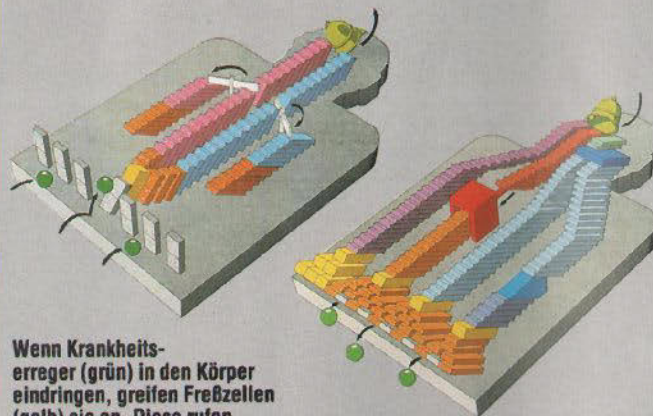
„Ich kann meinen Ärger nicht ausleben. Das ist eines meiner Probleme. Statt dessen brüte ich einen Tumor aus.“

Woody Allen in seinem Film „Der Stadtneurotiker“

unter anderem ist, die Entwicklung von Tumoren zu verhindern.

Auch die Angst vor einer unangenehmen ärztlichen Untersuchung kann die Abwehrkräfte beeinflussen. Zu diesem Ergebnis kamen der Immunologe Andreas Raedler und der Psychologe Karl-Heinz Schulz vom Universitätskrankenhaus Eppendorf in Hamburg, als sie Patienten vor einer Darmspiegelung untersuchten. „Die Angst vor einer solchen Un-

Als geradezu klassischer Beweis dieser Hypothese gelten die Konditionierungsversuche der Amerikaner Robert Ader und Nicholas Cohen. Sie begannen vor zwölf Jahren mit einem berühmt gewordenen Experiment. Ader und Cohen hatten Ratten mit einer Saccharinlösung gefüttert und ihnen gleichzeitig die immunschwächende Substanz Cyclophosphamid gespritzt, die auch Übelkeit erregt. Sehr schnell rührten die Tiere die



**Wenn Krankheitserreger (grün) in den Körper eindringen, greifen Freßzellen (gelb) sie an. Diese rufen weitere Immunzellen (orange) zu Hilfe. Immunzellen können Hormone (rosa und blau) produzieren, die andere Zellen des Immunsystems stimulieren oder hemmen. Signale aus dem Immunsystem können auf das Gehirn – als Glocke dargestellt – einwirken und Herzschlag, Schlaf, Stoffwechsel und sogar Gefühle und Gedanken beeinflussen**

**Das Gehirn schickt Eiweißmoleküle, Neuropeptide (lila), als Botenstoffe in den Kampf der Immunzellen gegen die Erreger. Nervenfasern (ziegelrot) leiten regulierende Signale zu den lymphatischen Organen (rotes Tor). Es regt auch die Hirnanhangsdrüse (dunkelblau nahe der Glocke) an, Hormone (hellblau) auszuschütten, die Immunzellen steuern oder weitere Hormone (lavendelblau) veranlassen, dies zu tun**

tersuchung ist ein starker Stressor“, erklärt Raedler das Experiment. „Vor der Darmspiegelung nahm die Zahl der aktivierten Lymphozyten im Blut der Patienten stark zu“ – ein Befund, der eher auf eine Stärkung der Abwehrkräfte hinweist.

So sehr sich beide Untersuchungen auch auf den ersten Blick widersprechen mögen, so zeigen sie doch eines: Gefühle beeinflussen das Immunsystem.

Süßstofflösung nicht mehr an. Offensichtlich brachten sie die Übelkeit mit dem süßen Geschmack in Verbindung. Nach einer Unterbrechung gaben die Forscher erneut Saccharin ins Trinkwasser, diesmal ohne Cyclophosphamid zu spritzen. Inzwischen hatten die Ratten ihre schlechten Erfahrungen vergessen und tranken die Lösung. Doch beim Antikörper-Test war die „Immunantwort“ der Ratten wieder geschwächt. Die Tiere

hatten quasi gelernt, allein auf den süßen Geschmack hin mit einer Immunsuppression zu reagieren. Wie kann die Psyche, wie kann das Gehirn das Immunsystem beeinflussen? Hormone sind die Sprache, in der das Gehirn den Immunzellen seine Anweisungen übermittelt. Am bekanntesten ist der Cortisol-Effekt. Cortisol wird auf Befehl des Gehirns von der Nebennierenrinde produziert, unterdrückt die Produktion und Aktivität bestimmter Abwehrstoffe und wirkt damit entzündungshemmend. Viele Menschen reagieren auf Stress mit einer erhöhten Cortisolausschüttung. Deshalb ist Cortisol mit hoher Wahrscheinlichkeit eines jener Hormone, mit dem die Psyche das Immunsystem beeinflusst. Das Gehirn kann aber nicht nur über hormonelle Boten mit dem Immunsystem sprechen. Es verfügt auch über „Standleitungen“ zu jenen Organen, in denen die Immunzellen gebildet werden. Bei vielen Säugetierarten führen Fasern des sympathischen Nervensystems in den Thymus, die Milz, zu den Lymphknoten und ins Knochenmark. Dort enden sie direkt zwischen den neugebildeten Lymphozyten. Wie diese Fasern das menschliche Immunsystem steuern, ist unbekannt.

Umgekehrt steht auch der Körper, während er gegen Krankheitserreger kämpft, in dauernder Verbindung mit dem Gehirn. Wie diese Rückmeldung genau abläuft, weiß noch niemand. Sicher ist aber, daß während einer Immunantwort ein bestimmtes Zentrum im Gehirn, der Hypothalamus, aktiviert wird. Im letzten Jahr ist es Hugo Besedovsky vom Schweizerischen Forschungsinstitut in Davos gelungen, einen Boten zwischen Immunsystem und Gehirn zu identifizieren. Es ist das Interleukin-1, ein Stoff, mit dem die Lymphozyten auch untereinander kommunizieren. Aber auch Hormone kommen als mögliche Rückmeldungs-Kuriers in Betracht: Ed Blalock an der University of Texas hat entdeckt, daß Immunzellen sogar klassische Hormone produzieren können.

Nach und nach beginnt die Psychoimmunologie die Lücke zwischen dem Wissen des Medizinmanns und der naturwissenschaftlichen Medizin zu füllen. Noch ist sie aber weit davon entfernt, ihre Erkenntnisse in die Therapie übertragen zu können: Nerven- und Immunsystem sind schließlich die beiden kompliziertesten Systeme unseres Körpers.



ich“, erzählt mir eine Freundin, „depressiv und lustlos bin, blicke ich oft erst einmal auf den Kalender, ehe ich über verdrängte Gefühle und unbewältigte Konflikte nachdenke. Wenn ich dann sehe, daß es nur noch ein paar Tage bis zu meiner Periode sind, weiß ich, daß es mir wieder besser gehen wird, sobald ich meine Tage habe.“ Für manche Frauen sind die Tage vor den Tagen eine seelische Qual, die häufig sogar Selbstmordgedanken fördert.

Was während der prämenstruellen Phase im Gehirn abläuft, ist noch nicht genau bekannt. Wolfgang Wuttke und seine Kollegen haben allerdings erstaunliche Feststellungen gemacht: Bei Frauen ändern sich die EEG-Wellen in Abhängigkeit vom Zyklus. „Vermutlich wird eine bestimmte Gruppe von Nervenzellen im Gehirn, das sogenannte noradrenerge System, mit der Ovulation aktiviert. Dies könnte auch den Temperaturanstieg nach dem Eisprung verursachen. Vor der Menstruation erreicht die Aktivität einen Höhepunkt. Dazu würde passen, daß Spitzensportlerinnen während der prämenstruellen Phase in Sportarten, in denen es auf Reaktionsschnelligkeit ankommt, zum Beispiel beim Sprinten, erfolgreicher sind als sonst.“

Sind Gefühle und Stimmungen der Frauen also nichts als ein Produkt ihres Hormonzyklus? Tatsächlich behaupten manche Wissenschaftler, daß Frauen in den Tagen um den Eisprung herum – wenn sie also schwanger werden können und Sex „biologisch sinnvoll“ ist – vermehrt Lust auf sexuelle Kontakte haben.

Die Psychologin Hertha Appelt, die an der Universitätsklinik Hamburg den Zusammenhang zwischen Hormonen und weiblichem Sexualverhalten untersucht, bestreitet diese These entschieden. Gemeinsam mit ih-



## Doping: die hormonelle Verführung

Im Sport spielen Hormone eine wachsende Rolle. Frauen mit offenbar natürlich erhöhtem Testosteron-Spiegel wirken so kraftvoll-männlich wie die tschechische 800-Meter-Läuferin Jarmila Kratachvilova (oben links) oder manche DDR-Schwimmerinnen. Der deutsche Biathlon-Olympiasieger Peter Angerer (oben Mitte) wurde im letzten August wegen verbotener Testosteron-Einnahme für

fünf Monate gesperrt. Indirekt über Testosteron stolperte jüngst Nationaltrainer Toni Schumacher (oben rechts) – durch sein Buch, in dem er Doping-Praktiken in der Fußball-Bundesliga enthüllt hatte. Die polnische Sprinterin Irena Kirszenstein soll die erhöhte Reaktionsschnelligkeit von Frauen in den Tagen vor der Menstruation gezielt für Rekorde genutzt haben



rem Kollegen Bernhard Strauß hatte sie Studentinnen aufgefordert, einige Monate lang Tagebuch über ihre sexuellen Wünsche und Aktivitäten zu führen. Bei der Auswertung ergab sich kein Zusammenhang zwischen Sexualverhalten und zyklusabhängigen Hormonschwankungen. „Die Sexualität ist wie ein Seismograph. Dabei spielen mehr Dinge eine Rolle als nur der Einfluß von Hormonen.“ Allerdings räumt Hertha Appelt ein, daß extrem hohe oder niedrige Hormonspiegel den sexuellen Appetit beeinflussen können.

Die Psychologin hat Belege dafür, daß auch männliche Hormone das Sexualverhalten von Frauen beeinflussen. Daß Androgene das männliche Verlangen nach Sex steigern, ist längst bekannt. Aber auch stark behaarte Frauen gelten seit Jahrhun-



**Wenn die Schilddrüse zum Kropf auswächst, mangelt es ihr meist an Jod. Dann wird zu wenig Schilddrüsenhormon gebildet, und die alarmierte Hirnanhangsdrüse antwortet mit einer erhöhten Ausschüttung des Botenstoffs TSH**

## Was hat der Kropf mit dem Hirn zu tun?

derten als besonders lustvoll und erotisch. „Wo viel Haar ist, ist viel Liebi“, oder „Haar um die Brüst, machen Gelüst“, sagt der Volksmund. Heute werden Frauen, die unter Hirsutismus – starker Behaarung infolge eines hohen Androgenspiegels – leiden, mit Anti-Androge-

nen behandelt. Jedoch: „60 Prozent der Frauen, die in einer Partnerschaft lebten, klagten nach der Behandlung mit Anti-Androgenen über erhebliche Veränderungen ihres Sexuallebens“, konstatiert Hertha Appelt. „Eine Frau spürte nach einer hohen Dosis von einem Tag auf den anderen überhaupt kein Verlangen mehr, obwohl sich in ihrer Beziehung zum Partner nichts verändert hatte.“

Als ein echter „Libido-Killer“ gilt das Hypophysenhormon Prolaktin, das eigentlich für die Milchproduktion in der Brust verantwortlich ist. Da es in großen Mengen den GnRH-Pulsgenerator hemmt, wirkt es während der Stillphase als natürliches Empfängnisverhütungsmittel. Auf diesen Schutz können sich die Frauen allerdings nur dann verlassen, wenn sie ihr Baby nicht nur alle drei bis vier Stunden anlegen, sondern es praktisch dauernd an der Brust tragen. Denn die Hypophyse schüttet nur dann Prolaktin aus, wenn die Brustwarzen durch das Saugen gereizt werden.

Daß Prolaktin in der Stillphase die Lust auf Sex unterdrückt, ist biologisch sicherlich sinnvoll. Eine erhöhte Prolaktin-Ausschüttung kann aber auch krankhaft sein – so beim Ehepaar Sabine und Werner Kersten. Ku-

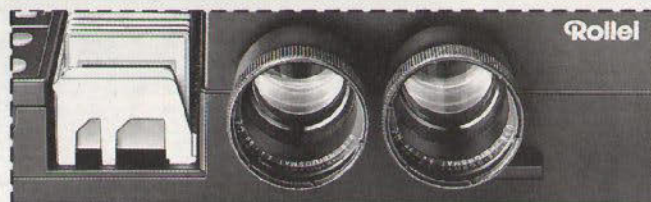
gleichzeitig unter einem – gutartigen – Hypophysentumor, der enorme Mengen Prolaktin produzierte und beide unfruchtbar machte. Frau Kersten hatte keinen normalen Menstruationszyklus, da das Prolaktin den Pulsgenerator im Hypothalamus blockierte. Bei Herrn Kersten verhinderte das Hormon die Samenreifung. Beide wurden mit prolaktinhemmenden Medikamenten behandelt. Werner Kersten: „Ich muß sagen, daß sich mein sexuelles Verlangen um hundert Prozent gesteigert hat.“

Auf welche Weise das Prolaktin die sexuellen Wünsche beeinflusst, weiß jedoch noch niemand. Genausowenig, weshalb das Hormon, das in kleinen Mengen stets im Blut von Frauen wie auch Männern kreist, in Stress-Situationen vermehrt ausgeschüttet wird.

Einig sind sich die Wissenschaftler dagegen über die psychische Wirkung von Cortisol, jenem Hormon, das Marta Simons drei Jahre lang an Depressionen leiden ließ. Rezeptoren für Cortisol haben die Forscher vor allem in jenen Gehirnteilen gefunden, die unser Gefühlsleben beeinflussen. Was sie aber besonders nachdenklich macht, ist die Tatsache, daß rund ein Drittel aller depressiven Patienten erhöhte Cortisolwerte haben – ohne unter dem Cushing-Syndrom zu leiden. Auch bei Patienten mit reaktiven Depressionen, Schizophrenie oder Alkoholentzugs-Symptomen sind erhöhte Cortisolwerte geläufig.

### Ein Tumor an der Hypophyse bremst die Liebeslust

In Lehrbüchern wird Cortisol in der Regel als „Stresshormon“ bezeichnet. Wenn das Gehirn Stress meldet, produziert der Hypothalamus CRH, das Corticotropin-Releasing Hormone. Dieses regt die Hypophyse



#### Links kommt das Kamel.

Vorbei sind die Zeiten langweiliger Diavorführungen. Denn jetzt gibt es den Rolleivision 35 twin, den einzigartigen Projektor für perfekte Überblend-schauen: mit einem Projektor und aus einem Magazin. Da ist Spannung und Faszination vorprogrammiert, denn die Überblendprojektion zaubert überraschende Effekte auf die Leinwand.

Name: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

Wohnort: \_\_\_\_\_

#### Rechts das Nadelöhr.

Der Rolleivision 35 twin ermöglicht harte oder effektiv weiche Bildübergänge ohne Dunkelpause. Und ganz ohne Zusatzgerät und Kabelgewirr. Manuell oder automatisch gesteuert. Diese komfortable Überblendprojektion muß man einfach erlebt haben. Lassen Sie sich deshalb den Rolleivision 35 twin im Fotohandel vorführen, oder fordern Sie Informationen über den Coupon an.

**Rollei**  
fototechnic

Rollei Fototechnik GmbH  
Salzdahlumer Straße 196  
3300 Braunschweig

GW 35



zur Produktion von ACTH an, welches wiederum die Cortisolausschüttung in der Nebennierenrinde veranlaßt. Ob und wie das Cortisol allerdings Stress-Situationen begegnet, ist nicht eindeutig geklärt. Horst Fehm meint sogar: „Die Bezeichnung Stresshormon wird man für das Cortisol nicht mehr lange aufrechterhalten können.“ Sein Argument: Morgens zwischen drei und vier Uhr, also mitten im schönsten Schlaf, beginnen die Cortisolwerte anzusteigen.

„Man kann nicht sagen, daß eine Cortisolausschüttung notwendig ist, um eine Stress-Situation zu bewältigen“, meint auch Sabine Bossert vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München. Sie setzte ihre Versuchspersonen ganz unterschiedlichen „Stressoren“ aus: einer halben Stunde Fahrrad fahren, einem Quiz mit Fragen zur Allgemeinbildung und sogar einem Horrorfilm. Ergebnis: Einige der Probanden produzierten bei jedem Test große Mengen Cortisol, andere dagegen überhaupt keins.

Eine wichtige Aufgabe des Cortisols ist indes bei den Hormonforschern völlig unumstritten: Es bremst das Immunsystem. Chemische Verwandte des Cortisols werden denn auch bei starken Entzündungen verabreicht. Horst Fehm: „Cortisol soll offenbar verhüten, daß eine Immunreaktion des Körpers überschießt.“ Immerhin: Da seine Produktion auch durch Stress in Gang gesetzt wird, muß Cortisol als Bindeglied zwischen Psyche und Immunsystem gelten (siehe auch Kasten auf Seite 70).

**Der Saugreiz an der Brustwarze setzt bei der Mutter die Produktion des Hormons Prolaktin in Gang. Dieses Hormon der Hirnanhangsdrüse regt die Milchproduktion an und dämpft gleichzeitig die Lust auf Sex – als ein natürliches Mittel zur Empfängnisverhütung**

**Stillen schützt vor Empfängnis**



Horst Fehm und seine Ulmer Kollegen haben jetzt sogar entdeckt, daß ACTH, welches die Cortisol-Produktion in der Nebennierenrinde ankurbelt, auch einen Effekt auf das Gehirn hat: Es mindert die selektive Konzentration. Fehms Mitarbeiter Jan Born ließ einer Reihe von Versuchspersonen über Stereokopfhörer verschiedene Piepsignale einspielen und forderte sie auf, nur die Signale in einem Ohr zu zählen. Spritzte er nun den Versuchspersonen ACTH ein, konnten sie sich schlechter auf ein einziges Ohr konzentrieren. Die allgemeine Aufmerksamkeit dagegen wurde durch ACTH verbessert. „Arbeiten, die Daueraufmerksamkeit erfordern, zum Beispiel die Radarüberwachung des Flugverkehrs, sind bei hohen ACTH-Werten besser zu meistern“, meint Born. Über den biologischen Zweck dieser ACTH-Wirkung kann er jedoch nur spekulieren. Etwa: „Wenn ein Tier sich erschreckt, setzt es mehr ACTH frei. In dieser Situation ist es für das Tier nicht wichtig, sich auf einen speziellen Reiz zu konzentrieren. Vielmehr muß es, um den richtigen Fluchtweg finden zu können, für alle Umwelteinflüsse offen sein.“

Auf die Frage allerdings, wie solche Wirkung zustande kommt, antwortet auch Horst Fehm nur mit einem Achselzucken: „In meiner Vorlesung zitiere ich immer Emerson Pugh, der einmal gesagt hat: ‚Wenn das menschliche Gehirn so simpel wäre, daß wir es verstehen könnten, wären wir so simpel, daß wir es nicht könnten.‘“ □

**Christine Broll**, 29, studierte Biologie in Freiburg. Heute arbeitet sie als freie Wissenschaftsjournalistin. Sie lebt in Tutzing am Starnberger See.



**Droemer  
Knaur®**

## Denken, Merken und Vergessen

**Alan Baddeley**



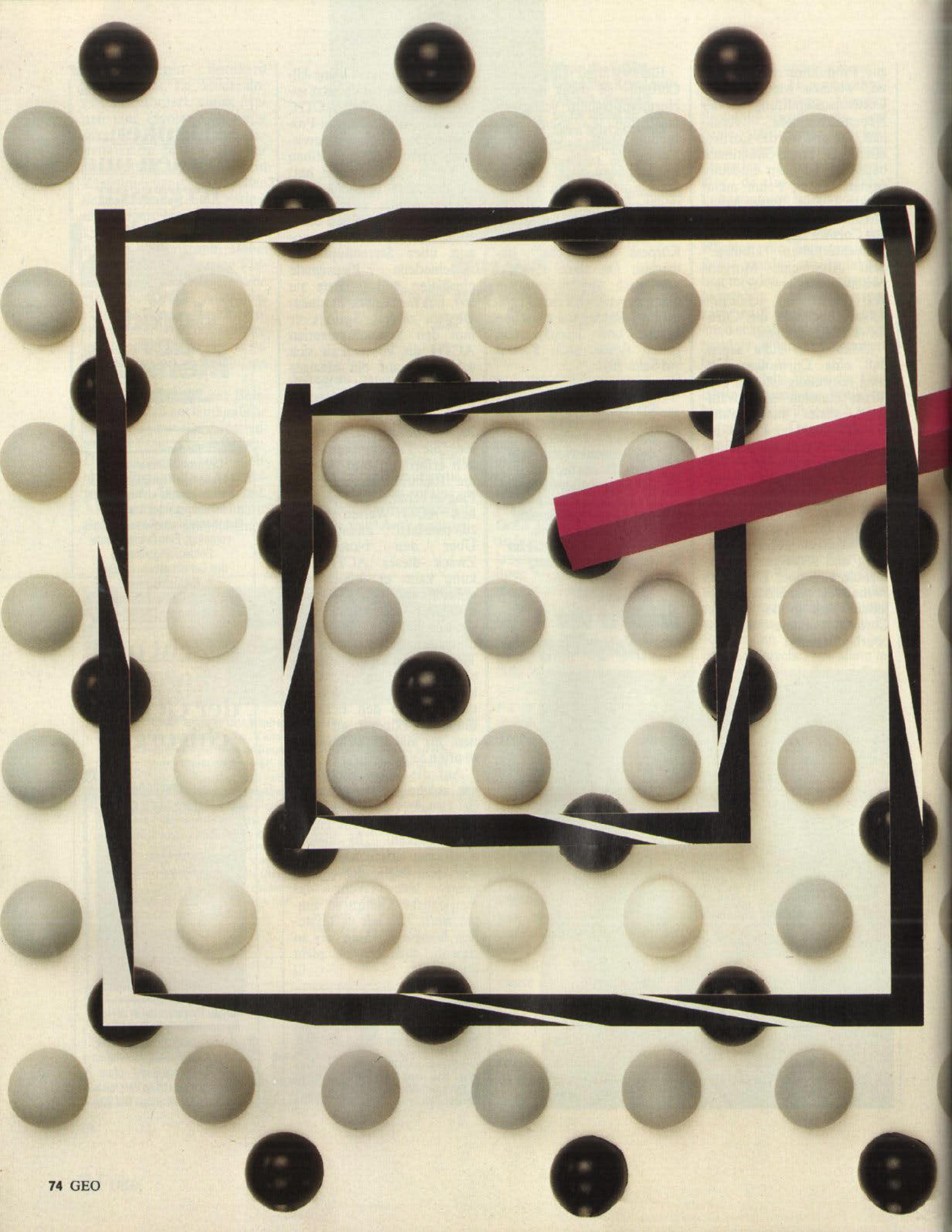
Der prominente englische Psychologe Alan Baddeley hat hier ein sprachlich wie optisch hervorragendes Buch über das menschliche Denkvermögen vorgelegt. Eine faszinierende Entdeckungsreise zu den Geheimnissen unseres Gedächtnisses.  
248 Seiten, 222 z.T. farbige Abb.  
Gebunden DM 46,-

## Macht und Ohnmacht der Gehirn- chirurgen



Jürgen Thorwald hat in seinem neuesten Buch die Geschichte der Gehirnchirurgie und ihrer großen Männer aufgeschrieben. Ein einmaliges Buch – ohne Vorgänger und ohne Vergleich. 448 Seiten. Gebunden DM 42,-







# Wer seinen Augen traut

Es ist die einfachste Sache der Welt: Augen auf – und wir »sehen«. Aber der Schein trügt. Sehen und Wahrnehmen sind in vielen Details noch rätselhaft. Mit dem Sehen treibt das Hirn enormen Aufwand: Mindestens ein Drittel seiner Kapazität braucht es für die visuelle Datenverarbeitung. Aber wie verwandelt es die von den Augen strömenden Informationen in bewußte Wahrnehmung? Dieser Rätsel wegen studieren Forscher Sehsysteme von Tieren, beobachten Babys beim Erkennen-Lernen ihrer Umwelt, entlocken dem Hirn mit optischen Täuschungen – wie links mit dem »unmöglichen Bild« – gezielte Fehlreaktionen. Tröstlich indes: Menschaugen zählen zum Feinsten, was die Natur zu bieten hat – insektenhafte Facettenaugen gleicher Güte hätten bereits Meterformat





**D**ie Schau kann beginnen. Auf die grau gestrichene Puppenbühne spaziert ein Teddybär, in knallbuntem Fell. Berit reißt Mund und Augen auf, beginnt zu strahlen und streckt ihren Arm aus. Doch der Teddy verschwindet, und eine graue Tafel mit einem Streifenmuster auf der linken Seite verschließt die Bühne. Berits Augen bleiben an den Streifen des Musters hängen, und sie folgen ihnen, während Berit sanft hin und her geschaukelt wird.

Rasselgeklapper hinter der Bühne überbrückt eine kurze Pause, dann folgt die nächste Tafel, diesmal mit einem feineren Muster. Und wieder schaut Berit zum Muster hin.

Berit kann zwar noch nicht laufen oder sprechen, ist aber schon Versuchsperson am Frankfurter Max-Planck-Institut für Hirnforschung. Ruxandra Sireteanu und ihre Kolleginnen verfolgen gespannt, wie das Baby sehen lernt. Was nimmt es an seiner Umgebung wahr, was kann es erkennen, unterscheiden? Erscheint ihm die Welt schon bunt und dreidimensional?

Auf jeden Fall lebt Berit bereits in einer Welt voll feiner Muster. Ihre Sehschärfe hat sich nämlich in den letzten Wochen und Monaten dramatisch verbessert. Ein zwei Monate altes Baby sieht etwa 20mal schlechter als ein Erwachsener. Aber schon einen Monat später ist seine Sehschärfe nur noch zehnmals schlechter. Und nun, mit siebenmonatigen Monaten, unterscheidet Berit die Gitter auf der Tafel fast so gut wie die Großen. Berits kindliche Neugier hilft sehr dabei, daß ihre Sehschärfe gemessen werden kann: Wie alle Säuglinge betrachtet sie lieber Muster als einfarbige Flächen.

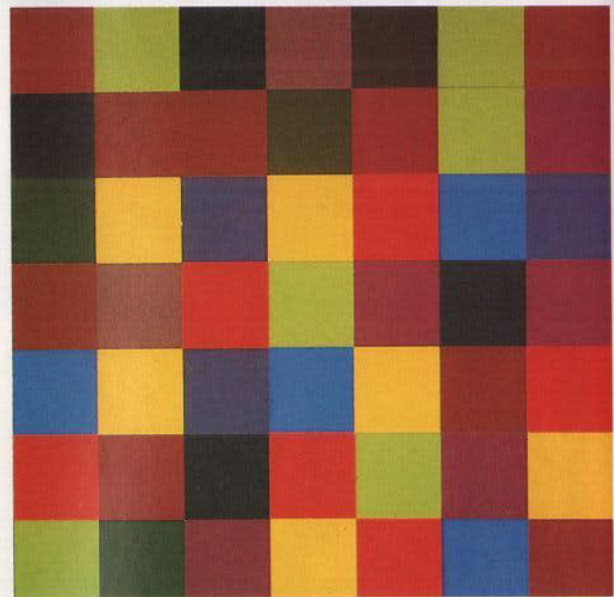
„Es ist ein Glück für uns, daß die Kinder so konzentriert schauen“, freut sich Ruxandra Sireteanu. Sobald die Streifenmuster so fein werden, daß die jungen Augen sie nicht mehr auflösen können, blicken sie gleich häufig auf die Muster wie auf die einheitliche Fläche – ein Zeichen, daß sie

die Grenze ihres Sehvermögens erreicht haben.

Während sich die Sehschärfe eines Kleinkindes allmählich verbessert, passiert eine Menge in den Augen und den Gehirnen: Im Auge reifen die lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut, die „Photorezeptoren“, heran und wandern, einer Tendenz zur Mitte folgend, in die „Sehgrube“ ein. Dadurch bildet sich die „Fovea“, die Stelle des schärfsten Sehens, aus (siehe Kasten „Auge und Netzhaut“ auf Seite 81). Und auch im Gehirn geht es rund: Die Nervenzellen im Zwischenhirn und in der Hirnrinde, die Informationen von der Netzhaut erhalten, ändern ihre Verbindungen. Im ersten Lebensjahr knüpfen sie zu anderen Nervenzellen sehr viele Kontakte, von denen allerdings längst nicht alle dauerhaft sind.

Welche Kontaktstellen überleben und welche sterben, das hängt ganz wesentlich von der sinnlichen Erfahrung der kleinen Kinder ab. In einem außerordentlich feinen Zusammenspiel zwischen genetischen Anlagen und Erfahrungen mit der Umwelt festigen sich die endgültigen Verbindungen. Wenn freilich in dieser Zeit ein Baby zum Beispiel auf einem Auge nicht gut sieht oder schielt, wenn also die „richtigen“ Sinneseindrücke fehlen, dann kann sich auch das Sehsystem nicht richtig entwickeln. Wird das nicht rechtzeitig erkannt, so läßt sich ein solcher Schaden später auch nicht mehr reparieren.

Je weiter die Forscher in die Geheimnisse von Auge und Gehirn, von Sehen und Wahrnehmung vordringen, um so stärker wächst ihr Respekt vor der außerordentlichen Leistung unseres Nervensystems. Manchmal fühlen sich Wissenschaftler beinahe wie Alice im Wunderland, wenn ihre eigenen Forschungsergebnisse sicher geglaubte Erkenntnisse auf den Kopf stellen. Der Amerikaner Richard Held, zum Beispiel, bilanziert seine jahrzehntelange Arbeit mit den Worten: „Früher dachte man, Sehen sei im Grunde etwas ganz Einfaches, halt so was wie ein Bild im Gehirn. Das Denken hielt man dagegen für etwas sehr Kompliziertes. Und jetzt ist es genau umgekehrt.“ Der Professor am renommierten Massachu-



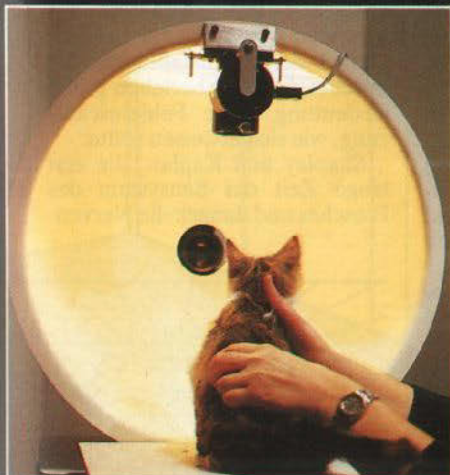
## Die Farbe wirkt erst im Kontrast

Wie reagiert das Gehirn auf Muster und Farben? Neurophysiologen im Team von Professor Otto Creutzfeldt – hier mit seiner Mitarbeiterin Bettina Lange-Malecki – untersuchen diese Frage am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Je nach Farbumgebung reagieren die farbempfindlichen Zapfen in der Netzhaut unterschiedlich etwa auf solche »Mondrian-Bilder«. Ein Ergebnis: Farben erscheinen heller, wenn sie von einem dunklen statt von einem hellen Feld umgeben sind



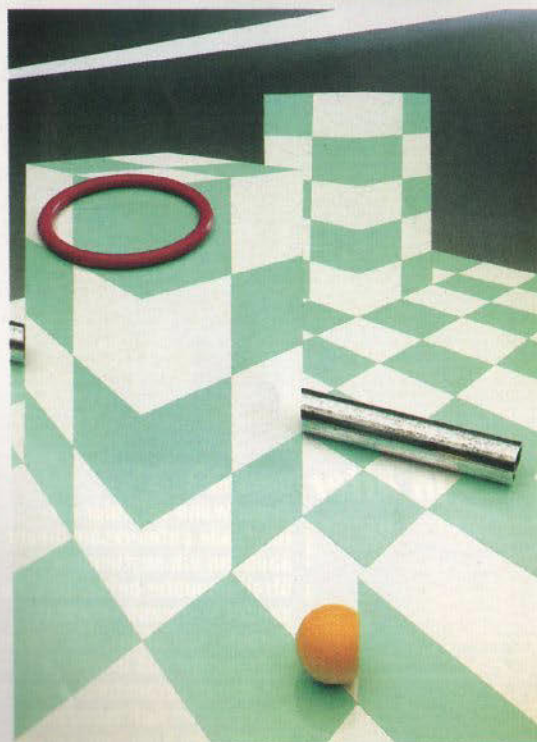


## Der Säugling sieht fast schon wie ein Alter



Durch ein Loch in der Wand wird hier verfolgt, wie aufmerksam dieser Säugling ein bestimmtes Streifenmuster betrachtet. Ruxandra Sireteanu vom Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt und ihre Mitarbeiter wollen herausfinden, wie sich die optische Auflösung des Auges beim Kleinkind entwickelt: Schon im Alter von einem Jahr ist seine Sehschärfe fast vollständig ausgebildet. Im linken Bild absolviert eine Katze einen ähnlichen Test





**Die Tiefe ist nur ein Trug**

Stab und Glas suggerieren einen Raum, obwohl nur eine Fläche mit Rauten und Quadraten bemalt ist. Das untere Bild gibt optische Rätsel auf, weil echte, zum Teil angeschnittene Objekte auf eine gemalte 3-D-Szene gelegt wurden

setts Institute of Technology (MIT) greift sich an den Hinterkopf und fragt fast etwas müde: „Wie können wir Objekte in der Welt erkennen und unterscheiden? Wie macht das Sehsystem das?“

Mindestens ein Drittel unseres Gehirns – vielleicht sogar mehr – beschäftigt sich mit dem Sehen. Es treibt also einen gigantischen Aufwand für eine Fähigkeit, die wir anscheinend mühelos beherrschen: Wir öffnen die Augen und sehen die Welt. Aber welche erstaunliche Leistungen Auge und Gehirn jede Sekunde vollbringen, bleibt uns im Alltag verborgen. Wie selbstverständlich sehen wir mit zwei Augen ein einziges Bild, und noch dazu ein räumliches. Allenfalls raffinierte Täuschungen bringen unsere Selbstsicherheit beim Sehen und Wahrnehmen ins Schleudern. Wie selbstverständlich nehmen wir aus einer Flut von Sinneseindrücken jene wahr, die uns gerade wichtig sind – oder uns wichtig werden könnten. Wir wundern uns nicht einmal darüber, daß wir Gesichter noch nach Jahrzehnten wiedererkennen, auch wenn sie inzwischen gealtert sind und sich verändert haben.

### Ist unser visuelles System gar nicht mehr das richtige für uns?

All diese Leistungen resultieren aus hochkomplizierten biologischen Vorgängen. Wir bemerken sie nicht, weil unser Sehsystem dank einer jahrmillionenlangen evolutionären Auslese hervorragend an die Erfordernisse unserer Lebenswelt angepaßt ist. Oder sollten wir besser sagen: war? Der Weg aus der afrikanischen Savanne nach Manhattan ist ein gewaltiger Sprung: Früchte aufzuspüren stellt andere Anforderungen an Augen und Hirn als Manuskripte zu schreiben oder Zeitschriften zu lesen. Unser visuelles System – Sehen und Wahrnehmen – aber ist das gleiche geblieben.

Sie sehen aus wie bizarre Bonsai-Bäume, winzige Gewächse mit buschigen Kronen, aber auch solche mit ausladenden, fein verzweigten Ästen: Die baumähnlichen Gebilde, Nervenzellen der Netzhaut, sind das „Fenster“ zu unserer Wahrnehmung der

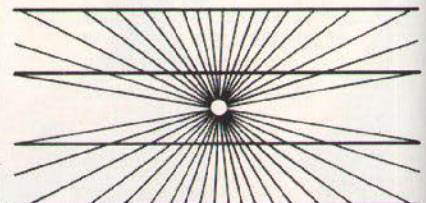
Welt. Die mikroskopisch kleinen Bäumchen verarbeiten die Informationen der lichtempfindlichen Photorezeptoren in der Netzhaut und leiten sie an das Gehirn weiter. Doch – wie üblich in der Hirnforschung – ist die Geschichte bei näherer Prüfung vertrackt.

Von Anfang an, beginnend in der Netzhaut, bearbeitet unser Gehirn die unterschiedlichen Aspekte der Wahrnehmung getrennt und fließen verschiedene Informationsströme tief ins zentrale Nervensystem. Es ist, als sähen wir die Welt gleichzeitig durch mehrere Filter. Doch irgendwie setzt unser Gehirn aus vielen unterschiedlichen Bildern dann irgendwo das zusammen, was wir wahrnehmen.

Robert Shapley und Ehud Kaplan von der New Yorker Rockefeller University studieren seit Jahren die Informationsströme von der Netzhaut zum Gehirn – und erleben immer neue Überraschungen. Denn es gibt keine einheitlichen Vorstellungen darüber, was welche Zelle macht – ja, die diversen Spielarten von Nervenzellen in der Netzhaut haben nicht einmal einheitliche Namen.

Zwei dieser Zelltypen stehen im Mittelpunkt des Interesses, manche Forscher nennen sie M-Zellen und P-Zellen. Die P-Zellen sind klein und zahlreich, die M-Zellen größer und sparsamer über die Netzhaut verteilt. Lange Zeit galten die P-Zellen als das wichtigste Fenster zur Wahrnehmung – als die Zellen, mit deren Hilfe wir Formen erkennen, Schriften lesen, Farben unterscheiden können. Die M-Zellen hingegen hielten die Forscher für „Exoten“, für Spezialisten mit nur wenigen Aufgaben. Nicht einmal deren Ausfall hätte für unser tägliches Seherleben große Bedeutung. Eine Fehleinschätzung, wie sich erweisen sollte.

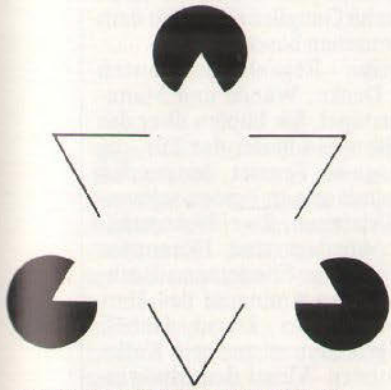
Shapley und Kaplan, die erst lange Zeit das Sehsystem des Frosches und danach die Nerven-



**Gerade Linien. Das Gehirn aber krümmt sie**



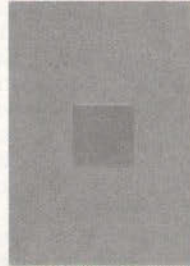
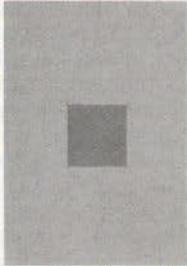
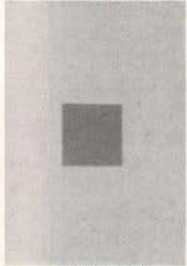
**Wenn  
simple Striche  
unsere Wahrnehmung planvoll  
betrügen**



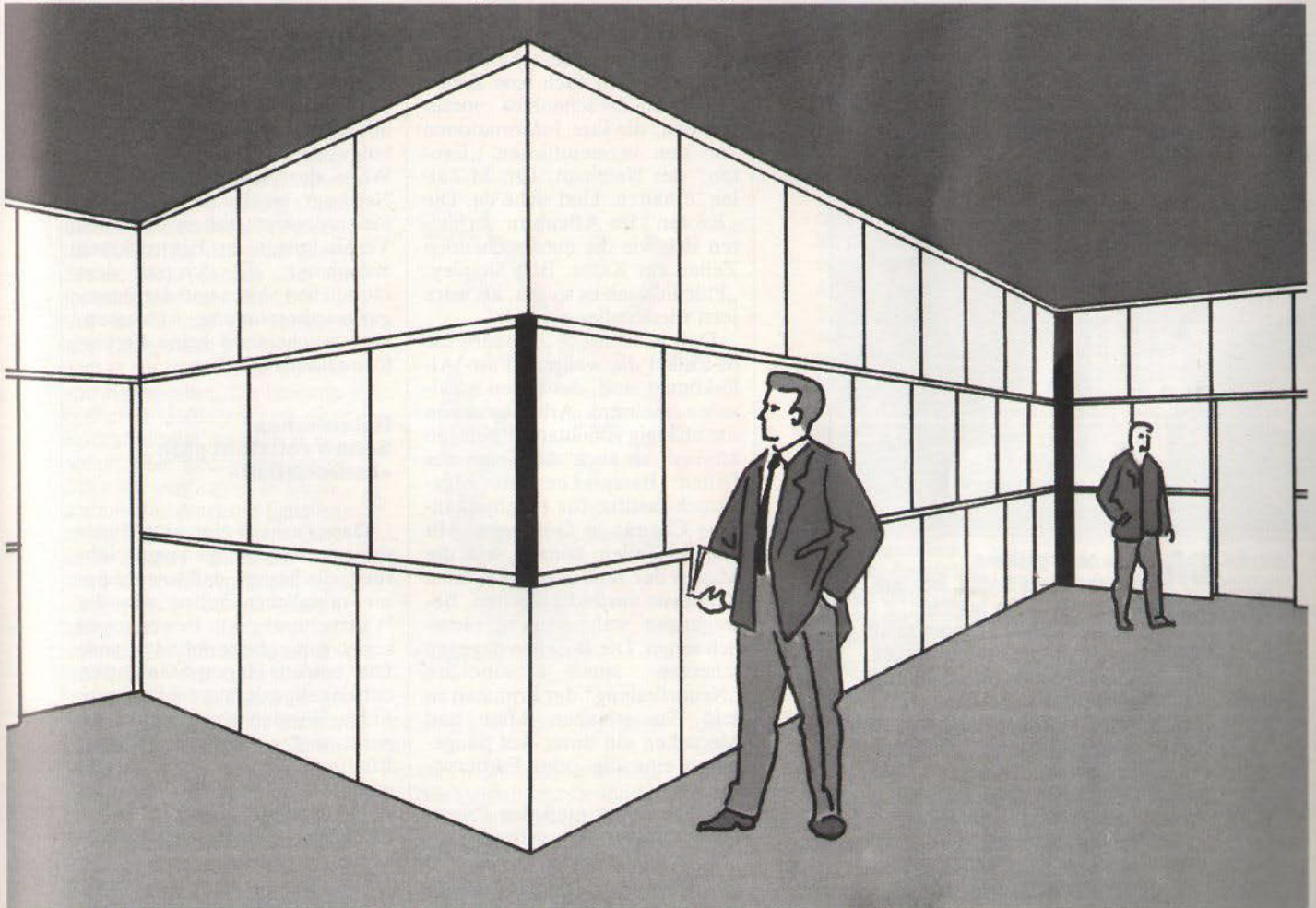
Konturen, wo keine sind: Dreieck



Schräge Streifen bringen die – exakt senkrechten – Buchstaben ins Wanken

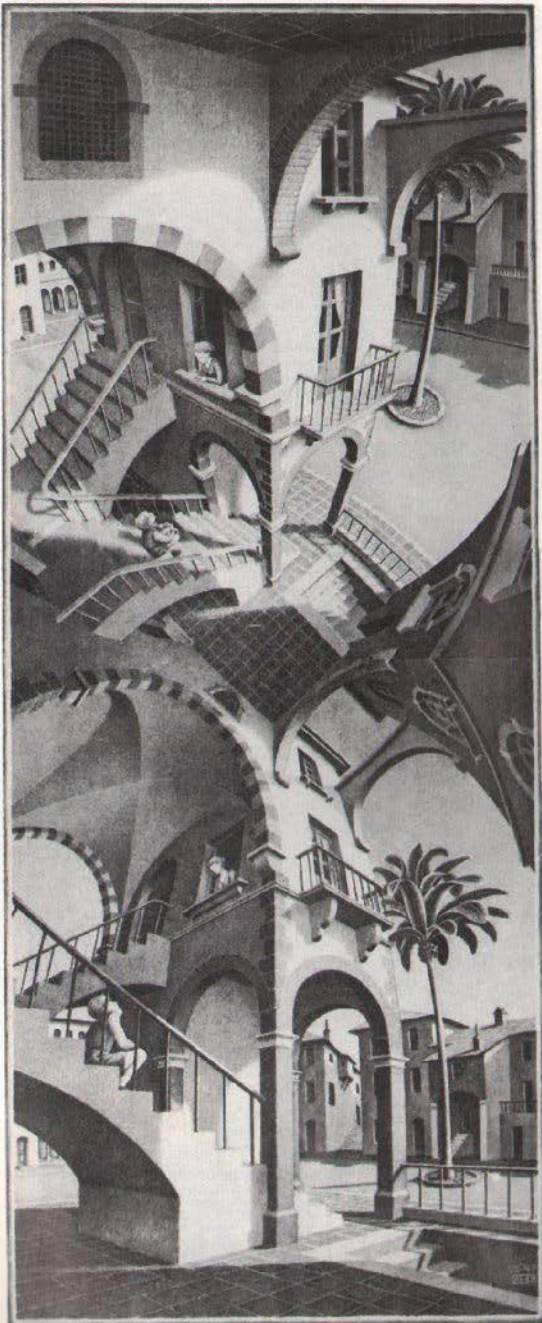


Das gleichbleibend graue Quadrat wirkt um so heller, je dunkler seine Umgebung wird



Spiel mit der »Müller-Lyer-Täuschung«: Die beiden dicken Balken sind in Wirklichkeit gleich lang





## Die verkehrte Welt

Von oben gesehen erscheint als Boden, was von unten als Decke fungiert: Maurits Cornelis Escher spielt in seinem 1947 entstandenen Bild »Oben und Unten« so trickreich mit Perspektiven und Fluchtpunkten, daß jeder Betrachter augenblicklich in Verwirrung stürzt. Wie oft sich diese Wahrnehmung beim Betrachter »umdreht«, hängt – so stellten Forscher fest – offenbar davon ab, ob er sich der Alternativen bewußt ist

zellen in Katzenauge und -gehirn untersucht hatten, entschlossen sich vor ein paar Jahren, mit Affen zu arbeiten. Besonders interessierten sie sich für bestimmte Nervenzellen in einer Relaisstation zwischen Auge und Großhirnrinde namens „seitlicher Kniehöcker“. Diese Zellen erhalten ihre Informationen von den P-Zellen der Netzhaut, also von den vermeintlichen Alleskännern.

### Im Farbensehen sind die Primaten Spitzenklasse

Zu ihrer Überraschung mußten die Forscher feststellen, daß diese Zellen feinere Helligkeitsunterschiede gar nicht bemerkten. Bob Shapley erinnert sich, was ihm damals durch den Kopf gegangen ist: „Wir haben die Kontrastempfindlichkeit von Fröschen untersucht und die ist mit der von Katzen vergleichbar. Und dann soll sie bei einem Affen so viel schlechter sein?“

Die beiden Wissenschaftler beschlossen, sich auch jene Zellen im Affen-Zwischenhirn vorzunehmen, die ihre Informationen von den vermeintlichen „Exoten“ der Netzhaut, den M-Zellen, erhalten. Und siehe da: Die „Exoten“ im Affenhirn verhielten sich wie die entsprechenden Zellen der Katze. Bob Shapley: „Plötzlich sah es so aus, als wäre jetzt wieder alles normal.“

Daß nicht die P-, sondern die M-Zellen die wahren (Fast-)Alleskänner sind, das haben inzwischen mehrere Arbeitsgruppen unabhängig voneinander belegen können, so auch das Team des Briten Barry Lee am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Mit den M-Zellen können wir die Muster der Welt erkennen, feine Kontraste ausfindig machen, Bewegungen wahrnehmen, räumlich sehen. Die P-Zellen dagegen scheinen eine evolutionäre „Neuerfindung“ der Primaten zu sein. Sie erlauben Affen und Menschen ein unter den Säugetieren einmalig gutes Farbensehen.

Farbensehen muß den Primaten große Vorteile gebracht haben, denn für das bunte Bild von der Welt wird ein gigantischer Aufwand betrieben. So sind zum

Beispiel in der Netzhaut neun von zehn Ganglienzellen mit dem Farbensehen beschäftigt.

Kleine Regenbogen tanzen über Decke, Wände und Manuskriptstapel. Sie hüpfen über das alte Rennrad hinter der Tür, die Kakteen am Fenster, den runden Tisch mit seinen beiden schwarzen Telefonen. Zwei Notenständer, aufgelegt sind Flötentrios von Wilhelm Friedemann Bach. Das ist das Ambiente des Harvard-Professors David Hubel. 1981 erhielten er und sein Kollege Torsten Wiesel den Medizin-Nobelpreis für bahnbrechende Arbeiten über Anatomie und Funktion des Sehsystems (siehe Kasten auf Seite 85). Den Plastikkristall am Fenster, der jene wundersamen Farbspektren erzeugt, hat Hubel in einem kleinen Laden in Boston erstanden, „in dem es sonst nur Kitsch gibt“.

Die bunten Muster symbolisieren das neue Interesse des Nobelpreisträgers: die Wahrnehmung der Farbe. Er selbst bezeichnet seinen Ausflug in die Wahrnehmungsforschung freilich als eine „vorübergehende Verirrung“.

Sein Vorstoß ins Reich der Farben begann, als er gemeinsam mit seiner Kollegin Margaret Livingstone die unterschiedlichen Wege der Sehsignale von der Netzhaut ins Gehirn verfolgte. Sie entdeckten, daß die M-Zellen Verbindungen zu Hirnregionen aufnehmen, die sich mit dem räumlichen Sehen und der Bewegungswahrnehmung befassen, aber anscheinend keine Farbinformationen erhalten.

### Räumliches Sehen vollzieht sich »farbenblind«

Damit erhielt eine alte Hypothese der Psychologen neue Nahrung, die besagt, daß sowohl unser räumliches Sehen wie die Wahrnehmung von Bewegungen sozusagen „farbenblind“ sind. Die beiden Harvard-Gelehrten entwickelten daraus die konkrete Frage: Würden wir von einer Szenerie weder einen räumlichen Eindruck erhalten noch Bewegung wahrnehmen, wenn sie sich – bei überall gleichbleibender Helligkeit – nur in ihren Farbtönen unterschiede?

Um das zu überprüfen, dachten sich David Hubel und Marga-



## Vier Quadratzentimeter, die das Licht in unser Leben bringen

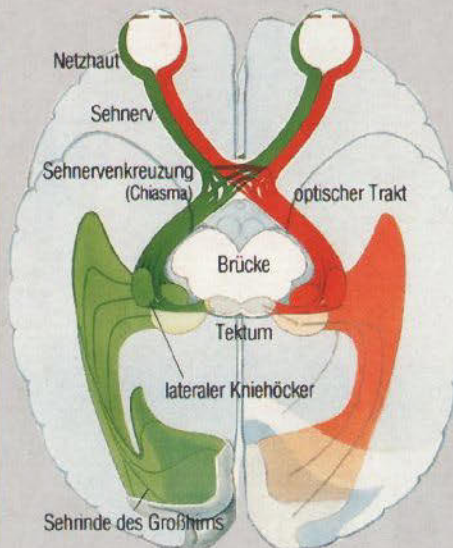
**D**as kleine bunte Bild, das der optische Apparat unseres Auges auf die Netzhaut hinten im Augapfel wirft, steht kopf. Wie die Netzhaut – ein Teil des zentralen Nervensystems – dieses Bild verarbeitet, bevor sie ihre Information ans Gehirn weiterleitet, ist noch längst nicht in allen Details geklärt.

Das Sehen beginnt in den Sehzellen, den lichtempfindlichen Stäbchen und Zapfchen der Netzhaut. Diese „Photorezeptoren“ können Lichtquanten – Photonen – einfangen. Ein solcher Fang löst in ihrem Innern eine Kaskade chemischer Reaktionen aus, an deren Ende ein elektrisches Signal steht. Bei dieser Kaskade spielt der Eiweißstoff Rhodopsin eine zentrale Rolle.

Auf den vier Quadratzentimetern Netzhaut eines Auges – der Fläche eines Einmarkstücks – sitzen dicht an dicht gepackt mehr als hundert Millionen Stäbchen und etwa sechs Millionen Zapfen; die Zapfen dienen dem Sehen bei Tageslicht, die Stäbchen ermöglichen das Sehen in der Dämmerung. Die Zapfen drängen sich besonders dicht in der Sehgrube, der Fovea, die damit zur Stelle des schärfsten Sehens wird: Mit ihr lesen Sie diesen Text.

Vor der Schicht der Stäbchen und Zapfen, also zur Linse hin, liegt in der Netzhaut ein Geflecht von Nervenzellen. Die lichtempfindlichen Sehzellen sind über Horizontalzellen miteinander verknüpft. Über Bipolarzellen geben Stäbchen und Zapfen ihre Informationen weiter zu den Ganglienzellen. Für weitverzweigte Querverbindungen innerhalb der Netzhaut, zwischen Bipolar- und Ganglienzellen, sorgen Amakrinzellen.

Von diesen „grobfaserigen Zellen“ haben Wissenschaftler mittlerweile über 20 Spielarten gezählt. In deren Innern finden sich nahezu alle chemischen Botenstoffe des Gehirns und darüber hinaus eine Reihe von Substanzen, die niemand im Auge vermutet hätte, darunter Sexualhormone. Die speziellen Aufgaben all dieser unterschiedlichen Ama-



**Sinnesphysiologen interessieren sich besonders für die Sehsysteme von Katzen und Affen, da sie jenem des Menschen am ähnlichsten sind. Die Netzhaut der Katze (oben) hat sogar mehr Lichtrezeptoren als die des Menschen – über 200 Millionen. Wie die Lichtreize beim Menschen von den Augen ins Gehirn gelangen und wo sie dort verarbeitet werden, zeigt die Grafik**

krinzellen sind noch völlig rätselhaft.

Bipolar-, Horizontal- und Amakrinzellen verarbeiten die von den Lichtreizen ausgelösten Nervenimpulse auf vielfältige Weise, bevor sie die gefilterten Signale an die Ganglienzellen weiterleiten,

der letzten Station im Auge. Jede Ganglienzelle ist für die Photorezeptoren eines bestimmten Bereichs der Netzhaut zuständig. Diese Bereiche – die „rezeptiven Felder“ – sind kreisförmig und konzentrisch organisiert: Sobald Licht ins Zentrum des Feldes

fällt, wird die Ganglienzelle erregt; fällt Licht dagegen ins Umfeld, wird sie gehemmt. Solche Zellen heißen „On-Zentrum-Neuronen“; Ganglienzellen, die genau umgekehrt organisiert sind, werden „Off-Zentrum-Neuronen“ genannt.

Sind die rezeptiven Felder der Ganglienzellen gleichmäßig ausgeleuchtet, passiert nicht viel – die Signale von Zentrum und Umfeld heben sich jeweils gegenseitig auf. Denn die Ganglienzellen „interessieren“ sich nicht für die Gesamtintensität der Beleuchtung, auch nicht für einheitliche Flächen, sondern nur für Kontraste, für Grenzen zwischen Hell und Dunkel. Die Ganglienzellen verschärfen und betonen diese Grenzen, bevor sie das Ergebnis ihrer Arbeit an das Gehirn weitermelden. So kann es – können wir – unsere Umwelt strukturiert wahrnehmen.

Dort, wo die Nervenfasern der Ganglienzellen als ein vergleichsweise dicker Strang die Netzhaut verlassen, liegt der „blinde Fleck“ unseres Auges, ein kleines Areal ohne Zapfen und Stäbchen. Die Sehnerven vom linken und rechten Auge kreuzen sich im Chiasma opticum (siehe Grafik), wo etwa die Hälfte der Fasern auf die jeweilige andere Seite wechselt. Einige Fasern zweigen hier zum Hypothalamus ab, einem auch an Gefühlsempfindungen beteiligten Teil des Mittelhirns.

Vom Chiasma zielen die beiden nunmehr vermischten Sehnerven auf die beiden Schaltstellen im Zwischenhirn, die nach ihrer Form so benannten „lateralen Kniehöcker“. Von da gelangen die Nervensignale aus den beiden Netzhäuten in die spezialisierten „optischen Rindenfelder“ der Großhirnrinde – auf der den Augen entgegengesetzten Seite des Kopfes. Erst jetzt entsteht in Kooperation mit anderen Arealen der Großhirnrinde aus den milliardenfach hereinströmenden Nervenimpulsen ein zusammenhängendes Bild der Außenwelt – jenes Bild, das wir bewußt wahrnehmen.



ret Livingstone eine Reihe von Experimenten aus – zum Beispiel dieses: Ein von einem Computer perspektivisch gezeichneter Würfel erweckt einen räumlichen Eindruck. Indessen wurde der Raumeindruck nicht mit Linien, sondern mit unterschiedlich stark punktierten Flächen erzeugt – mit roten Punkten auf grünem Hintergrund. Dann variierten die beiden Forscher den Kontrast. Sobald Punkte und Hintergrund gleich hell erschienen, verschwand plötzlich der Raumeindruck. Die Versuchspersonen sahen statt des Würfels plötzlich ein flaches Sechseck. Die „Farbenblindheit“ unseres räumlichen Sehens scheint also bestätigt zu sein.

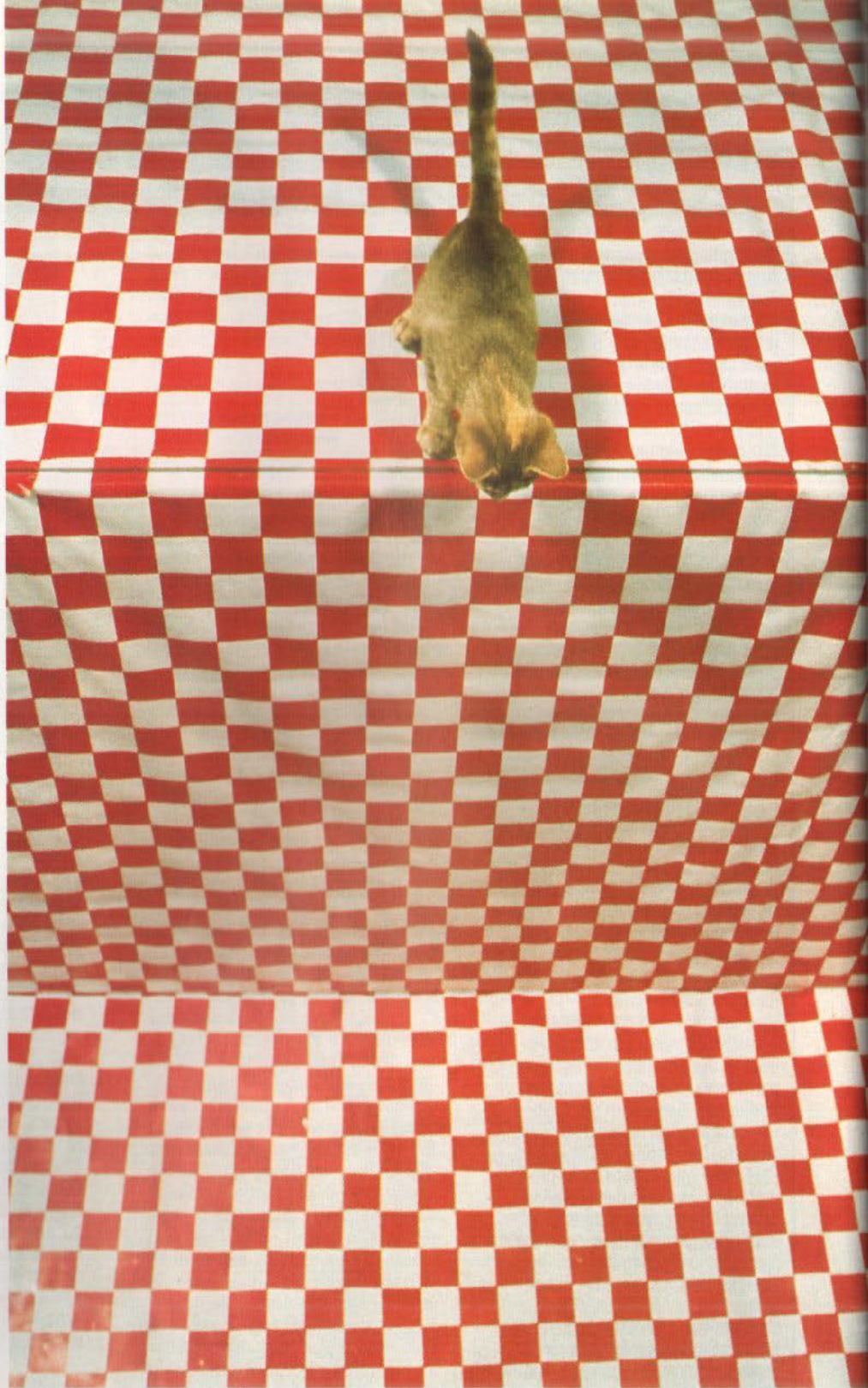
### **Irgendwo im Gehirn formt sich ein Bild der Welt. Aber wo und wie?**

Die merkwürdige Trennung von Farbe und Raumeindruck kann aber nur der Anfang eines Prozesses sein, an dessen Ende eine Wahrnehmung steht.

Irgendwo im Gehirn müssen die verschiedenen Komponenten ja wieder zusammenkommen, müssen wir Objekte als Einheiten erkennen, ein Bild von der Welt formen können. Aber wie bewerkstelligt unser Denkkorgan diese Synthese?

Diese Frage treibt Hubels langjährigen Kollegen und Mit-Nobelpreisträger Torsten Wiesel an. Vor einigen Jahren wechselte er von der Harvard zur Rockefeller University nach New York – nicht zuletzt, weil er schon immer mal in Manhattan leben wollte. Wiesel und seine Kollegen arbeiten in ihrem Labor an aufregenden Experimenten. Sie wollen herausbekommen, wie Nervenzellen im Gehirn über „weite“ Entfernungen Kontakt miteinander aufnehmen, wie es ihnen gelingt, in einem „neuronalen Netzwerk“ zusammenzuarbeiten.

Nacht in Manhattan, strömen der Regen. Im 3. Stock des „Tower Building“ der Rockefeller University wird noch gearbeitet. Das Labor ist ein fensterloser Raum voller Computer-Terminals, Meßgeräte, Kabel, Monitore. Irgendwo im Raum liegt eine Katze, in grünes Licht getaucht, narkotisiert. Sie atmet.



**Furchtlos  
über den gläsernen  
Abgrund**





**Zwei Monate alte Babys ohne Krabbelerfahrung haben meist noch keine Furcht vor der Tiefe. Je größer jedoch ihr Erfahrungsschatz wird, desto länger zögern sie, die Glasplatte über dem »Abgrund« zu überqueren – auch wenn Mutter lockt. Das Kätzchen dagegen weigert sich, die Glasplatte zu betreten**

Unter einer durchsichtigen Platte, einer Art Fenster im Schädelknochen, schimmert ihr Gehirn. Nur die verstärkten Herzschläge der Katze sind hörbar, sonst ist es ruhig. Das stille Experiment betrifft eines der heißesten Gebiete der Sehforschung: Amiram Grinvald, ein Kollege von Torsten Wiesel's Team, kann beobachten, wie die Nervenzellen des Katzenhirns über weite Bereiche des Gehirns zusammenarbeiten.

„Viele Probleme in der Hirnforschung würden sich sehr viel rascher lösen lassen, wenn die Nervenzellen aufleuchten würden, während sie miteinander sprechen“, erklärt mir der Forscher. „Allerdings gibt es einen Trick, wie man das doch erreichen kann.“ Elf Jahre brauchte Grinvald zu dessen Beherrschung. Dabei klingt das Prinzip einfach: Man nehme ein Färbemittel, das sich an die Hüllen der Nervenzellen anlagert und seine Farbe wechselt, wenn sich das elektrische Feld entlang der Nervenzelle ändert, sie also aktiv wird. Gesucht wurde folglich eine spannungsempfindliche Farbsubstanz. Grinvald testete über 2000 verschiedene Farbmoleküle, bis er fündig wurde.

### **Unser Schädel ist nicht vollkommen undurchsichtig**

Mit diesen Ariadne-Fäden durch das neuronale Labyrinth des Gehirns spürten Grinvald und seine Kollegen vor kurzem horizontale Verbindungen zwischen Nervenzellen auf, die sich über sechs und mehr Millimeter erstrecken – gewaltige Entfernungen im Mikrokosmos der Neuronen.

Inzwischen können sie Bilder von den Erregungsabläufen im Gehirn sogar ohne Färbemittel aufzeichnen – mit Hilfe der sogenannten intrinsischen („von innen kommenden“) Signale: Nervenzellen ändern, wenn sie aktiv werden, ihre optischen Eigenschaften. „Rotes Licht, das auf Gehirngewebe scheint, wird – wenn das betroffene Gebiet erregt ist – anders reflektiert, als wenn es ruht“, erklärt mir Grinvald. „Also werfen wir einfach rotes Licht auf das Gehirn unserer Katze und registrieren



## Kreuze erkennen wir am besten



Mit komplexen Mustern versucht Hans-Christoph Nothdurft herauszufinden, nach welchem »Verfahren« unser Sehsystem verschiedene Elemente zu größeren Figuren zusammensetzen kann. In diesen Testbildern hat der Neurobiologe vom Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie – oben in seinem Labor – dazu den »Kreis« mit Kreuzchen, die Umgebung mit Häkchen gemustert. Benutzt er dafür ausschließlich Häkchen, die sich außerhalb der Figur nach oben, innerhalb nach unten öffnen, dann erkennen die Testpersonen die Figur schlecht oder gar nicht. Am besten nehmen sie den Kreis als Kreuzchenmuster wahr. Auch Kontraste in Farbe und Helligkeit unterstützen die Identifizierung

die Änderungen der Lichtstärke.“

Diese feinen Änderungen der Lichtstärke könnten sich eines Tages auch beim Menschen beobachten lassen, meint der Forscher. „Wir denken immer, unser Schädel sei vollkommen undurchsichtig. Wir geben uns der Illusion hin, niemand könne in unseren Kopf hineinblicken. Aber es ist seit langem bekannt, daß der menschliche Schädel für Wellenlängen nahe dem Infrarot durchlässig ist.“

Von Manhattan nach Maryland, vom Sehen zur Wahrnehmung. Ziel meiner Reise ist ein flacher Backsteinbau in einem weitläufigen Parkgelände – das Gebäude T9 der National Institutes of Health (NIH) der USA in Bethesda, einer Vorstadt von Washington.

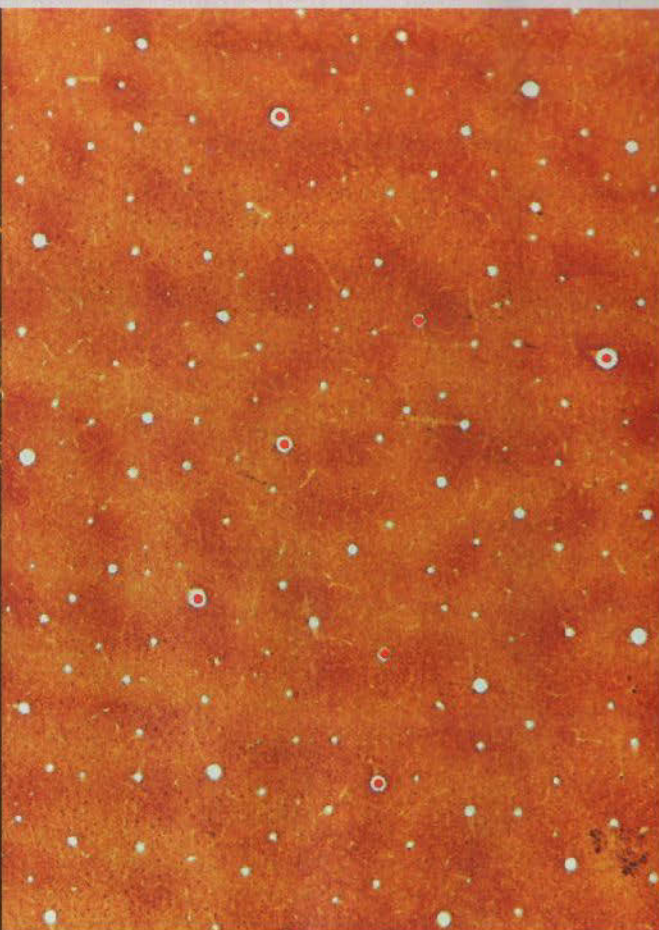
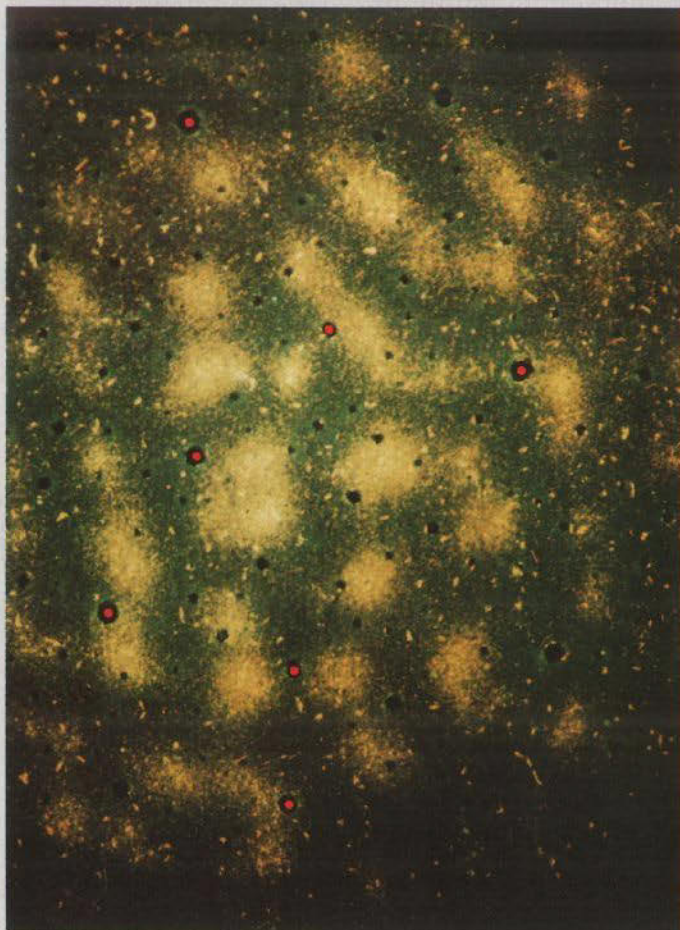
## Etwas zu erkennen heißt noch lange nicht, es zu lokalisieren

Leslie Ungerleider ist eine sehr freundliche und ebenso zierliche wie zielstrebige Frau. Wie David Hubel interessiert sie sich dafür, wo im Gehirn welche Aspekte der Wahrnehmung verarbeitet werden. Dabei konzentriert sie sich auf „höhere Funktionen“: auf das „Was“ und das „Wo“, auf das Erkennen von Objekten und auf die Fähigkeit, sie im Raum zu lokalisieren. Denn auch diese beiden Aufgaben werden offensichtlich zunächst von unterschiedlichen Hirngebieten in Angriff genommen.

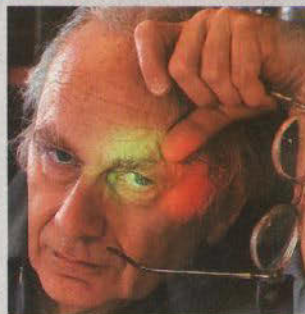
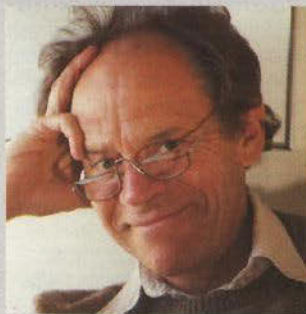
Darauf brachten Leslie Ungerleider und deren Kollegen Verhaltensexperimente mit Affen. Sie beschreibt mir eine typische Aufgabe für die Tiere: „Wir zeigen dem Affen irgendein Spielzeugobjekt, und wenn er es zur Seite rückt, findet er darunter eine Erdnuß. Zehn Sekunden später zeigen wir ihm dasselbe Objekt noch einmal, zusammen mit einem neuen Gegenstand. Und jetzt heißt die Aufgabe für den Affen einfach: Erkenne das Objekt, das du gerade gesehen hast, und gehe zum neuen. Denn jetzt findest du darunter die Erdnuß.“

An diesem Vormittag wird Samba trainiert, ein kleines, vier Monate altes Affenmädchen. Nachdem sie in die „Wisconsin-Box“, einen Käfig mit Klappe,





## Einblicke ins getüpfelte Gehirn



**Für ihre revolutionären Erkenntnisse über das Gehirn erhielten der Schwede Torsten Wiesel (links) und der Amerikaner David Hubel 1981 den Nobelpreis für Medizin: Sie hatten regelmäßige Muster in der Sehrinde entdeckt, die beim Sehvorgang wie kleine Module aktiviert werden (oben). Die roten Punkte sind Blutgefäße**

**M**an kann das Sehen im Hirn sehen! Mit dieser revolutionären Einsicht warteten die beiden Medizinnobelpreisträger David Hubel und Torsten Wiesel auf, als sie von ihrer Entdeckung regelmäßiger Muster im Gehirn von Affen und Katzen berichteten: In der Sehrinde sind die Nervenzellen in „Säulen“ angeordnet, die mit bestimmten Techniken sichtbar zu machen sind – in parallel nebeneinander liegenden Scheiben, die sich von der Oberfläche der Hirnrinde in die Tiefe des Gehirns erstrecken.

Für diese Säulen wurden zwei unterschiedliche Ordnungsprinzipien gefunden: In den „Orientierungssäulen“ liegen Zellen nebeneinander, die alle dieselbe Orientierungs-„Vorliebe“ besitzen, also etwa besonders heftig auf waagerechte Kanten reagieren. In den „Augendominanzsäulen“ sind die Nervenzellen entsprechend ihrer „Äugigkeit“ angeordnet: Manche Zellen in der Sehrinde erhalten nur von einem Auge Informationen, andere stehen mit beiden Augen in gleich engem Kontakt.

Hubel und Wiesel nehmen an, daß die Orientierungs- und die Augendominanzsäulen zusammen jeweils kleine Arbeitseinheiten oder Module bilden, in denen immer alle Orientierungsrichtungen und alle Augendominanzverhältnisse vertreten sind. Des weiteren gehen die beiden Forscher davon aus, daß jedes dieser Module einen bestimmten kleinen Ausschnitt aus dem Gesichtsfeld analysiert, während benachbarte Module jeweils für benachbarte Bereiche des Gesichtsfeldes zuständig sind.

Inzwischen haben die Säulen-Gesellschaft bekommen: Mit einer neuen Färbetechnik haben zwei Arbeitsgruppen nacheinander ein weiteres Muster entdeckt, das David Hubel so beschreibt: „Das Gehirn sieht aus, als ob es Masern hätte.“ Das neue Färbemittel läßt die Sehrinde getupft oder gepunktet erscheinen (siehe Foto). Zur Zeit wird spekuliert, ob sich die Zellen in den dunklen Tupfen auf die Analyse von Farben spezialisiert haben – Farben, die erst in unserem Gehirn entstehen.



# In dieser Welt muß ein Mensch viele Sinne beieinander haben

Für unser Gehirn hat zwar das Sehen offenbar höchste Priorität. Ohne unsere anderen Sinne wären wir Menschen jedoch hilflos



## Riechen: Ein Universum für die Nase

Mit unserem Geruchssinn können wir Tausende unterschiedlicher Duftstoffe unterscheiden. Zwar ist noch nicht genau bekannt, was in unserer Nasenhöhle passiert, wenn wir Küchendämpfe wittern oder einen Parfumschwall aufschnappen. Sicher ist jedoch, daß unsere Riechzellen außerordentlich empfindlich sind: Manche Substanzen können wir in geringeren Konzentrationen erschnuppern, als die besten Analysegeräte sie registrieren können.

Aus Erfahrung wissen wir, daß langanhaltende Geruchsreize schließlich nicht mehr von uns wahrgenommen werden. Daran sind nicht, wie lange vermutet worden war, die Riechzellen in der Nase schuld – sie passen sich nur sehr allmählich an die verschiedenen Gerüche an, geben also ihre Meldungen nach wie vor an den Riechkolben des Gehirns weiter. Vielmehr sind, wenn uns Gerüche schon nach wenigen Minuten nicht mehr bewußt sind, wahrscheinlich höhere Hirnzentren eingeschränkt. Der Riechkolben unterhält sehr enge wechselseitige Beziehungen zur Hirnrinde und zum „Limbischen System“, das sich um unser Gefühlsleben kümmert. Je nach biologischer Bedeutung des Reizes scheinen die verschiedenen Hirnzentren die Reaktionen des Riechkolbens abzuschwächen oder auch zu verstärken. Möglicherweise nehmen wir ja den Geruch von jemandem, den wir „nicht riechen können“, tat-

sächlich auch weniger intensiv wahr – oder intensiver. Das Riechsystem ist eine stammesgeschichtlich sehr alte „Erfindung“. Vielleicht hat es deshalb eine Fähigkeit einfacherer Lebewesen bewahrt: Die Riechzellen werden immer wieder erneuert.



## Hören: Haarzellen für Töne und Klänge

Ein gesundes Gehör ist für uns fast notwendiger als das Augenlicht, denn es ist der Schlüssel zu unserem wichtigsten Kommunikationsmittel – der Sprache: Kinder, die gehörlos zur Welt kommen, erleiden weitaus größere Entwicklungsschäden als Blindgeborene.

Trotzdem fällt die Zahl der Wissenschaftler, die sich mit dem Hörsinn befassen, gegenüber den „Sehforschern“ kaum ins Gewicht. Einer der Gründe: Die Sinnes- und Nervenzellen, die uns das Hören ermöglichen, liegen versteckt und geschützt im Innern des Schädels, in der knöchernen Schnecke. Sie sind den neugierigen Blicken und ableitenden Elektroden der Forscher daher sehr viel schwerer zugänglich als die Photorezeptoren und Nervenzellen der Netzhaut.

Verglichen mit der Zahl der Photorezeptoren im Auge – mehr als 100 Millionen –, kommt das Ohr mit weitaus weniger Sinneszellen aus: mit etwa 30 000. Mit ihnen erschließen wir uns die Welt der Töne im Frequenzbereich zwischen 20 und 16 000 Hertz (Schwingungen pro Sekunde).

Wie im Auge, so gibt es auch im Ohr zwei Arten von Sinneszellen: innere und äußere Haarzellen. Obwohl den äußeren an Zahl unterlegen, sind die inneren Haarzellen bei der Reizübertragung deutlich überrepräsentiert: Sie beanspruchen 95 Prozent der „Leitungskapazität“ im Hörnerv, einem Strang mit 30 000 bis 40 000 einzelnen Nervenfasern. Die äußeren Haarzellen enthalten muskelähnliche Strukturen. Es wird vermutet, daß die Zellen selbst durch aktive Bewegung die akustische Empfindlichkeit des Ohres verstärken können. Die akustische Hirnrinde ist wie die Sehrinde in „Säulen“ organisiert. Zellen innerhalb einer Säule bevorzugen denselben Frequenzbereich.

Auch andere Gehirnareale sind aktiv an der Geräuschwahrnehmung beteiligt. Die diversen „akustischen Gebiete“ sind allerdings noch wenig erforscht.

Erhalten Auge und Ohr widersprüchliche Informationen darüber, wo sich eine Schallquelle befindet, dann trauen wir unseren Augen. Jeder kennt das Phänomen aus dem Kino: Obwohl uns vollkommen klar ist, daß die Dialoge aus dem Lautsprecher schallen, haben wir den Eindruck, sie kämen direkt von den Personen auf der Leinwand. Aber dieser Konflikt ist eher experimenteller Natur. Im täglichen Leben ergänzen Gesicht und Gehör sich vorzüglich. Das Ohr ist der „Eye Catcher“, es lenkt die Aufmerksamkeit der Augen auf die Informationsquelle.



## Schmecken: Knospen auf der Zunge

Beim eigentlichen Schmecken beschränken wir uns auf vier Qualitäten: Ob etwas bitter, sauer, salzig oder süß ist, erspüren die Schmeckzellen. Sie sitzen gemeinsam mit sogenannten Stützzellen in den Geschmacksknospen unserer Zunge und melden

von dort die empfangenen Reize über Geschmacksnerven dem Gehirn. Einige Tausend solcher Knospen, die jeweils 40 bis 60 Zellen enthalten, bedecken die Zunge.

Ob uns etwas schmeckt, hängt indes nicht nur davon ab, was die Schmeckzellen melden. Die Geschmacksempfindung ändert sich, je nachdem, wie etwas riecht, wie warm es ist, wie es sich anfühlt und woran uns der betreffende Geschmack erinnert.

Die Zunge besitzt – ähnlich dem Auge – eine Art „Kurzzeit-Gedächtnis“ für die vier Geschmacksqualitäten. Wenn wir ein leicht saures Getränk getrunken haben, schmeckt destilliertes Wasser danach süßlich.



## Haut-Sinne: Fingerspitzen – Gefühle

Der Tast-, der Temperatur- und der Schmerzsinne haben ihre Sinneszellen gemeinsam im Organ „Haut“ konzentriert. Die Rezeptoren für Wärme, Kälte und Schmerz (siehe die Seiten 50/51) und des Tastsinnes liegen weit über den Körper verstreut in der Haut – und zwar sehr unterschiedlich dicht. Der Tastsinn läßt sich in Druck-, Berührungs-, Vibrations- und Kitzelempfindung unterteilen.

Wie jeder leicht an sich feststellen kann, können wir – zum Beispiel mit einer Fingerkuppe – all diese unterschiedlichen Reize wahrnehmen: Die Rezeptoren leben in enger Nachbarschaft. Tastrezeptoren haben jeweils bestimmte Empfindungsschwellen, deren Höhe sich allerdings von Mensch zu Mensch und vor allem zwischen verschiedenen Körperteilen deutlich unterscheiden: Zungenspitze und Lippenrot beispielsweise sind um ein Vielfaches sensibler als Handrücken oder Nacken.

Die Temperaturempfindung kann sich, wie jeder vom Schwimmen





weiß, einem bestimmten Bereich vollständig anpassen: Springen wir in 28 Grad warmes Wasser, dann erscheint uns das kalt. Doch schon nach kurzer Zeit haben wir eine „neutrale“ Empfindung. Denn innerhalb des Temperaturbereichs von 20 bis 40 Grad „adaptieren“ sich die Rezeptoren schnell an die neue Hauttemperatur.

Wird eine gewisse Temperatur überschritten, setzen die Thermorezeptoren aus. Schmerzrezeptoren für Hitze signalisieren dann dem Gehirn, daß es brenzlich wird. Bei der Druckempfindung verhält es sich ähnlich.

### **Gleichgewicht: Selbstverständliche Balance**

Dieser Sinn wird von uns am wenigsten beachtet, obwohl er uns ständig dient: Er hilft uns entscheidend, aufrecht durch die Welt zu gehen. Die Rezeptoren des Gleichgewichtssinns sitzen im „Vestibularorgan“, einem Teil

des inneren Ohres. Dieses Organ besteht aus zwei Einheiten für unterschiedliche Funktionen, den Bogengängen und den Maculaorganen. Diese enthalten Sinneszellen, die – vergleichbar denen für das Hören – feine Härchen tragen. Auch sie heißen deshalb Haarzellen.

Die Härchen reichen tief in eine Gallertmasse, die sich bei Beschleunigung verschiebt und die Sinneshaare bewegt. Mit den Maculaorganen können wir lineare Beschleunigungen wahrnehmen, zu denen auch die Schwerkraft gehört. So erhalten wir ständig Informationen über die Lage unseres Kopfes. Die nahezu kreisförmigen Bogengänge reagieren auf Drehbeschleunigungen. Melden die Sinneszellen dem Zentralnervensystem, daß wir aus dem Gleichgewicht zu geraten drohen, werden dort Weckzentrum, Thalamus, Hypothalamus und Kleinhirn alarmiert. In einer vom Gehirn gesteuerten Reaktion müssen dann Augen und Muskeln helfen, die Balance zu halten.

**Nach Horst Mittelstaedt vom Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie besteht alle unsere »Senkrecht«-Empfindung aus zwei Komponenten: aus der objektiven Richtung der Schwerkraft und aus einer »subjektiven Vertikale«.** Wenn Versuchspersonen beim Test in einer schwenk- und drehbaren Vorrichtung den Zeiger »nach oben« ausrichten sollen, justieren sie gewöhnlich den Zeiger etwas schräg – um so mehr, je ausgeprägter ihre »subjektive Vertikale« ist

gesprungen ist, geht das Theater los. Die Experimentatorin legt zwei „Objekte“, eine Pappnase und ein rotes Stickleinchen auf einen Karton. Unter einem der beiden versteckt sie eine Bananen-Pille.

Klappe hoch: Shamba hat jetzt Zeit, zwischen die Gitterstäbe hindurch nach einem der beiden Objekte zu langen. Sie findet ihre Belohnung, nimmt aber gleich auch noch die Pappnase zu sich in den Käfig.

### **Ein Auge »sieht« nur, was sich für den Sehenden lohnt**

Die Affen lernen schnell, immer nach dem neuen Objekt zu greifen, denn, meint Leslie Ungerleider, „sie mögen es, sich mit Neuem zu befassen“. Allerdings: Wenn sie unter einer bestimmten Hirnverletzung leiden, wenn nämlich ein Teil ihres Schläfenlappens beeinträchtigt ist, dann vermögen sie diese einfache Aufgabe nicht mehr zu lösen.

Im Schläfenlappen finden sich Nervenzellen mit ungewöhnlichen Eigenschaften: Sie empfangen nicht nur über die Sinnesorgane die Informationen von der Welt, sondern verarbeiten auch gespeicherte Erfahrungen. Sie haben die ganze Welt als ihr rezeptives Feld, wie sich Ungerleiders Kollege Mortimer Mishkin ausdrückt: „Diese Nervenzellen werfen die Information darüber, wo sich ein Objekt befindet, einfach weg. Sie beschäftigen sich vielmehr damit, was es ist, unabhängig davon, wo es ist.“

Mit dem „Wo“ befassen sich offensichtlich Zellen im Scheitellappen der Hirnrinde. Patienten, die an Hirnverletzungen in diesem Bereich leiden, haben Schwierigkeiten, komplexe Muster nachzuzeichnen, bei denen es auf die Beziehung verschiedener Teile zueinander ankommt. Affen mit entsprechenden Verletzungen können unter anderem nicht lernen, unter zwei Objekten immer jenes zu wählen, das näher bei einem bestimmten Markierungspunkt liegt.

Wo aber kommen das „Was“ und das „Wo“ zusammen, wo entsteht eine zusammenhängende Wahrnehmung? Leslie Ungerleider und ihre Kollegen tippen auf eine stammesgeschichtlich

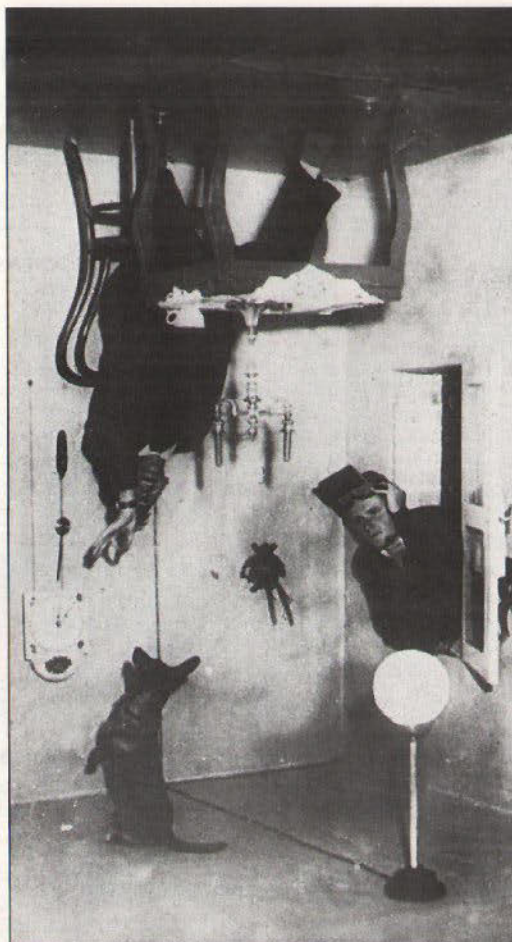


sehr alte Struktur im Gehirn, auf den Hippokampus. Er ist ein Teil des „Limbischen Systems“ und spielt auch für unser Gedächtnis und für unser Gefühlsleben eine Rolle.

Mishkin interessiert sich vor allem dafür, wie Sehen, Vorstellungen und Gedächtnisbilder zusammenhängen. Was in unserem Gehirn passiert, wenn wir uns eine Szene, ein Bild vorstellen. Wenn wir halluzinieren. Werden dabei genau jene Nervenzellen aktiv, die auch dann arbeiten, wenn das entsprechende Bild tatsächlich auf unsere Netzhaut fällt? „Dänische Kollegen haben mit PET-Studien gezeigt, daß Zellen im visuellen System tatsächlich in Erregung geraten, wenn sich Versuchspersonen Szenen nur vorstellen. Aber“, schränkt Mishkin ein, „das ist immer noch kein Beweis dafür, daß dieselben Nervenzellen für Wahrnehmung und Gedächtnis verantwortlich sind. Meine Vermutung ist: ja. Aber die Schaltungen können verschieden sein. Die Unterschiede zwischen etwas Sehen und sich etwas Vorstellen – etwas Halluzinieren – könnten darin liegen, daß dieselben Nervenzellen auf eine unterschiedliche Art aktiv werden.“

Eine Schlüsselrolle bei der Wahrnehmung spielt die Aufmerksamkeit. In jedem Moment strömt eine Unzahl von Sinnesindrücken auf uns ein. Aber schon die Netzhaut filtert und wählt aus, welche Informationen sie ans Gehirn weiterleiten soll. Dort wird dann kräftig weiterselektiert, und zwar unter dem Einfluß „höherer“ Zentren. In bestimmten Hirngebieten von Affen, die Informationen von den Augen verarbeiten, haben Sehforscher eine merkwürdige Beobachtung gemacht: Sie konnten einzelne Nervenzellen belauschen, die nur dann auf einen Reiz in ihrem Einzugsbereich – zum Beispiel auf einen roten Balken – antworten, wenn der Affe seine Aufmerksamkeit auf diesen Reiz konzentriert.

Es ist ganz wichtig, daß man sich die Verarbeitung visueller Information nicht als „forward processing“ vorstellt – nach der Regel: „Gehe von A nach B und so weiter, bis du bei Y landest“ –, warnt Peter Schiller, Sehforscher am MIT in Cambridge (Massachusetts), USA. Es kommt vielmehr



## Was ist oben? Was ist unten?

Ein surrealistisch anmutendes Experiment führte der Verhaltensforscher Ivo Kohler in den fünfziger Jahren durch: Er ließ einen Freiwilligen eine »Umkehrbrille« tragen, die mit ihren Prismen die Welt auf den Kopf stellt. Nachdem der Proband sich daran gewöhnt hatte und seine Umgebung wieder als »normal« erlebte, baute der Forscher eine verkehrte Welt: ein Zimmer, in dem, durch die Einrichtung vorgetäuscht, Decke und Fußboden vertauscht waren. Kohler ließ sich selbst auf dem Stuhl an der Decke fest schnallen. Als dem jungen Mann beim Blick durchs Fenster die Umkehrbrille abgenommen wurde, registrierte er die Welt nach einigen Sekunden wieder richtig – und war völlig verwirrt, weil nun das Zimmer auch für ihn wieder buchstäblich kopf stand

überall zu Interaktionen, zu Wechselwirkungen: „Der Output einer Nervenzelle wird nicht nur vom visuellen Input bestimmt, sondern auch davon, was höhere Zentren zurückmelden.“

Manche Wissenschaftler vermuten, Rückmeldungen von der Hirnrinde könnten schon Nervenzellen auf viel niedrigeren Stufen beeinflussen, zum Beispiel im „seitlichen Kniehöcker“ des Zwischenhirns. Die Nervenzellen in dieser Zwischenstation besitzen vielfältige Beziehungen zu allen möglichen Hirnregionen; ihre Verbindungen zur Netzhaut machen nur zehn Prozent ihrer Kontakte aus.

## Ein Hirn schreibt vor, was tatsächlich gesehen werden soll

Wie die Hirnrinde die Nervenzellen des Zwischenhirns kontrollieren kann, das untersucht unter anderem die Arbeitsgruppe von Robert Shapley und Ehud Kaplan in New York. Während wir im Labor sitzen und auf dem Monitor Gitterreize betrachten, mit denen einzelne Affen-Nervenzellen getestet werden sollen, kommt Kaplan ins Reden. Er schwärmt vom Sommer in Woods Hole in Massachusetts, vom dortigen meeresbiologischen Labor, und von seinem früheren Untersuchungsobjekt, dem Pfeilschwanzkrebs *Limulus*. Der *Limulus* gehört zu den lebenden Fossilien; in ganz ähnlicher Gestalt dürften seine Vorfahren schon vor 500 Millionen Jahren gelebt haben.

Im Auge dieses urtümlichen Tieres machten Kaplan und seine Kollegen eine verblüffende Entdeckung: Die lichtempfindlichen Zellen, die Photorezeptoren, erhalten Informationen direkt vom Gehirn – die Nervenzentrale schreibt ihnen offenbar vor, wie empfindlich sie auf Licht reagieren sollen. Kaplan: „Das Gehirn streckt sich aus zum Photorezeptor und reguliert dessen Empfindlichkeit. Ich kann es immer noch nicht glauben, aber es ist wahr.“

Ob die Kontrolle des Gehirns auch bei Primaten – einschließlich des Menschen – bis in die Ganglienzellen oder gar die Photorezeptoren des Auges reicht? Viele Wissenschaftler halten dies



für ziemlich unwahrscheinlich. Zum Glück können die höheren Zentren die aufgenommenen Schreize nicht beliebig verändern, wie Peter Schiller versichert: „Gott sei Dank halten wir ein menschliches Wesen nicht für einen Truthahn, nur weil wir sehr hungrig sind. Wahrnehmungen sind ziemlich stabil.“

Auf ihren Expeditionen durchs Gehirn sind Wissenschaftler weit vorgestoßen und haben unerwartete Territorien sondiert. Man-

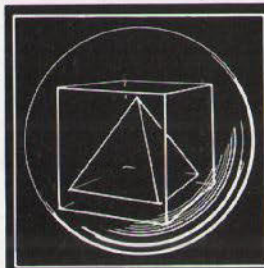
che Beobachtungen sorgten für Schlagzeilen, etwa die „Gesichtszellen“: Im Affenhirn gibt es Nervenzellen, die besonders heftig reagieren, wenn die Tiere ein Gesicht erblicken. Andere Zellen scheinen sich auf Hände und Pfoten spezialisiert zu haben. Aber das heißt noch lange nicht, daß Affen – oder auch Menschen – Gesichter nur dann sehen, wenn eine solche Nervenzelle feuert. Denn das würde bedeuten, daß es im Primatenhirn für

alle Subjekte und Objekte unserer Lebenswelt eine spezialisierte Zelle gibt.

Unser Sehsystem und unsere visuelle Wahrnehmung konnten die Forscher in einzelne Teile zerlegen. Und was nun? Torsten Wiesel gestand kürzlich die Ratlosigkeit seiner Zunft ein: „Wie die einzelnen Komponenten dann wieder zusammengesetzt werden zu einer einzigen Wahrnehmung, das jedoch ist immer noch ein Rätsel.“ □



**Dr. Regina Oehler**, 33, studierte Biologie und Psychologie in Freiburg und arbeitete zunächst als Neurobiologin. Seit 1984 schreibt sie für die »Zeit« und die »Süddeutsche Zeitung«. Letztes Jahr wurde sie Wissenschaftsredakteurin beim Hessischen Rundfunk



# GEHEIMES WISSEN



Es begann vor einigen Jahren mit einer Sensations-Nachricht, die auf dem ganzen Erdball Führungsleute aufhorchen ließ: Der Ingenieur John Milhalasky und der Parapsychologe E. Douglas Dean hatten bei ihren Forschungen am bekannten Technologie-Institut von New Jersey herausgefunden: Mehr als 80 Prozent (!) der Topmanager, die innerhalb von fünf Jahren den Gewinn ihrer Firmen verdoppelt hatten, besaßen überdurchschnittliche präkognitive (hellseherische) Kräfte!

Seither wurde viel gerätselt und spekuliert. Ein Schweizer Forschungs-Institut setzte dem ein Ende. Eine breitere Öffentlichkeit wurde mit diesem Wissen in Form eines Programmes bekannt gemacht. Der Name des Programmes: DAS GEHEIMNIS DER GROSSEN!

- Frank S.: „*Persönlicher Erfolg wird vorausberechenbar, ich träume nicht mehr vom Erfolg, sondern ich bin erfolgreich.*“
- Wolfgang H.: „*Danke für das Programm. Ich beginne zu begreifen.*“
- Daniela K.: „*Eine lange Erfolgskette ziehe ich schon hinter mir her, einfach wunderbar! Um alle Erfolge berichten zu können, müßte ich Ihnen schon einige Bücher zusenden.*“
- Ingrid Z.: „*Ich bin von der Lernmethode des Programms begeistert, ich schreibe das so spontan, da ich schon woanders über 2 Jahre studiert habe.*“
- Jürgen W. B.: „*.... das von Ihnen zusammengestellte Programm ist großartig. Es ist mehr wert, als es kostet.*“
- Emanuel B., Solingen: „*Ich bin von der Effizienz Ihres Programmes überzeugt.*“
- Georg L., Basel: „*Ich möchte Ihnen von Herzen danken, daß Sie in Europa die beste Schulmethode ins Leben gerufen haben. Es ist einfach wunderbar, Ihre geehrte und sichere Methode kennenzulernen.*“

Wie sind diese phantastischen Erfolge möglich? Im GEHEIMNIS DER GROSSEN werden dem Teilnehmer die Gesetze des Kosmos, die gleichzeitig auch die des Lebens und des Erfolges sind, umfassend und ausführlich erläutert. Jenes z. T. jahrtausendealte „Geheime Wissen“, jene „Uralte Weisheit“, die immer nur Eingeweihten vorbehalten war, legt DAS GEHEIMNIS DER GROSSEN offen. Während die heutige Schulwissenschaft nur die Wirkungen lehrt, zeigt das Programm die tatsächlichen Ursachen auf. Der Teilnehmer bekommt durch die Kenntnis der Gesetze ein völlig neues Weltverständnis. Er lernt die tieferen Zusammenhänge erkennen, verstehen und auf seinen privaten Bereich zu übertragen. Erfolg ist damit keine Glückssache mehr, sondern wird berechenbar. Verfolgte Ziele werden in kürzester Zeit erreicht. Dr. rer. nat. Milan Ryzl, einer der wohl bedeutendsten Forscher auf dem Gebiete der Parapsychologie, meint zu diesem Wissen: „Der geheime Weg zu all diesen Leistungen führt über

die richtige geistige Disziplin, über ein entsprechend wirksames Denken. Bis jetzt hat man uns gelehrt, nach Kriterien der Logik und Vernunft wirksam zu denken. Nun müssen wir lernen, auch in anderen Dimensionen wirksam zu denken. Dies ist das Ziel, nach welchem die Weisen und Erleuchteten aller Zeiten strebten.“

**Wir behaupten: Ohne dieses Wissen werden Sie weiterhin unzufrieden bleiben, Erfolge nur vorübergehend sein - mit diesem Wissen wird sich Ihnen ein völlig neues Weltbild auf-tun, werden Dinge für Sie möglich, die Sie heute noch für ein Wunder halten.**

**Schreiben Sie: „Bitte um Zusendung der Infobroschüre“ (kostenlos, unverbindlich).**

## Aquila-Verlag

Westerbachstraße 23 · 6242 Kronberg  
Tel. 06173/2011 · Telex 415662 nav

Auf Postkarte aufkleben oder in Umschlag stecken



**„Bitte um  
Zusendung der  
Infobroschüre“**

(kostenlos,  
unverbindlich)

Bitte mit  
60 Pfg.  
freimachen,  
falls Marke  
zur Hand

Name \_\_\_\_\_  
Vorname \_\_\_\_\_  
Straße \_\_\_\_\_  
Ort \_\_\_\_\_

geo

**Aquila-Verlag  
Westerbachstraße 23**

**6242 Kronberg**



**D**er Horror kam auf leisen Pfoten. „Wir hatten einen großen, streunenden, halbwildten Kater bei uns aufgenommen“, erzählte der Patient hinterher. „Ich beobachtete oft, wie er die Vögel im Gras hypnotisierte und sie nicht mehr entkommen konnten. Ich spürte, wie das Tier mein Vertrauter wurde und glaubte, ich könne seine Bewegungen steuern und mit seinen Augen sehen.“

An das, was dann geschah, erinnert Helmut Horn\* sich in allen Details: „Eines Nachts konnte der Kater nirgends gefunden werden. Kurz nachdem ich zu Bett gegangen war, hatte ich einen Alptraum. Ich saß in einem Eisenkäfig und schaute mit den Augen der Katze. Ein Mann riß der Katze mit einer Drahtzange langsam die Krallen einzeln aus. Ich wachte schreiend auf und sah einen riesenhaften, grotesken Katzenkopf am Fenster. Ich ergriff den nächsten schweren Gegenstand, einen Radioapparat, und warf ihn durch das geschlossene Fenster.“ Der Wurf brachte Horn in ein psychiatrisches Krankenhaus – zum viertenmal in 23 Jahren. Anhand der Vorgeschichte wurde der Alptraum identifiziert – als „Schizophrenie“.

Horns Schilderung läßt ahnen, was in einem Menschen vorgeht, der nicht mehr zwischen innerer und äußerer Wirklichkeit unterscheiden kann. Bei Angehörigen und Ärzten löst jene seltsame Krankheit des Geistes quälende Fragen aus: Woher kommen solche Halluzinationen und Wahnideen? Und was heißt überhaupt „Schizophrenie“?

Eine allgemeingültige Erklärung für das „Spaltungsirresein“ ist jedoch nicht zu erhalten. Nicki Erlenmeyer-

Kimling, eine renommierte amerikanische Schizophrenie-Forscherin, schildert mir „das Problem“ ihrer Zunft: „Was auch immer eine Arbeitsgruppe herausfindet, wird bestimmt von irgendeiner anderen widerlegt. Es gibt einfach so viele Widersprüche.“ Die temperamentvolle Psychiatrie-Professorin der New Yorker Columbia University schwankt zwischen Hoffnung und Resignation. „Manchmal fühle ich mich ganz optimistisch, und dann denke ich, wir machen große Schritte vorwärts, manchmal aber . . .“

Noch ist nicht einmal klar, ob es die Schizophrenie überhaupt gibt. Womöglich verbergen sich dahinter viele unterschiedliche Krankheiten. Immerhin gelangen Forschern in den letzten Jahren aufregende Einblicke in die Geheimnisse der Schizophrenie – auch Erkenntnisse, die Lichtblicke für Patienten verheißen.

Wenn einem Menschen das Ich zerbricht, leidet er nicht nur unter Wahnideen, Halluzinationen und den ganz realen Anfeindungen der Umwelt. Oft kommt es zu tiefgreifenden Veränderungen: Die Patienten können nicht mehr klar und folgerichtig denken, verbergen zusehends ihre Gefühle, schränken ihr

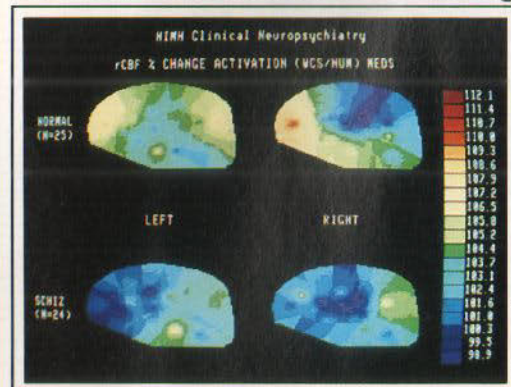
soziales Leben ein und verlieren schließlich jeden Bezug zur Realität. Psychiater nennen diese Veränderungen „negative Symptome“.

Ungefähr einer von hundert Menschen wird im Laufe seines Lebens schizophren. Das Risiko, Opfer dieser Krankheit zu werden, scheint überall auf der Erde, in allen Kulturkreisen gleich groß zu sein. Zu diesem Ergebnis kam im Sommer 1986 eine Studie der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Und nicht nur über alle Kontinente und Kulturen, sogar über Generationen hinweg scheinen Schizophrenien gleichmäßig verteilt zu sein.

„Dafür“, so Heinz Häfner, WHO-Berater und Direktor des Zentralinstituts für Seelische Gesundheit in Mannheim, „gibt es eigentlich kein Beispiel. Alle anderen Krankheiten sind ungleich über die Welt verteilt.“

Ein Grund für Häfner, über die Ursachen der Schizophrenie nachzudenken: „Wenn ein Leiden über Zeit und Kulturen so gleichmäßig verteilt ist, dann ist es sehr unwahrscheinlich, daß es durch kulturelle und soziale Einflüsse verursacht wird.“ Denn beide variieren sehr stark von Land zu Land und Zeit zu Zeit. Aus dem gleichen Grund scheiden wohl auch Bakterien und Vi-

## Krankes Denken sichtbar gemacht



Wenn ein Gesunder denkt, sind beide Hirnhälften gut durchblutet (oben, von der Seite gesehen). Im linken vorderen Stirnlappen eines Schizophrenen verrät das Blau eine viel schwächere Durchblutung. Die Stirn liegt links auf diesen Bildern – aufgenommen mit einem neuartigen Diagnosegerät

\* Name von der Redaktion geändert. Aus: „Die andere Seite der Schizophrenie“, Herausgegeben von Heinz Katsching.



# Wenn das Ich zerbricht

Meist beginnt es im frühen Erwachsenenalter: Stimmen im Kopf verkünden Entsetzliches, Harmloses erscheint in bedrohlicher Gestalt, Realität löst sich auf in alptraumhaften Visionen. Und hinter der Diagnose Schizophrenie verbirgt sich Ratlosigkeit. Denn vielleicht umfaßt dieses Krankheitsbild ein ganzes Bündel psychischer Defekte, deren Ursachen noch niemand kennt. Immerhin legen neue Studien jetzt nahe, daß eine Heilung möglich ist

**SCHIZOPHRENIE**





ren als Ursache aus, obwohl einige britische Forschergruppen die Hypothese favorisieren, Schizophrenien seien Infektionskrankheiten. Heinz Häfner hält es ohnehin für „viel wahrscheinlicher, daß es mehrere Ursachen gibt, die in der Summe etwas bewirken“.

Was aber sind dann Schizophrenien, wenn sie nicht zu den „eigentlichen“ Krankheiten zählen? Einige Forscher wännen sich einer Antwort ziemlich nahe. Ihr Optimismus basiert auf der Entdeckung feinsten anatomischer Veränderungen im Gehirn schizophrener Menschen:

- Pathologen fanden eine Reihe unauffälliger Unterschiede. So scheinen Patienten im vorderen Bereich der Hirnrinde, im „präfrontalen Cortex“ gleich hinter der Stirn, etwas weniger Nervenzellen zu besitzen als gesunde Menschen.

- Der Blick in lebende Gehirne mit Hilfe der Computertomographie (CT) und der PET-Technik deckte ebenfalls feine Unterschiede zwischen Gesunden und Kranken auf. CT-Bilder enthüllten, daß bei Schizophrenie-Patienten eine der mit Flüssigkeit gefüllten Hirnkammern – der „dritte Ventrikel“ – leicht vergrößert ist.

Psychiater wie Daniel Weinberger vom „National Institute of Mental Health“ in Bethesda (Maryland) fassen solche Befunde mit dem Begriff vom „negativen Raum“ im Gehirn Schizophrener zusammen: „Das heißt, daß sich etwas Positives, nämlich Nervengewebe, entweder nie entwickelt hat oder aber verlorengegangen ist.“

Die Abweichungen sind außerordentlich subtil. Aus einer einzigen CT-Aufnahme ließe sich niemals ablesen, ob sie von einem Schizophrenen oder einem Gesunden stammt. Erst wenn man eine Gruppe von Schizophrenie-Patienten mit einer gesunden Gruppe vergleicht, wird der Unterschied deutlich.

Über neun Jahre hinweg hatte Weinbergers Team eine Gruppe von schizophrenen Patienten immer wieder gründlich untersucht. Die

kürzlich abgeschlossene Studie ergab ein für die Kranken und ihre Angehörigen eher beruhigendes Resultat: Die Veränderungen im Gehirn verschlimmern sich nicht.

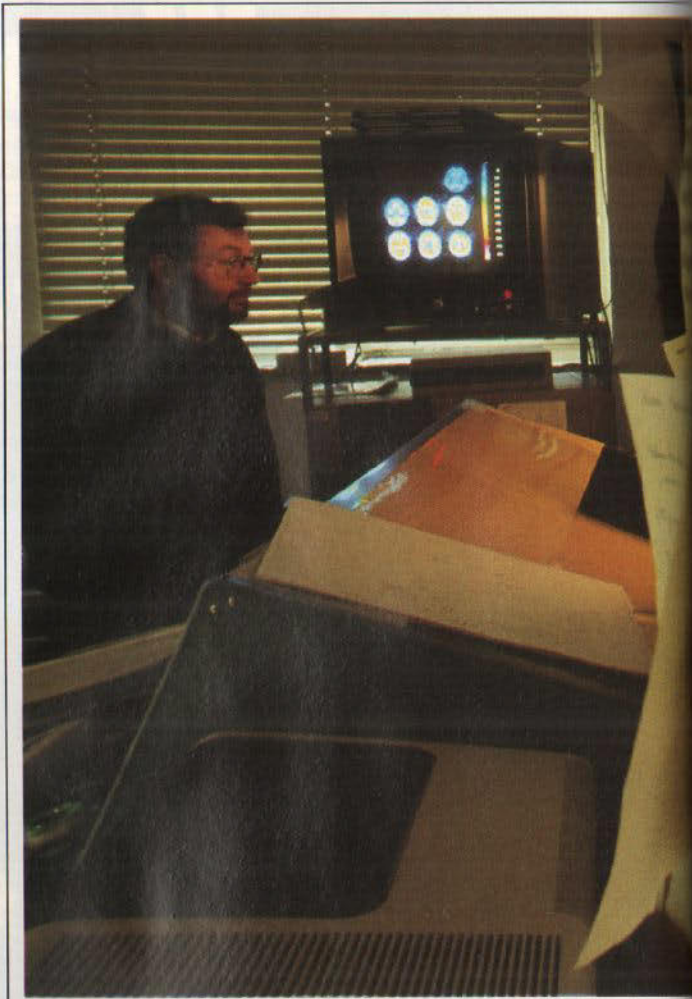
Weinberger sieht eine Verbindung zwischen dem Ergebnis seiner Studie und dem, was er „eines der großen Rätsel schizophrener Erkrankungen“

### **Haben Schizophrene weniger Nervenzellen hinter der Stirn?**

gen“ nennt: deren plötzlichen Beginn im frühen Erwachsenenalter. Bei ihrem ersten schizophrenen Schub sind die meisten Patienten kaum älter als 20 Jahre. Diese „wichtige Tatsache“ interpretiert Weinberger als eine Entwicklungsstörung des Gehirns. Bei schizophrenen Menschen könnte ein bestimmter Teil des Gehirns, der sich erst sehr spät entwickelt, verändert oder verletzt sein.

„Und nun trifft es sich, daß gerade ein für das menschliche Verhalten sehr wichtiger Teil des Gehirns ungefähr im frühen Erwachsenenalter ausreift, nämlich der dorsolaterale präfrontale Cortex“ – ein Teil jenes Frontallappens der Hirnrinde, der bei Schizophrenen etwas weniger Zellen als normal aufweist und durch einen verminderten Eiweiß-Stoffwechsel auffällt. „Das ist der Teil des Gehirns, der sich im Lauf der Evolution am meisten weiterentwickelt hat. Er ist der menschlichste Teil des Gehirns.“

Der präfrontale Cortex ist an vielen kognitiven – „erkennenden“ – Leistungen unseres Denkgorgans beteiligt. Er wird aktiv, wenn wir Pläne für die Zukunft entwickeln, wenn wir mit belastenden Situationen fertig werden müssen, wenn wir aus Erfahrungen lernen. In ihm ist der Umbau der Nervenverbindungen auch nach der Pubertät noch nicht abgeschlossen. Danach, bis zum zwanzigsten Lebensjahr etwa, kommt es zu einer



**Ein Blick ins Hirn enthüllt, weshalb**

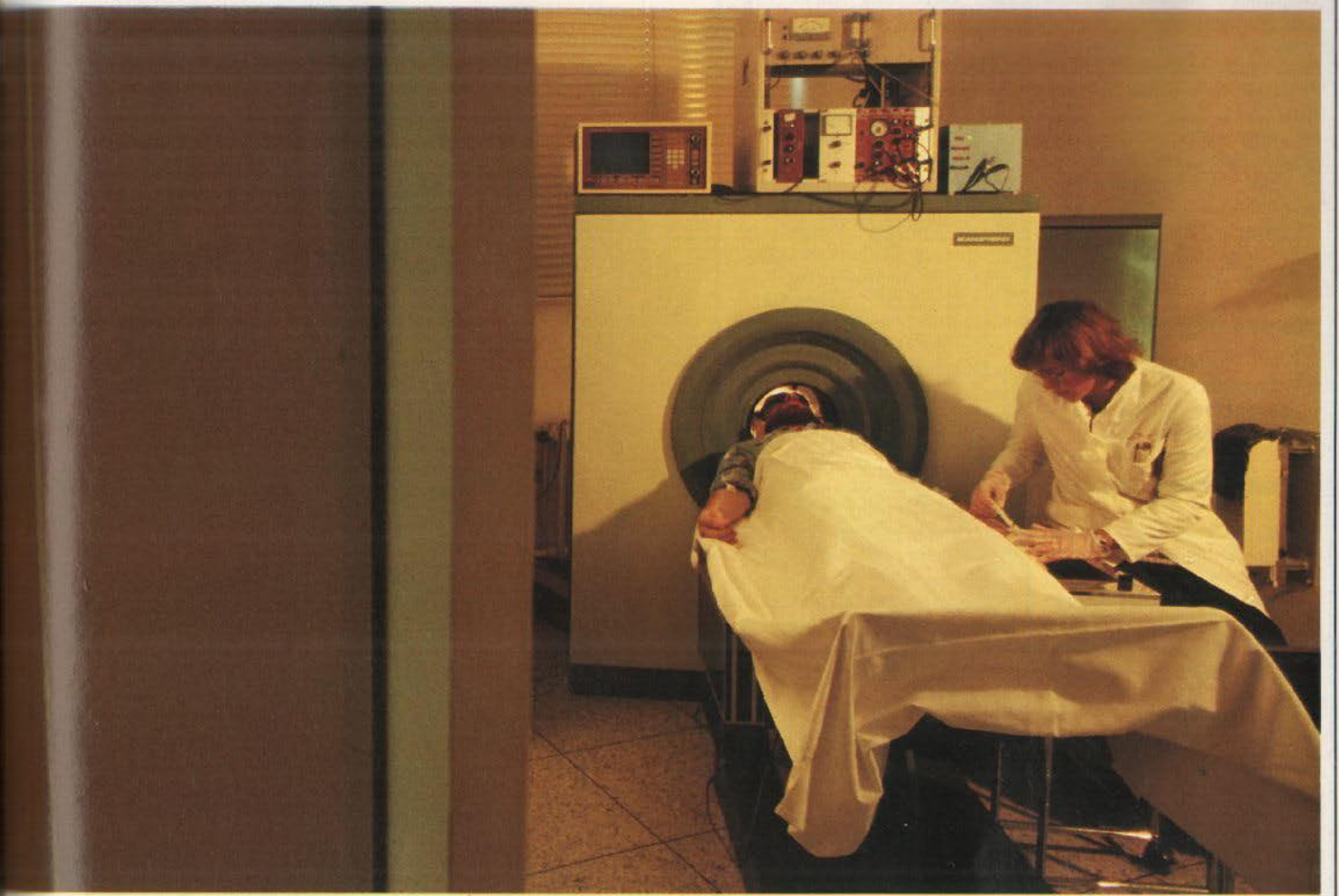
auffälligen Veränderung: Die Zahl der Synapsen – der Kontaktstellen zwischen den Nervenzellen – geht drastisch zurück. Offenbar bilden sich erst zu diesem Zeitpunkt die endgültigen Verbindungen im Nervennetzwerk des Frontallappens aus.

Eine andere heiße Spur der Schizophrenie-Forschung zielt auf die Synapsen. An vielen dieser Kontaktstellen ist ein chemischer Botenstoff aktiv, den Wissenschaftler schon lange als Mitspieler im Drama der Schizophrenie verdächtigen: Dopamin. In den sechziger Jahren hatte der schwedische Psychopharmakologe Arvid Carlsson vermutet, schizophrene Erkrankungen könnten auf einer ge-

steigerten Aktivität jener Nervenzellen beruhen, die Dopamin als Botenstoff benutzen. Der Verdacht lag nahe, daß diese Nervenzellen in den Gehirnen schizophrener Patienten zu viele Rezeptoren – „Empfangsstationen“ – für Dopamin besitzen. Inzwischen wurde die Sache durch PET-Untersuchungen an lebenden Patienten entschieden: Schizophrene besitzen tatsächlich von Beginn der Krankheit an mehr Dopamin-Rezeptoren als Gesunde.

Die Spur des Botenstoffs führt auch zum „Limbischen System“, einem entwicklungsgeschichtlich älteren Hirnteil mit zentralem Einfluß auf unser Gefühlsleben und unser Gedächtnis. Vom





## Schizophrene Probleme mit dem Denken haben

Limbischen System aus unterhalten Nervenzellen, die mit Dopamin arbeiten, Beziehung zur vorderen Hirnrinde. Und eben diese Kontakte könnten bei schizophrenen Menschen gestört sein.

Daniel Weinberger nimmt an, daß der präfrontale Cortex deshalb zu geringe Kapazitäten für schwierige intellektuelle Aufgaben und belastende Lebenssituationen besitzt. Der Psychiater hatte gesunde und kranke Versuchspersonen gebeten, verschiedene logische Aufgaben zu lösen. Während die Prüflinge nachdachten, registrierte ein der PET-Technik verwandtes Gerät die Durchblutung ihrer vorderen Hirnrinde. Resultat: Bei allen gesunden Pro-

banden wurde während des Grübelns der präfrontale Cortex deutlich stärker als bei den schizophrenen Versuchspersonen durchblutet. Aber auch bei den Kranken war die Durchblutung der vorderen Hirnrinde um so stärker, je besser sie mit den Testaufgaben zurechtkamen (siehe Foto Seite 90).

All die neuen Befunde veraten jedoch noch nichts über die eigentlichen Ursachen der Schizophrenie. Nur soviel scheint sicher zu sein: Die Gene spielen eine wichtige Rolle. Menschen mit einem schizophrenen Elternteil sind etwa zehnmal mehr gefährdet, selbst an Schizophrenie zu erkranken, als der Nachwuchs „unbelasteter“ Familien.

Zwischen den Hirnen gesunder und schizophrener Menschen gibt es funk-

**tionelle Unterschiede: Die für schwierige intellektuelle Aufgaben wichtigen Frontallappen der Großhirnrinde weisen bei den Kranken deutlich verringerte Stoffwechselaktivität auf. Ermöglicht wird der Blick ins denkende Hirn ohne chirurgische Eingriffe durch die »PET-Technik« (siehe Seite 162). Im Kölner Max-Planck-Institut für neurologische Forschung liegt ein Freiwilliger mit dem Kopf in der Öffnung des PET-Gerätes. Der Monitor im Nebenraum zeigt Schnittbilder des Gehirns**

Noch deutlicher wird die erbliche Komponente bei eineiigen Zwillingen. Ob der Defekt allerdings auf ein einziges oder viele Gene zurückgeht, ist strittig; die „Ein-Gen-Theorie“ halten zumindest die Epidemiologen für sehr unwahrscheinlich.

Nikki Erlenmeyer-Kimling sieht derzeit wenig Chancen, genetische Ursachen schizophrener Erkrankungen exakter zu belegen. Sie konzentriert sich mittlerweile auf eine andere Frage: Warum werden manche Menschen mit einer höheren Anfälligkeit für Schizophrenie krank, andere aber nicht?

Vor 16 Jahren hat Erlenmeyer-Kimling gemeinsam mit Kollegen das „New York



Hochrisiko-Projekt“ gegründet. Seitdem verfolgt sie das Schicksal von Kindern, die mit einem besonders hohen Schizophrenie-Risiko leben – Kindern schizophrener Mütter oder Väter. Nach vorliegenden Statistiken werden etwa zehn bis 16 Prozent von ihnen an einer Schizophrenie erkranken. Für 50 bis 80 Prozent prognostiziert die Statistik ein „normales“ Leben.

**»Nicht  
fordern, sondern  
stützen«, heißt das  
Rezept für eine  
Therapie**

Die übrigen müssen mit anderen „psychiatrischen Auffälligkeiten“ rechnen.

Die Mitarbeiter des „Hochrisiko-Projekts“ besuchen die Kinder zu Hause, fragen nach Freundschaften, nach Problemen und Erfolgen in der Schule. Alle zwei bis drei Jahre bitten die Forscher ihre Schützlinge ins Labor und untersuchen sie nach auffälligen Veränderungen – etwa in den per EEG gemessenen Hirnströmen. Auch die Aufmerksamkeitsleistungen und kognitiven Fähigkeiten werden dabei geprüft.

Bei solchen Tests fiel auf, daß bestimmte Hochrisiko-Kinder unter einer globalen Aufmerksamkeitsstörung zu leiden scheinen. Sie machen auffällig mehr Fehler als ihre Altersgenossen, und sie machen ihre Fehler „zufällig“ – bei einfachen wie bei schweren Aufgaben, zu Beginn ebenso wie gegen Ende eines Experiments.

„Wir haben einige Ideen, wie man Kindern schon sehr frühzeitig beibringen könnte, mit ihrer Aufmerksamkeit richtig umzugehen“, sagt Nikki Erlenmeyer-Kimling. „Das allein könnte schon etwas nützen, könnte das Leben für die Kinder einfacher machen.“

Noch wissen die New Yorker Schizophrenie-Detektive allerdings nicht, ob die besonders auffälligen Kinder später tatsächlich schizophren werden. „Wir prüfen jetzt, in wel-

cher Beziehung solche Probleme in der späten Pubertät zur Schizophrenie stehen.“ Doch schon heute müssen die Forscher erleben, wie immer mehr ihrer Schützlinge krank und in psychiatrische Kliniken eingeliefert werden.

„Das ist schrecklich, schrecklich“, klagt Erlenmeyer-Kimling. „Jeder, der an diesem Projekt mitarbeitet, hat ja ein Gefühl für diese Familien, diese Kinder entwickelt.“ Offenbar reicht die bisherige Unterstützung der gefährdeten Familien nicht aus, um Schizophrenie zu verhindern.

Nikki Erlenmeyer-Kimlings Schützlinge wachsen in Familien auf, die wesentlich von der Schizophrenie eines Elternteils geprägt sind, wo Erbanlagen und die spezielle häusliche Situation einen großen Einfluß auf eine mögliche Erkrankung der Kinder haben können. Allerdings: Nur etwa jeder zehnte schizophrene Patient entstammt einer Familie, in der Vater oder Mutter an Psychosen leiden. Schizophrenie-Forscher können also ihre Untersuchungen nicht auf Kinder kranker Eltern beschränken, wenn sie die Einflüsse der Umwelt bei der Entstehung der Geisteskrankheit aufspüren wollen.

Erlenmeyer-Kimlings Kollege Bruce Dohrenwend will deshalb mehr über das Leben bereits erkrankter Menschen vor ihrem ersten schizophrenen Schub wissen. Er befragte 65 Kranke ausführlich nach belastenden Lebensereignissen, nach sozialen Kontakten, Berufsleben und häuslichen Bedingungen. Ihre Antworten verglich er mit den Angaben von „normalen“ Menschen aus vergleichbaren Verhältnissen sowie von Patienten mit Depressionen.

„Ich kann eigentlich keine Faustregel aufstellen“, bekennt Dohrenwend leise. „Es gibt zu diesen Fragen wirklich nur eine Handvoll Untersuchungen, und die meisten sind nicht gut. Wir können da also noch sehr viel lernen.“ Er fand bisher weder auffällige psychische noch soziale Risikofaktoren für schizophrene Erkrankungen. Die 65



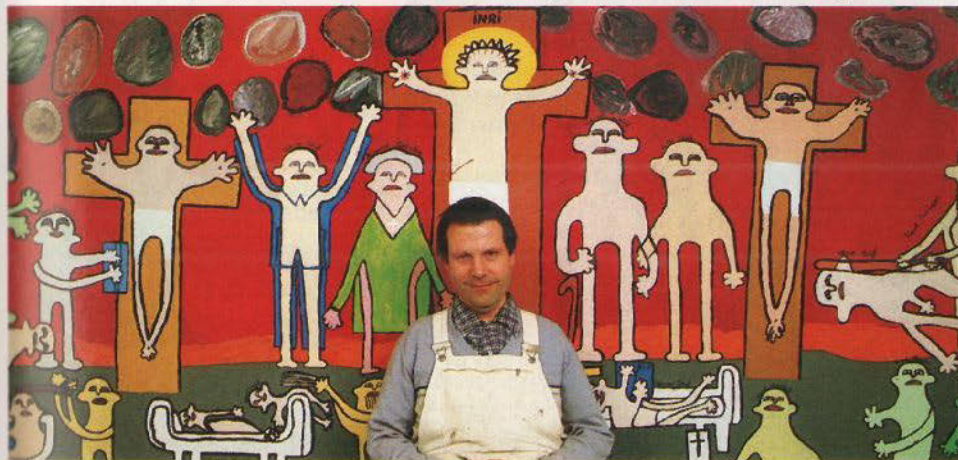
**Der Trost der**







## Kunst für psychisch Kranke: sprachlos eine Sprache finden



Schöpferische Kraft zeichnet die Kunstwerke der Hamburger Gruppe »Die Schlumper« aus. Ihre Mitglieder, darunter auch Schizophrene, leben als »geisteskrank« oder »geistig behindert« überwiegend in einer Anstalt. Arbeiten »Geisteskranker« vermitteln, mit den Worten des Nervenarztes Hans Prinzhorn, einen »Hauch von jener Einfalt, die uns still macht«. Erfolge auf dem Kunstmarkt sind nur ein Teil des Lohns. Der andere: das Erlebnis der gemeinsamen Arbeit in der Gruppe und die Entfaltung inneren Reichtums



befragten Patienten hatten vor Ausbruch der Krankheit nicht mehr Schicksalsschläge erlitten als „normale“ Menschen – anders als zum Beispiel depressive Patienten (siehe Kasten unten). Zwar hatten die Schizophrenen im Jahr vor ihrem ersten Schub in einem außerordentlich schwachen sozialen Netzwerk gelebt.

Aber war dieser Mangel an tragfähigen mitmenschlichen Kontakten der Auslöser oder schon die Folge der sich anbahnenden Krankheit? Einen möglichen Risikofaktor glaubt Dohrenwend immerhin gefunden zu haben: Auffällig viele Schizophrenie scheinen jahrelang in Berufen mit hohem gesundheitlichen Risiko gearbeitet zu haben.

Eine gute Nachricht gibt es wenigstens für Schizophrenie: Ihre Heilungsprognose ist viel günstiger, als bis vor kurzem vermutet wurde. Manche Wissenschaftler schätzen, daß mehr als die Hälfte der Kranken wieder völlig oder zumindest in erheblichem Maße gesunden. Denn der Verlauf der Schizophrenie hängt wesentlich vom sozialen Umfeld der

Patienten ab. Zwar erkranken, wie die WHO-Studie belegt, Menschen in allen Kulturkreisen ähnlich häufig an Schizophrenie, aber dann verläuft die Krankheit sehr unterschiedlich. In Dänemark zum Beispiel erleiden 94 Prozent der Kranken mehr als einen Schub, in Nigeria nur 42 Prozent. „Wo ein schizophrener Patient in einem großen Familiennetzwerk mit eher unterstützender und weniger fordernder Atmosphäre leben kann, sind seine Chancen zu gesunden viel größer“, bemerkt der WHO-Epidemiologe Assen Jablensky.

Das Rezept „Nicht fordern, sondern stützen“ bekräftigen auch Untersuchungen der britischen Psychiater Christine Vaughn und Julian Leff. Demnach beträgt die Rückfallquote von Patienten, die in Familien mit „ungünstigem“ Verhalten leben, mehr als 90 Prozent. Mit Hilfe von Medikamenten gelingt es zwar, die Quote auf gut 50 Prozent zu senken. Verhalten sich aber die Familien „richtig“, erleiden nur noch 15 Prozent jener Patienten, die nicht ständig Medikamente einnehmen, einen weiteren Schub; bei Schizophrenen unter Dauermedikation sinkt hier die Rückfallquote sogar auf 12 Prozent.

Die beiden britischen Forscher stufen „richtiges“ oder „falsches“ Verhalten nach den negativen Gefühlen ein, welche die Angehörigen dem Wiedergenesenen entgegenbringen. Darunter fallen nicht nur Feindseligkeiten, abfällige Bemerkungen und dominierendes Verhalten, sondern auch übermäßiges emotionales Engagement. Je mehr sich Eltern und Partner vor derartigen Reaktionen hüten, desto besser sind die Chancen der Schizophrenen, für eine dauerhafte Heilung.

Daniel Weinberger drückt die Maxime „Nicht überfordern, nicht unterfordern“ auf seine Art aus: „Schizophrene Patienten brauchen jemanden, der ihren Tag, ihre Umgebung, ihre Beziehungen für sie strukturiert. Sie brauchen sozusagen einen Ersatz für ihren präfrontalen Cortex.“ □

## Angst, Depressionen und Psychosen

**P**sychische Krankheiten sind so unterschiedlich voneinander wie die Menschen, die unter ihnen leiden und deren Lebensbedingungen. Das betonte schon 1845 der Irrenarzt Wilhelm Griesinger: „Nirgends ist das Bedürfnis strengen Individualisierens größer, als bei der Irrenbehandlung.“ Daher stößt auch jeder Versuch auf Schwierigkeiten, psychische Krankheiten klar gegeneinander abzugrenzen oder sichere Diagnosekriterien zu definieren.

Als Psychotiker gelten Menschen, die den Kontakt zur Realität verloren haben. Die Psychiatrie kennt endogene – von innen kommende – und exogene Psychosen. Letztere können durch äußere Einflüsse, etwa eine Hirnverletzung, verursacht werden. Bei den endogenen Psychosen unterscheiden die Ärzte zwischen affektiven – zu denen die Manie und verschiedene Formen depressiver Erkrankungen gehören – und schizophrenen Psychosen. Bis heute ist umstritten, ob Depression und Schizophrenie wirklich zwei unterschiedlichen Krankheitsgruppen angehören: Jede vierte Frau und jeder zehnte Mann wird mindestens einmal im Leben depressiv; die Zahl der Patienten nimmt zu. Depressive fühlen sich wie versteinert und leer. Viele betrachten diese Gemütsverfassung als Folge eigenen Verschuldens. Häufig verspüren sie sogar den Drang, sich das Leben zu nehmen. Dabei können Depressionen durchaus organische Ursprünge haben. Oft wechseln sich depressive Phasen mit manischen Perioden ab, in denen die Patienten in Höchststimmung und unermüdetlich betriebsam sind.

Die Veranlagung zu manisch-depressiven Erkrankungen ist teilweise genetisch programmiert. Das legen Untersuchungen an eineiigen Zwillingen nahe: Ist eines der Geschwister manisch-depressiv, dann ist in acht von zehn Fällen auch das andere krank. Molekularbiologen versuchen jetzt, diesem Vererbungsmechanismus auf die Spur zu kommen. Einer amerikanischen Forschergruppe ist es kürzlich gelungen, bei einer vorbelasteten Familie die ungefähre Lage eines „Depressions-Gens“ zu bestimmen: Es liegt auf dem Chromosom Nr. 11. Zwei andere Teams konnten das Ergebnis bei anderen Bevölkerungsgruppen allerdings nicht bestätigen. Womöglich gibt es unterschiedliche Depressions-Gene.

Bei den Depressionen spielen neben genetischen auch organische, psychische und soziale Faktoren eine Rolle, allerdings mit sehr unterschiedlichem Gewicht. Die „reaktiven Depressionen“ zum Beispiel, die zu den Neurosen zählen, werden häufig durch Verlusterlebnisse hervorgerufen. Sie lassen sich oft nicht klar von „normalen“ Trauerreaktionen abgrenzen.

Über die physiologischen und biochemischen Veränderungen, die sich während einer depressiven Erkrankung im Gehirn abspielen, gibt es nur Hypothesen. Lange Zeit wurden Depressionen mit einem Mangel an chemi-

schen Botenstoffen zwischen Nervenzellen – Serotonin, Dopamin und Noradrenalin – in Verbindung gebracht. Denn manche Medikamente, welche die Konzentration dieser Stoffe am Wirkungsort erhöhen, dämpfen auch Depressionen. Diese klassischen Antidepressiva wirken jedoch, wie mittlerweile bekannt wurde, an ganz unterschiedlichen Stellen im Gehirn. Neuentdeckte depressionsmindernde Medikamente greifen offenbar nicht direkt in den Stoffwechsel der „verdächtigen“ Transmitter ein. Möglicherweise ist, so vermutet die Basler Psychopharmakologin Alexandra Delini-Stula, das Zusammenspiel ganz unterschiedlicher Transmittersysteme im Gehirn gestört.

Bei der Behandlung von Depressionen gibt es einen Lichtblick: Den vorläufigen Ergebnissen einer amerikanischen Langzeitstudie zufolge lassen sich Depressionen mit geeigneten Psychotherapien nicht minder wirksam behandeln wie mit Medikamenten.

Nun zeichnet sich jedoch ein neuer Trend ab: Neben depressiven Erkrankungen gewinnen zunehmend Angstkrankheiten wie etwa Panik-Attacken oder Agoraphobien – die Angst vor großen Plätzen – an Bedeutung: In den USA werden sie heutzutage der Zahl nach nur noch von einem psychischen Problem übertroffen – vom Alkoholismus.



# Die "Neue große Brockhaus Enzyklopädie"

»Mensch, buddel das Ding wieder ein, ich habe keine Lust, die EVOLUTION DER VÖGEL für die "Neue große Brockhaus Enzyklopädie" noch einmal zu schreiben.«



Bei FA. BROCKHAUS ist Band 1 der neuen großen BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE\* in 24 Bänden erschienen.

- \* Das ist das große Lexikon dieses Jahrhunderts aus dem Traditions-Verlag. Es ist in Inhalt und Ausstattung weltweit unvergleichlich.
- \* Es ist das Nachschlagewerk für ein paar tausend Gleichgesinnte, die sich nicht davon abbringen lassen, daß das Beste die schönste Perspektive für die Zukunft ist.

## Einladung

**Machen Sie die Bekanntschaft mit diesem Jahrhundertwerk. Tragen Sie sich kostenlos und unverbindlich in die Subskriptionsliste für die neue große BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE ein.**

**Die Eintragung verpflichtet Sie nicht zum Kauf. Sie sichern sich**

**die folgenden Vorteile, die Ihnen hiermit von Bücher-Büchner, Bödekerstr. 13, 3000 Hannover 1, garantiert werden:**

- Die Anwartschaft auf den Subskriptionspreis und weitere Vergünstigungen.
- Band 1 schicken wir Ihnen auf unsere Kosten für 10 Tage zur Ansicht.
- Zusammen mit Band 1 erhalten Sie unser günstiges Subskriptionsangebot mit ausführlichen Informationen zum Werk und einem Vorzugsangebot mit DM 1.000,- Vorteilsgarantie für Erstbesteller.
- Die ersten Besteller erhalten jeweils ein von Herrn Brockhaus signiertes Ersttags-Exemplar des Werkes – **eine bibliophile Sammlerrarität, die sich Max Büchner für seine Firmengruppe exklusiv gesichert hat.**
- Ein Vertreter oder Berater wird Sie nicht besuchen.

## Subskriptions-Option

**JA,** bitte tragen Sie mich **kostenlos und unverbindlich** in die Subskriptionsliste für die neue große BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE ein.

Meine Anschrift:

Name

Vorname

Straße

PLZ/Ort

Tel.-Nr.

**Bitte gleich ausschneiden und einsenden an: Bücher-Büchner, Bödekerstraße 13, 3000 Hannover 1**



**A**m Anfang war es einfach, da konnte ich meinem Mann noch helfen. Ich knöpfte ihm die Jacke zu, weil seine Finger vergessen hatten, wie man Knöpfe knöpft. Später mußte ich die alltäglichsten Dinge für ihn tun. Wenn ich ihm abends nicht das Bett aufdeckte, legte er sich oben drauf. Das war vor sechs Jahren“, berichtet Anna Konrad\*.

Dieser Körper ohne Erinnerung, ohne Denkvermögen und ohne Sprache sitzt jetzt im Rollstuhl in einem Pflegeheim und wartet auf den Tod. Wie ein Kleinkind wird er gefüttert und gewandelt. Seine Augen strahlen, wenn er angesprochen wird, doch erkennt er weder seine Frau noch seine Kinder.

Was mit kaum bemerkenswerter Vergeßlichkeit beginnt, endet mit vollkommenem geistigem und körperlichem Verfall. Das Gehirn kann den Körper nicht mehr lenken. Dieser schleichende, unaufhaltsam fortschreitende Prozeß, gegen den es kein Mittel gibt und dessen Ursache niemand kennt, nennen die Ärzte Alzheimersche Krankheit.

In der Bundesrepublik Deutschland sterben derzeit einige hunderttausend Menschen diesen schleichenden Tod. Jedes Jahr kommen mehr als 50 000 Patienten dazu. Eine Krankheit, die noch vor wenigen Jahren sogar manchem Arzt unbekannt war, ist zum Schrecken des Alters geworden.

Obwohl die Krankheit im Prinzip keine Folge des Alters ist, werden meist betagte Menschen davon befallen. Daraus erklärt sich die Zunahme der Krankheit. Im Verhältnis zur Gesamtbevölkerung wächst die Zahl von Menschen an der Schwelle des Greisenalters – dank umfassender medizinischer Versorgung, verbesserter Hygie-

ne und guter Ernährung. Rund zehn Prozent aller Menschen über 65 Jahren leiden an der senilen Demenz – einer Hirnleistungsschwäche. Dabei handelt es sich in der Hälfte der Fälle um die Alzheimersche Krankheit.

Benannt ist diese Krankheit nach Alois Alzheimer, der 1906 über eine besondere Form des Schwachsinnss berichtete, die bei einer 51jährigen Frau mit ausgeprägter

**»Ich kann nicht mehr sprechen. Ich kann nicht sagen, was ich sagen will, ich bring's nicht raus«**

*Eine Alzheimer-Patientin*

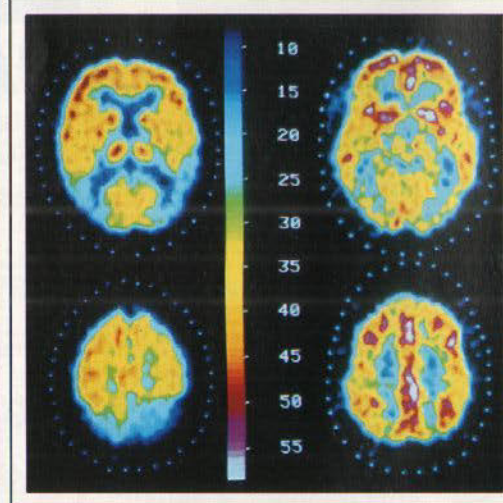
Schrumpfung des Gehirns einherging. Der Psychiater und Neurologe Emil Kraepelin nahm die Entdeckung unter dem Namen „Alzheimersche Krankheit“ in sein Lehrbuch auf. Aber ein halbes Jahrhundert nahmen die durch Sigmund Freud geprägten Psychiater-Generationen es praktisch nicht wahr, daß organische Veränderungen im Gehirn Geisteskrankhei-

ten bewirken können. Die Mehrzahl der Seelenärzte hielt sich lieber an eine psychodynamische Erklärung für den Schwachsinn, bei dem „der Wunsch des Unterbewußten nach Verjüngung zum Ausdruck kommt“, wie es in den dreißiger Jahren ein amerikanischer Forscher ausdrückte.

Rund 60 Jahre vergingen, bis Mediziner erkannten, daß zwischen der von Alzheimer entdeckten präsenilen – also vor dem Senium, dem Greisenalter, auftretenden – Demenz und dem häufigen, auf Abbau von Hirnsubstanz beruhenden Schwachsinn alter Menschen ein Zusammenhang besteht. Nun dämmerte den Ärzten, daß Demenz nicht die Konsequenz eines langen Lebens ist.

Schmerzlos und anfangs unbemerkt zerstört die Alzheimersche Krankheit die Nervenzellen des Gehirns. Auch bei Eduard Konrad dachte niemand an ein schweres Leiden, als er 1978 wegen eines Bandscheibenschadens mit 62 Jahren die technische Leitung des Familienbetriebes, einer graphischen Kunstanstalt, aufgab. Der durchtrainierte Mann war wenige

## Ein Dokument des Vergessens



Wie sehr »Morbus Alzheimer« Nervenzellen zerstört, können Ärzte mit Hilfe der »PET-Technik« beobachten. Die beiden linken Querschnitte stammen vom lebenden Gehirn eines Alzheimer-Patienten, die rechten von dem eines Gesunden. Die Stirnseite ist jeweils oben. Hirnregionen mit gebremster Stoffwechselaktivität sind blau markiert – bei Alzheimer-Kranken deutlich stärker

\* Der Name wurde geändert. Red.



# Wenn das Gehirn zerfällt

Erst sind da kaum merkliche Erinnerungsschwächen und ein paar Probleme bei der Orientierung. Dann aber geht, lange vor dem Greisenalter, zusehends das Gedächtnis verloren, und es kommt zu völligem geistigen und körperlichen Verfall: Die Alzheimer-Krankheit zerstört unaufhaltsam Gehirngewebe und damit die Persönlichkeit ihrer Opfer. Zwar scheinen Forscher jetzt endlich der Ursache des Leidens auf die Spur zu kommen, doch noch kann keine Therapie es aufhalten

**ALZHEIMER**





Jahre davor noch regelmäßig am Wochenende auf extremen Klettertouren in den Alpen unterwegs gewesen.

„Doch im nachhinein glaube ich, daß die Rückenschmerzen lediglich ein Vorwand waren“, sinniert Frau Konrad heute. „Die Krankheit muß unbemerkt bereits viele Jahre vor den ersten Anzeichen ihr Zerstörungswerk begonnen haben. Möglicherweise hat ihn damals schon die Arbeit überfordert.“

Frau Konrad arbeitete damals an der Seite ihres Mannes. Sie erinnert sich, daß es in den letzten Jahren vor seinem Ausscheiden 1978 häufig zu Reklamationen gekommen war. Chemische Reagenzien waren verwechselt worden und durch Falscheinstellung technischer Geräte Fehler aufgetreten. Nach dem Ausscheiden des Chefs gin-

gen die Reklamationen schlagartig zurück.

Ein unvollendetes Landschaftsbild gibt einen Hinweis darauf, daß die zerstörerische Krankheit tatsächlich viel früher einsetzte. Unvollendet steht seit 1974 Konrads letzte Alpenlandschaft auf der Staffelei. „Ich dachte mir damals, mein Mann ist einfach zu faul zum Weitermalen“, erinnert sich seine Frau. „Doch ich entsinne mich, daß er zuletzt an der dunkelgrünen Partie im linken unteren Eck irgendwie unsicher und ratlos heruminselte, wie es früher nicht seine Art war.“ Eduard Konrad ist heute unfähig, Auskunft darüber zu geben, was damals in ihm vorging, als er das Malen abbrach.

Von der Leere, die ihn wohl immer wieder überfiel, merkte niemand etwas. Wenn er beim Autofahren nicht

rechtzeitig abbog, dachte seine Frau, er sei bloß unkonzentriert. 1979 aber wußte er nicht einmal mehr, wo die Schalter von Scheibenwischer und Fernlicht liegen. 1980, auf einer Urlaubsreise, kam Eduard Konrad plötzlich nicht

**»Heute kann mein Mann gar nichts mehr allein tun. Er ist nur noch ein Körper ohne alles«**

*Frau eines Alzheimer-Kranken*

mehr mit der Einstellung seiner Filmkamera zurecht.

Zu Hause am Schneidetisch zerschnitt Herr Konrad zwar seine Urlaubsfilme, doch konnte er sie nie mehr zu einem sinnvollen Streifen zusammenkleben. Nachdem ihr

Mann sich sogar an seinem Heimatort verlaufen hatte, sprach Frau Konrad schließlich mit einer befreundeten Ärztin. Die riet zu einer neurologischen Untersuchung.

Die Röntgenbilder zeigten 1981 einen mittelgradigen Verlust an Gehirngewebe. Vergeßlichkeit und Orientierungslosigkeit nahmen weiter zu. Eduard Konrad, inzwischen 65 Jahre alt, fiel es immer schwerer, Zusammenhänge geistig zu verarbeiten. Dann bemerkte seine Frau, daß er Filmen im Fernsehen nicht mehr folgen konnte. Auch im Gespräch, bei etwas längeren Sätzen, kam er nicht mehr mit: Er hatte am Ende vergessen, was am Satzanfang gesagt worden war.

Dennoch unternahmen die Konrads noch immer große Reisen. Sie fuhren stets mit einer Reisegruppe, deren Mitglieder Herrn Konrads Hilflosigkeit kannten und aufpaßten, daß er sich nicht verließ. Aber nach jeder Reise in ein unbekanntes Land vergrößerte sich der Verlust an Orientierung und Zeitgefühl rascher als in der gewohnten Umgebung zu Hause. Der Alzheimer-Kranke fühlte sich am sichersten in einem überschaubaren und einfachen Tagesablauf in seiner vertrauten Umgebung.

1984 tauchten Schwierigkeiten beim Sprechen auf: Konrad konnte bestimmte Wörter nicht mehr richtig aussprechen. Dem dadurch wortkarg gewordenen Mann kam allmählich jeglicher Antrieb abhanden. Nun wies auch das Gehirnstrombild – das EEG – auf Anzeichen eines geistigen Verfalls hin: Die sogenannten Thetawellen wurden häufiger und verdrängten den bei gesunden Menschen üblichen Alpha-Rhythmus der Gehirnströme.

1985 wußte Konrad nicht einmal mehr, wozu das Eßbesteck taugt und brauchte Hilfe auf der Toilette. Auch die Erinnerung an lange zurückliegende Ereignisse ging nun merklich verloren: Er vergaß, wann er geboren worden war. Seine Frau wurde zu seiner einzigen Orientierung; er folgt ihr auf Schritt und Tritt.

## In besten Mannesjahren zum hilflosen Greis



Der Unternehmer Eduard Konrad war ein lebenslustiger, sportlicher Mann. In seiner Freizeit malte der Hobby-Bergsteiger vor allem Alpenmotive. Zunächst fiel es seiner Familie gar nicht auf, daß er 1974 ein Bild nicht vollendete. Doch dann häuften

sich Vergeßlichkeiten. Seine Handschrift zerfiel mit seiner Persönlichkeit: Die Portraits dokumentieren den Verfall des Alzheimer-Patienten Konrad von 1983 – mittleres Foto – bis Herbst 1986, als er im Park eines Pflegeheims saß





Alzheimer-Patienten brauchen ruhige und einfach gehaltene Anweisungen, die sie trotz ihrer verminderten Hirnleistung verstehen können. Deshalb ähnelt ihr »Tagesplan« im Rheinischen Landeskrankenhaus zu Köln dem Programm eines Kinderhorts. Die Erinnerung »Brote, bitte schmieren« gilt dem Pflegepersonal, das auch bei so simplen Tätigkeiten helfen muß. In diesem »Zentrum für Beschäftigungstherapie« versuchen die Betreuer, die Kranken aktiv zu halten. Denn Hobbys, Gespräche oder Handarbeiten können den Verlauf des Leidens zwar nicht stoppen, aber bremsen. Und liebevolle Zuwendung nehmen die Patienten immer noch und dankbar wahr

TAGE PLAN					
8 <sup>30</sup>		Frühstück	12 <sup>00</sup>		Mittagessen
9 <sup>15</sup>		BT	12 <sup>45</sup>		Mittagspause
10 <sup>00</sup>		Visite	14 <sup>30</sup>		Kaffee trinken
10 <sup>00</sup>		Visite	15 <sup>30</sup>		Abendessen
12 <sup>00</sup>		Spaziergang	18 <sup>00</sup>		
11 <sup>00</sup>			18 <sup>45</sup>		

AKZENTUELLVERGROßERUNG  
EINPFLUGUNG FÜR SEZESSION

AKZENTUELLVERGROßERUNG  
EINPFLUGUNG FÜR SEZESSION

Es heißt

Brot, bitte schmieren!

## Händchenhalten macht auch sie noch glücklich

In dieser zweiten und vorletzten Krankheitsphase ihres Mannes fand Frau Konrad Hilfe in der 1985 geschaffenen „Sprechstunde für Alzheimer-Kranke und ihre Angehörigen“ der Psychiatrischen Klinik Rechts der Isar der Technischen Universität München. Dort lernte sie mit ihrem kranken Mann so umzugehen, wie es der verminderten Hirnleistung entspricht – ruhig, bestimmt und mit einfach gehaltenen, klaren Anweisungen. Überdies erfuhr sie, daß Alzheimer-Kranke besonders bedürftig sind für menschliche Wärme und Nähe, denn dieses Re-

pertoire sozialer Verhaltensweisen bleibt bei ihnen am längsten erhalten. Händchenhalten ist tatsächlich das letzte Glück dieser Menschen, das

**»Ich ärgere mich, weil alles weg ist, warum ich von allem so weggekommen bin«**

Eine Alzheimer-Patientin

sie mit vollem Bewußtsein erleben können.

Die Alzheimersche Krankheit befällt nicht das gesamte Gehirn. Betroffen sind die

seitlich am Hinterkopf gelegenen Bereiche der Großhirnrinde, in denen Sehen, Hören und Fühlen zu größeren Handlungsbereichen verknüpft werden. Gefährdet ist auch der Schläfenbereich, wo sich Sprach-, Musik- und Rechenfähigkeit vernetzen. Das Leiden greift außerdem Teile des limbischen Systems an. In dieser stammesgeschichtlich ältesten Region des Großhirns fallen vor allem Teile des sogenannten Hippokampus aus, die offenbar an Erinnerung und Merkfähigkeit im Kurzzeitgedächtnis entscheidend beteiligt sind. „Bevorzugt in diesen

Hirnbereichen treten je nach Ausmaß der Demenz die für die Alzheimersche Krankheit typischen Veränderungen gehäuft auf“, erklärt der erfahrene Münchner Neuropathologe Professor Parviz Mehraein:

- Viele Nervenzellen sind angefüllt mit spiraligen Fasern, sogenannten neurofibrillären Bündeln.
- Der Dendritenbaum der Nervenzellen verliert seine reichen Verzweigungen; damit schrumpft die Zahl der Signaleingänge von anderen Nervenzellen.
- Nervenzellen sterben ab, wodurch das Gehirn im fort-



geschrittenen Stadium der Krankheit schrumpft.

● Im Gehirngewebe bleiben Reste abgestorbener Nervenzellen als „senile Plaques“ liegen.

Diese Veränderungen lassen sich leider erst nach dem Tode in der Autopsie feststellen. Zu Lebzeiten des Kranken ist der behandelnde Arzt, meist ein Psychiater, auf eine indirekte Diagnose im Ausschlußverfahren angewiesen. Erst müssen alle Krankheitsursachen, die andere Demenzformen verursachen, ausgeschlossen sein, etwa wiederholte Schlaganfälle, Hirntumoren, eine Schilddrüsenerkrankung oder Infektionen. Dann bleibt die häufigste Demenz, die Alzheimersche Krankheit, übrig. Dieses Ausschlußverfahren ist ziemlich treffsicher: In 80 Prozent der Fälle bestätigt die Autopsie diese Diagnose.

Seit kurzem verfügen Ärzte auch über eine direkte Nachweismethode für die Alzheimersche Krankheit, ermöglicht durch eine der modernsten bildgebenden Techniken, die Positronen-Emissions-Tomographie. Mit der PET-Technik können Neurologen aktive und geschädigte Gehirnbereiche als farbige Zonen auf einem Bildschirm unterscheiden (siehe Seite 98).

Möglicherweise gibt es schon bald auch einen direkten und wenig aufwendigen Labortest für die Alzheimersche Krankheit. Der englische Biochemiker Peter Da-

vies und sein Doktorand Benjamin Wolozin entdeckten am Albert Einstein College für Medizin in New York ein ungewöhnliches Eiweiß (Protein) im Gehirn von Alzheimer-Patienten. Das Protein mit dem Labornamen A-68 findet sich reichlich in den Gehirnregionen, in denen auch die typischen Zellveränderungen auftreten. Da A-68 auch in der Rückenmarks-

**„Ich lese dasselbe Buch immer wieder und jedesmal ist es für mich neu“**

*Eine Alzheimer-Patientin*

flüssigkeit vorkommt, kann es darin getestet werden. Offenbar erscheint A-68 als eines der allerersten Krankheitszeichen.

Zur Behandlung der Alzheimerschen Krankheit erprobten die Ärzte bislang mehr als 20 verschiedene Substanzen – ohne Erfolg. Die größte Hoffnung setzen die Forscher auf den Nervenüberträgerstoff Acetylcholin. Er kommt in den geschädigten Gehirnregionen nur noch mangelhaft vor. Auf verschiedenen biochemischen Wegen versuchten Forscher, den Acetylcholin-Mangel zu beheben. Doch bis auf geringfügige Verbesserung in bestimmten Lern- und Gedächtnistests blieben die Behandlungsergebnisse mager und

mit erheblichen Nebenwirkungen behaftet.

Aufsehen erregte ein „Strohalm“, den der kalifornische Psychiater William Summers Ende letzten Jahres in das Meer der Hoffnungslosigkeit warf. An einer Klinik der University of California in Los Angeles wurden 17 Alzheimer-Patienten mit der Substanz THA (Tetrahydroaminoacridin) behandelt. Dieser Stoff, der den Acetylcholin-Gehalt der Neuronen beeinflusst, verbesserte bei 16 Patienten die Hirnleistung. Ob THA die Krankheit aufhalten kann oder die Wirkung nur vorübergehend ist, müssen jedoch weitere Studien zeigen.

Obwohl die Entdeckung des Acetylcholin-Mangels ein wichtiger Meilenstein in der Alzheimer-Forschung war, liegen die Ursachen der Krankheit weiter im dunkeln. Diesseits und jenseits des Atlantik untersuchen Forscher jetzt mit molekularbiologischen Methoden, woraus sich die typischen Alzheimer-Ablagerungen im Gehirn zusammensetzen und weshalb sie sich in so großen Mengen ansammeln.

In diesem Frühjahr gelang fünf internationalen Forschergruppen, darunter einer deutsch-australischen Kooperation um die Kölner Professoren Konrad Beyreuther und Benno Müller-Hill, ein wichtiger Vorstoß zu den erblichen Ursachen des Leidens: Sie entdeckten auffällige Abweichungen im Erbgut einer bestimmten Gruppe von Alzheimer-Patienten – bei jenem Zehntel aller Betroffenen, die aus Familien stammen, in denen das Leiden bereits mehrfach auftrat.

Bei diesen Kranken weicht das 21. von insgesamt 46 Chromosomen auffällig von der Norm ab: Dort markiert eine „identische Region“ die erbliche Veranlagung zur Alzheimerschen Krankheit. Die genaue Lage der krankmachenden Gene muß jedoch erst noch gefunden werden.

Das Chromosom 21 hatten die Forscher schon lange im Visier. Denn Opfer des Down-Syndroms – des „Mon-

golismus“ – tragen in ihrem Erbgut ein überzähliges Chromosom 21. Und diese Menschen weisen nach dem 35. Lebensjahr die selben Gehirn-Veränderungen auf wie Alzheimer-Kranke.

Ausgerechnet in der Nachbarschaft der „identischen Region“ haben die Forscher – Zufall? – auch das Gen mit den Bauanweisungen für das Amyloid-Protein gefunden: Dieser Eiweißstoff sammelt sich in Gehirnen von Alzheimer-Patienten in großen Mengen an.

Das Amyloid-Protein gehört offenbar zum natürlichen Alterungsprozeß. Denn es wird in den Gehirnen vieler Säugetiere gebildet und kommt auch – in geringen Mengen – im Denkkorgan eines jeden alten Menschen vor. Bei Alzheimer-Kranken muß jedoch ein noch unbekannter Vorgang bewirken, daß sich im Gehirn besonders viel Amyloid ansammeln kann.

Dennis Selkoe von der Harvard Medical School in Boston sieht darüber hinaus einen Zusammenhang zwischen Amyloid und der Entstehung neurofibrillärer Bündel in den Nervenzellen: Dieser krankhafte Prozeß wird möglicherweise durch die erhöhte Ansammlung des Proteins im Gehirn von Alzheimer-Patienten und älteren Down-Syndrom-Kranken begünstigt.

Auch diese jüngsten Erkenntnisse entschlüsseln noch immer nicht die eigentliche

**„Früher habe ich alles gekonnt. Ich bin sehr schlecht geworden“**

*Eine Alzheimer-Patientin*

Ursache der Alzheimerschen Krankheit. Aber nun hegen die Forscher die Hoffnung, den genetischen Ursprung des Leidens – das oder die „Alzheimer-Gene“ – zu finden. Dann könnten sie auch ermitteln, wodurch sich die kranke von der gesunden Erbinformation unterscheidet.

## Deutsche Alzheimer-Gesellschaft

Angehörige von Alzheimer-Kranken gründeten im Dezember 1986 in München die erste deutsche Alzheimer-Gesellschaft. Denn die Lebenssituation von Menschen mit Hirnleistungsstörungen kann nicht allein von ärztlicher Seite aus verbessert werden, sondern vor allem durch den richtigen Umgang mit der Krankheit in der Familie. Die Gesellschaft sieht sich als Keimzelle für weitere Initiativen. Sie plant

- ein Büro mit ständigem Telefonservice;
- Kurse für Krankenpfleger, Altenbetreuer und Laienhelfer;
- Unterstützung von Selbsthilfegruppen in München und Umgebung;
- Informationsmaterial sowohl für Angehörige als auch für Hausärzte.

Anschrift: Alzheimer-Gesellschaft München, Möhlstraße 26, 8000 München 80



## Exzellente Köpfe noch in hohem Alter



Wladimir Horowitz (geb. 1904)



John Huston (geb. 1906)



M. Chagall (1887–1985)



Luis Trenker (geb. 1892)



Arthur Rubinstein (1887–1982)



A. Schweitzer (1875–1965)



Yehudi Menuhin (geb. 1916)



Konrad Adenauer (1876–1967)



Astrid Lindgren (geb. 1907)



Pablo Picasso (1881–1973)



Ida Ehre (geb. 1900)



Joan Miró (1893–1982)



Marguerite Yourcenar (geb. 1903)



Konrad Lorenz (geb. 1903)

**M**ir bleibt genug. Mir bleiben Vernunft und Liebe“, sagte Goethe mit 75 Jahren. Der Dichterfürst behielt allerdings seine geistige Kraft bis ins hohe Alter – wie heute 85 Prozent der über 65 Jahre alten Menschen. Altern ist nicht gleichzusetzen mit dem Verlust der intellektuellen Fähigkeiten. Denn das Gehirn ist ein widerstandsfähiges Organ: Wie die Herzmuskelzellen funktionieren auch die Nervenzellen im Gehirn ein Leben lang, ohne sich zu erneuern. Sie leben somit länger als die Zellen aller anderen Organe. Von den bis zu 100 Milliarden Nervenzellen, die wir unter unserer Schädeldecke vereinen, „gehen bis zum fünfundsiebzigsten Geburtstag weniger

als fünf Prozent zugrunde“, erklärt der Münchner Neuropathologe Parviz Mehraein. Das gilt aber nur, solange die Nervenzellen auch gut versorgt sind. Mangel an Sauerstoff jedoch, etwa bei einer Bewußtlosigkeit, oder ein starkes Defizit an Glukose, etwa durch zu viel blutzuckersenkendes Insulin, kann die Nervenzellen unwiderbringlich absterben lassen. Entgeht das Gehirn derartigen Katastrophen, kann die geistige Leistung mit zunehmendem Alter geradezu brillant werden, während die Sinnesleistung abnimmt. Schon der griechische Philosoph Plato hatte das erkannt: „Der Blick des Verstandes fängt erst an scharf zu werden, wenn

der Blick der Augen an Schärfe verliert.“ Der Grund für den Reifungsprozeß des Intellekts: Im Verlauf des Lebens nimmt die Zahl der funktionellen Vernetzungen der Nervenzellen immer weiter zu. Während Schnelligkeit beim Lernen und Erfassen von Neuem Sache des jungen Gehirns ist, zeigt das Alterswerk herausragender Menschen wie Tizian, Goethe oder Rubinstein, zu welchen Leistungen das Gehirn fähig ist, wenn der Körper seinen Zenit längst überschritten hat. Zu solchen geistigen Höhenflügen ist jedoch nur ein tätiges, ständig gefordertes Gehirn fähig. Hier gilt dasselbe wie für Muskeln: Nur Training erhält die Leistungsfähigkeit.

Möglicherweise kommt das defekte Gen, das bei einem Menschen früher, beim anderen später oder gar nicht „angeschaltet“ wird, erst durch zusätzliche Einflüsse zur Wirkung: Seit langem schon verdächtigen Wissenschaftler Umweltfaktoren – etwa die vermehrte Aufnahme von Aluminium – als Ursache der Krankheit. Auch „langsame Viren“ könnten den fatalen Prozeß auslösen. Möglicherweise müssen sogar mehrere solcher Einflüsse zusammenkommen.

Zwei Dinge erschweren vor allem die Erforschung der Alzheimerschen Krankheit: Zum einen gibt es kein Tiermodell, an dem sich die Krankheit studieren ließe – die Alzheimersche Krankheit befällt nur Menschen. Zum anderen mangelt es den Forschern an geeignetem Hirnmaterial. Vor allem bei deutschen Psychiatern besteht eine weitverbreitete Abneigung gegen Gewebeentnahmen – „Sektionen“ – nach dem Tod.

„Es ist ein Skandal, wie sich die deutschen Psychiater um die Sektion drücken“, kritisiert der Leiter der Psychiatrischen Klinik der Technischen Universität München, Professor Hans Lauter. Die meisten Alzheimer-Patienten – in einem Stadium dazu befragt, in dem sie noch über ihre Entscheidungsfähigkeit verfügen – wären glücklich darüber, durch Forschungen an ihrem Körper zukünftigen Generationen helfen zu können. „Dann hat es wenigstens einen Sinn, an dieser schrecklichen Krankheit zu leiden.“ □



Dr. Annelies Furtmayr-Schuh studierte Mikrobiologie und Biochemie. Die Wahl-Münchenerin arbeitete als Genetikerin und Medizinredakteurin. Sie war Nieman Fellow der Harvard University und schreibt heute als freie Journalistin für die „FAZ“, „Die Zeit“ und nun für GEO-Wissen.



Im Wohnzimmer von Fritz und Lydia Haller hängt kein Foto der 35 Jahre alten Tochter Sabine\*. Ist das Absicht? So etwas hat ihre Tochter nie gemocht, erzählen die Eltern. Denn das wäre ja genauso wie im Museum, hat Sabine immer gesagt. Und Fritz Haller erklärt: „Sie lebt ja noch.“

In einem Brief, mit dem der 56jährige Facharbeiter vor einigen Jahren offizielle Stellen um Hilfe bat, weil er für seine Tochter ein Pflegeheim suchte, hat er es genauer formuliert: „Unsere Tochter ist lebend tot.“

Im Jahre 1976 stand das Herz von Sabine während der Vorbereitung zu einer lebenswichtigen Blinddarmsoperation still. Die junge Frau wurde wiederbelebt und schließlich operiert. Aus der Narkose erwachte sie nicht mehr. Daß sie auf eine Intensivstation kam, war eine besondere Ironie des Schicksals: Die gelernte Krankenschwester hatte sich gerade auf einer Intensivstation weiter ausbilden lassen, „weil sie Schwerstkranken helfen wollte“.

Die 52 Jahre alte Mutter erinnert sich: „Irgendwann hieß es, das Großhirn sei ausgefallen. Nach sechs Wochen sagte man uns, sie habe eine Chance von drei Prozent.“ Doch der Herzstillstand hatte die Sauerstoffzufuhr zum Großhirn bereits zu lange unterbrochen, zu viele der Nervenzellen waren bereits geschädigt. Sabine Haller wurde *apallisch*.

Das lateinische Wort *apallisch* bedeutet „ohne (Hirn-)Mantel“. Es ist ein zu lyrischer Ausdruck für einen schrecklichen Zustand: Ein Mensch vegetiert als hilfloses Hirnstammwesen dahin – wach, aber ohne Bewußtsein. Er ist zu keiner höheren Hirnleistung wie Wahrnehmung der Sinneseindrücke

wie Sprechen, Fühlen und Denken mehr imstande. Möglich machen diesen unmenschlichen Zustand unser biologisches Erbe und die moderne Intensivmedizin. Das Großhirn – Sitz aller geistigen Leistungen – kann sterben, während der Hirnstamm weiterhin funktioniert und den Körper „am Leben“ hält.

Ich stehe mit den Eltern am Bett von Sabine Haller in einem kargen weißen Zimmer der neurologischen Klinik einer süddeutschen Großstadt. Sabines offene Augen gleiten hin und her, ohne ein Gesicht oder einen Gegenstand festzuhalten. Hände, Füße und Arme sind verkrümmt, die Beine unbeweglich gestreckt. Alle drei Stunden wird sie in ihrem Bett gedreht, um ein Wundliegen zu vermeiden. Nahrung nimmt Sabine über einen Magenschlauch auf. Sie hat einen Blasenkatheter. Sabine schluckt, verzichtet das Gesicht und hustet. Ihre Mutter hilft einer Krankenschwester, die eine lange

**»Sie schläft wie jede andere, wacht auf wie jede andere und ist nicht da«**

Sonde durch den Luftröhrenschnitt in den Tubus eingeführt, um Schleim abzusaugen.

Es sind besonders die offenen Augen, die trotz Aufklärung – und auch nachdem die Angehörigen das Krankheitsbild langsam verstanden haben – die Hoffnung auf Heilung unterschwellig aufrecht erhalten. Der Heidelberger Psychiater und Nervenarzt Helmut Lüdeke hat bei Angehörigen apallischer Patienten beobachtet, daß sie unablässig Beweise für eine Besserung sammeln: „Durch

die gleichzeitige Sprachlosigkeit erhält der Blick als Sprache zusätzlich eine überwertige Bedeutung.“ Jede Augen- und Mundbewegung, jedes Saug- oder Schmatzgeräusch wird als Zustimmung interpretiert, „und gegenüber dem Arzt mit solcher Emphase vorgetragen, daß Äußerungen des Zweifels tabu erscheinen“.

Seit nun bald zehn Jahren versucht Sabines Vater zu begreifen, „aber es geht nicht. Sie schläft wie jeder andere, wacht auf und ist nicht da.“ Der grauhaarige, stämmige Mann erzählt, wie er Sabine anspricht, wenn er sie allein besucht: „Ich frage sie immer: Hörst du wieder zu? Ich weiß, daß sie mich anschaut, auch wenn es die Ärzte anders sagen“ – und, zu mir gewandt – „oder Sie in Ihrem Artikel etwas anderes schreiben.“ Lydia Haller schüttelt zu den Äußerungen ihres Mannes den Kopf: „Was willst du da noch zweifeln? Sie schaut ins Leere, da fehlt etwas.“

Auf der Neurologischen Intensivstation I 2 A im Münchener Klinikum Großhadern liegt seit 13 Tagen die 67jährige Franziska Timm wie alle anderen Patienten nackt im Bett, nur zugedeckt mit blaugetönten Laken. Ihre Augen sind geschlossen. Freunde hatten die verwitwete, kinderlose Frau bewußtlos und links halbseitig gelähmt in ihrer Wohnung gefunden. In ihrem Gehirn war ein mißgebildetes Blutgefäß geplatzt. Das in den Schädel ausströmende Blut beansprucht Platz. Es kann Groß- und Kleinhirn soweit nach unten auf den Hirnstamm pressen, bis auch das Atemzentrum gelähmt wird und der Tod eintritt. Frau Timm kam deshalb, wie fast alle Patienten mit einer Hirnblutung, auf die neurologische Intensivstation.

Unerwartet laut und hektisch geht es auf der I 2 A zu. Oder kommt es mir nur so

\* Die Namen der Patienten und deren Angehörigen wurden geändert. Red.



# Wenn das Großhirn schweigt

In der Grauzone zwischen Leben und Tod rettet die moderne Intensivmedizin viele Patienten, die im Koma liegen und früher hätten sterben müssen. In einigen Fällen aber wird bei der künstlichen Beatmung ein kritischer Punkt »überfahren«: Dann muß ein Mensch, der sonst gestorben wäre, weitervegetieren – ohne jede Großhirnfunktion, also ohne Sinneswahrnehmungen, ohne Fühlen und Denken. Er ist zum »Apaliker« geworden – schon tot und trotzdem noch lebendig

**HIRNTOD**





vor, weil ich eher Totenstille erwartet habe? In dem weißen Viererzimmer rascheln die dünnen Plastikschränke, die das Pflegepersonal jedesmal wechselt, bevor es den nächsten Patient betreut. Menschen stöhnen und röcheln.

In dem angrenzenden Zweibettzimmer murmelt ein Kranker unverständliche Worte. Die Verpackungen der Verbände und Pflaster, Schläuche und Spritzen verschwinden raschelnd in Müllsäcken. Der Stationsarzt, drei Assistenzärzte, ein Pfleger und drei Schwestern gehen hin und her. Mit Piepstönen und blinkenden roten Lämpchen meldet sich ständig eine der vielen automatisch gesteuerten Infusionspumpen, wenn Medikamente und Nährlösungen zu Ende gehen. Telefone klingeln.

Die Patienten atmen mit Sauerstoff angereicherte Luft. Der Sauerstoff wird vor dem Einatmen zum Befeuchten durch Wasser gepumpt. Es blubbert wie in einem Aquarium. Mit einem Monitor, der fortlaufend Temperatur, Blutdruck, Puls und

**„Ich frage sie immer: Hörst du wieder zu? Ich weiß, daß sie mich anschaut“**

Hirndruck anzeigt, ist Frau Timm durch mehrere Kabel verbunden. Es wurde auch ihr ein Blasenkatheter gelegt, und neben dem in den Mund eingeführten Magenschlauch steckt noch ein „nasaler Tubus“ im Nasenloch. Über einen zentralen Katheter in eine herznahe Vene werden ihrem Körper hochdosierte Medikamente zugeführt.

„Die Apparate nehmen uns nur die Idiotenarbeit ab. Sie sind optimale Werkzeuge, um gestörte Organfunktionen, zum Beispiel die Atem- und Stoffwechselstörungen, zu überbrücken“, betont Georg Rieder, „am

wichtigsten bleiben aber immer die klinische Untersuchung und Beobachtung.“ Der Stationsarzt zwickt die Patientin in den rechten Arm – daher die blauen Flecken – und spricht sie laut an: „Frau Timm, machen Sie die Augen auf.“ Auf mehrmaliges Kneifen und Anrufen reagiert sie nicht eindeutig. Der Befund lautet: komatös.

Mit beiden Händen ergreift Dr. Rieder den Kopf der Kranken und dreht ihn ruckartig zu einer Seite. Die Augen gleiten auf die andere Seite. Der Befund lautet:

„Puppenkopf-Phänomen auslösbar.“ Der Arzt streicht mit dem harten Stiel des metallenen Reflexhammers über die Fußsohle der Patientin: Der große Zeh geht nach oben, die anderen Zehen spreizen sich fächerförmig. „Babinski“ ist der Name dieses Primitivreflexes, der – wie auch das Puppenkopf-Phänomen – bei Neugeborenen einige Tage bis Wochen lang vorhanden ist und schließlich verschwindet, wenn sie lernen, ihre Bewegungen zu steuern. Tritt der Babinski-Reflex wieder auf, müssen Teile der sogenannten Pyramidenbahn beeinträchtigt sein, die unsere Willkürmotorik steuern.

Der Arzt preßt seine Finger auf das Brustbein der Kranken. Der Schmerzreiz löst eine Streckung des Körpers aus, ihr Kopf kippt nach hinten, die Hände und deren Handfläche drehen sich nach innen, eindeutige Zeichen des Komas. Wird Frau Timm aus diesem „tiefen Schlaf“ erwachen?

„Es kann sein“, Dr. Rieder formuliert vorsichtig, „aber die Prognose für die Wiederherstellung ihrer Selbständigkeit ist eher schlecht.“ Und er gibt zu: „Einen Pflegefall, im Extremfall einen Apalliker zu produzieren, ist das Schlimmste, was passieren kann.“

Die Familie Haller ist davon überzeugt, daß Angehörige im Notfall stets die Ärzte auffordern, alles zu tun, um den Kranken zu retten. Aber Herr und Frau Haller wissen, daß es auch Mißerfolge gibt,

daß die technische Medizin solche Fälle produziert. Beide denken an Sabine: „Das muß man verkraften und verarbeiten. Das ist das Schwerste.“ Genau in diesem Punkt lassen viele Ärzte die Angehörigen allein, weil auch sie mit der Situation „tot und doch lebendig“ nicht fertig werden.

Als der Assistenzarzt Bernhard Bühler vor zwei Jahren Sabine Hallers Betreuung übernahm, hatte er

**„Was willst du da noch zweifeln? Sie schaut ins Leere. Da fehlt doch etwas“**

zunächst „Angst, mit den Eltern zu sprechen. Wir wollen ja immer etwas tun, helfen, heilen. Hier kann ich nichts mehr tun. Und auf die Frage, ob der Apalliker vielleicht doch noch irgend etwas mitbekommt, habe auch ich keine endgültige Antwort.“

Lydia Haller hat es sich nicht bloß eingebildet, daß Ärzte ihr aus dem Weg gingen, „und dabei kann doch nur der Arzt Hilfe und Rat geben“. Mit einem kleinen Lächeln auf dem Gesicht erinnert sie sich an ein Erlebnis, das sie sehr beeindruckt hat. Sie stand neben dem Bett ihrer Tochter und hatte das Gefühl, daß Sabine Schmerz empfindet. Sie rief eine Schwester und bat um ein Medikament. Die Schwester entgegnete, das sei Sache des Arztes und überhaupt „die Nebenwirkungen“. Frau Haller war wütend: „Nebenwirkungen spielen hier wohl keine Rolle.“ Sie schrie durch die Station – „dabei bin ich sonst eher ruhig“ – bis Dr. Lüdeke kam. Der Arzt betrachtete die apallische Patientin und beruhigte die Mutter: „Sie hat keine Schmerzen.“ Eine Spritze gab er Sabine trotzdem. Frau Haller dachte lange über seine Begründung nach: „Diese Spritze ist nicht für Sabine, sondern für Sie.“



**Leidet ein Mensch**

Auf der neurologischen Intensivstation ist es wichtig, die Wachheit eines Patienten zu beurteilen. Zumal Reflexe und Augenbewegungen den Ärzten erlauben, Rückschlüsse auf die Schädigungen des Gehirns zu ziehen. Nur so können sie beispielsweise bei einer Hirnblutung das Risiko einer Operation und die Heilungschancen gegeneinander abwägen. Betäubende Schmerzmittel werden deshalb eher sparsam und in





## im Koma? Durchlebt er vielleicht die Apokalypse?

schwacher Form verabreicht.

„Wir wollen, daß die Leute potentiell ansprechbar sind“, erläutert Privatdozent Karl Einhüpl, seit zwei Jahren Oberarzt der neurologischen Intensivstation des Klinikums Großhadern. „Die Frage, ob der Mensch in diesem Moment leidet, stelle ich mir aber jedesmal neu. Was mich bei der Arbeit auf der Intensivstation am meisten belastet, ist die Vorstellung, daß ein hilfloser Mensch die

Apokalypse durchlebt.“ Es beruhigt den Neurologen auch nicht, wenn ihm genesene Patienten erzählen, daß sie sich an nichts erinnern: „Die Stunden, die sie leiden, machen sie durch.“

Kann ein Mensch im Koma zum Beispiel Schmerzen empfinden? Keine noch so ausgeklügelte neurophysiologische Messung gibt bis heute darauf eine Antwort. Weder die Ableitung der Hirnströme, das Elektroenzephalogramm noch die Auf-

**Der friedliche Eindruck trägt. Christian S., zwölf Jahre alt, schläft nicht – er liegt im Koma. Ärzte des Münchner Klinikums Großhadern haben dem Jungen, der an einem »Wasserkopf« leidet, eine Elektrodenhaube zur Ableitung seiner Gehirnströme aufgesetzt. Die EEG-Aufzeichnungen sollen Hinweise darauf geben, wie schwer Christians Gehirn nach der Fehlfunktion eines Drainage-Schlauches in seinem Kopf geschädigt worden ist**

zeichnung unterschiedlichster Erregungswellen, von Tönen oder Lichtblitzen in der Großhirnrinde ausgelöst, bilden das bewußte Empfinden ab. Die Meßdaten dieser „evozierten Potentiale“ zeigen nur relativ grob, ob überhaupt und wie verändert Sinnesreize im Gehirn ankommen.

Seit zwölf Jahren arbeitet Karl-Heinz Reinartz auf der Neurologischen Intensivstation. Der 42jährige Pflegedienstleiter formuliert seinen Anspruch: „Von der pflegerischen Seite machen wir das, was die Würde des Patienten ausmacht.“ Dazu gehören scheinbar kleine Dinge. Zum Beispiel läßt er Hände und Füße der Patienten länger als zum Waschen nötig in der Wassertschüssel hängen, „dann fühlt man sich sauber“. Das Pflegepersonal und die Ärzte erklären den Bewußtlosen meistens mit lauter Stimme, was sie gerade machen. Reinartz: „Jeder Patient bekommt mehr mit, als wir wissen. Es gibt viele Bewußtseinsstufen.“ Bilde ich es mir nur ein, oder sind die Gesichter der Kranken nach dem mühevollen, zeitaufwendigen Waschen und Betten wirklich entspannter?

Auf der I 2 A liegt Christian S. im Bett gegenüber von Frau Timm. Manchmal schmatzt der zwölf Jahre alte Junge wie ein Säugling. Er ist apathisch, desinteressiert, redet nicht. Auf seinem kahlerasierten Kopf sprießen Haarspöckchen, seine Augen sind geschlossen.

Christian litt an einem Hirnüberdruck, hervorgerufen durch einen Hydrozephalus, im Volksmund Wasserkopf genannt. Jahrelang lebte er mit einem Drainageschlauch, der von den mit Flüssigkeit gefüllten Hohlräumen des Gehirns unter der Kopfhaut entlang in den rechten Herzvorhof führte. Jeweils bei Überdruck öffnete sich ein Ventil, und Gehirnflüssigkeit floß ab. Das hielt den Hirndruck stabil. Der Junge besuchte eine normale Schule.

Nach einer Fehlfunktion wurde der „interne Shunt“,



jener Drainageschlauch, ausgetauscht. Im Gehirn „unseres Sorgenkindes“, wie ihn der Oberarzt bei der Visite nennt, traten kurz darauf extreme Druckschwankungen auf. Ihre Ursache ist unbekannt, auch Aufnahmen des Gehirns mit einem Kernspintomographen (siehe Seite 161) brachten keine neuen Hinweise auf Entzündungsherde. Wahrscheinlich ist die Großhirnrinde inzwischen bereits geschädigt, weil versorgende Blutgefäße abgeklemmt worden sind.

In einem Plastikbeutel neben Christians Bett sammelt sich das klare Hirnwasser, das unser Gehirn normalerweise abpolstert und ernährt. Bei Christian fließt es vorübergehend „extern“ ab. Der Junge spürt den Schlauch nicht, der aus seinem Kopf ragt. Die menschliche Gehirnmasse ist schmerzunempfindlich.

Christians Arme sind fest angewinkelt, er streckt sie nicht mehr. Vormittags und nachmittags wird diese Spastik von einer Krankengymnastin der Intensivstation behandelt. Mit Eisbeuteln

**»Patienten  
spüren mehr, als  
wir wissen. Es gibt  
viele Bewußtseins-  
ebenen«**

senkt sie zunächst die Muskelspannung, um dann langsam und mit Kraft die Arme in eine fast ausgestreckte Haltung zu drücken. In Luftschienen verpackt, müssen die Arme eine Stunde lang gerade liegen, sonst verkürzen sich die Sehnen unwiderruflich. Christian mag das nicht. Er verzieht sein Gesicht und preßt in kurzen Abständen ein langgezogenes, hohes Wimmern hervor, so lange, bis die Schienen wieder abgenommen worden sind.

Werden Christian S. und Franziska Timm überleben, und wenn ja, wie werden sie die Intensivstation verlas-

sen? Wird es ihnen gehen wie Sabine Haller? Es ist fatal, daß vor allem die Zeit die Ärzte klüger macht: Je länger ein Koma dauert und je tiefer es ist, desto wahrscheinlicher bleibt das Gehirn dauerhaft geschädigt.

Der 56. deutsche Juristentag beschloß 1986 Grundsätze zum Thema Sterbehilfe. Darin heißt es unter anderem: „Medizinische Maßnahmen zur Behandlung eines Todkranken, die lediglich den natürlichen Ablauf des Sterbens verzögern, sind kein Gebot des Lebensschutzes, sondern eine Verfälschung des Sterbens, in diesen Fällen ist daher ein Abbruch der Behandlung in der Regel erlaubt (sogenannte passive Sterbehilfe).“

Wird ein Patient neu eingeliefert, kann auch ein erfahrener Neurologe eine „todsichere“ Prognose in vielen Fällen nicht stellen. Es bleibt ihm nur wenig Zeit, in der die Entscheidungen für eine Behandlung fallen müssen. Oberarzt Einhäupl stellt sich, wenn ein neuer Patient auf die I 2 A kommt, immer die entscheidende Frage: „Hat der Patient grundsätzlich eine Überlebenschance?“ Wenn ja, erhält er diese Chance. „Eine ganz andere Frage ist: Hat der Patient eine theoretische Chance, wieder ganz gesund zu werden?“

Aber auch wenn die Antwort hier oft nein heißt, unternehmen die Mediziner alles, um einen Menschen durchzubringen. Sie tun das in dem Wissen, daß der Erfolg ihrer Bemühungen letztlich stets ungewiß ist.

Über die Hälfte der Patienten, die auf der I 2 A liegen, sind mehr oder weniger lange an Beatmungsmaschinen angeschlossen. Vielen rettet diese künstliche Beatmung das Leben, viele sterben trotzdem.

Bei einigen aber wird durch die Intensivmedizin, zumal durch die künstliche Beatmung, der Punkt „überfahren“, an dem sie ohne Geräte sterben würden. Sie überleben, ohne daß ein selbstbewußtes und selbstbestimmtes Leben wieder

möglich ist. Sie werden Apaliker.

In dem Märchen vom „Gevatter Tod“ ist der Arzt fein raus. Denn sein Pate, der Tod, macht ihm ein besonderes Geschenk: Steht der Arzt am Bett eines Kranken und sieht seinen Gevatter am Kopfende, „so kannst du keck sprechen, du wolltest ihn wieder gesund machen“. Steht der Sensenmann dagegen am Fußende des Bettes, ist alle ärztliche Kunst verge-

**»Ich frage mich  
immer: Wäre der Tod  
für sie eine Erlösung?  
Meine Antwort  
ist ja«**

bens. So wird der Arzt berühmt.

Eines Tages läßt ihn der kranke König rufen. Als der Arzt den Paten am Fußende erblickt, weiß er, für den Kranken „ist kein Kraut mehr gewachsen“. Doch der Arzt überlistet den Tod: Er dreht den Kranken im Bett einfach herum, und der König wird gesund.

Hätten die Brüder Grimm ihr Märchen heute verfaßt, hätte der Arzt den kranken König vielleicht auf eine Intensivstation eingewiesen, und dort hätte sich zu dem alten Gevatter gar noch sein moderner Bruder hinzugesellt: der Hirntod.

Im Jahre 1840 stellte der Rechtsgelehrte Friedrich Karl von Savigny fest: „Der Tod, als die Gränze der natürlichen Rechtsfähigkeit, ist ein so einfaches Naturereignis, daß derselbe nicht, so wie die Geburt, eine genaue Feststellung seiner Elemente nöthig macht.“ Die Intensivmedizin hat das geändert.

Der Hirntod tritt ein, wenn ein erhöhter Druck innerhalb des Schädels – typischerweise ausgelöst durch eine Hirnblutung oder eine schwere Kopfverletzung – den Blutfluß unterhalb des Kopfes abblockt. Unser Denkorgan überlebt höchstens zehn Minuten ohne



## Der »ungewisse

Sauerstoffzufuhr. Auch das Herz steht dann still – wenn der Verletzte nicht künstlich beatmet wird. Beatmungsmaschine und Medikamente, die den Kreislauf stützen, lassen den Körper des Beatmeten für Stunden oder Tage weiterleben: Er bleibt warm, die Haut schimmert rosig.

Jedoch: Ist sein Hirn tot, ist der Mensch tot. Denn das Hirn und nicht das Herz ist der Sitz all dessen, was einen Menschen ausmacht, seine Persönlichkeit und seine Fä-





## Abschied« der Apalliker wird für Angehörige zur Qual

higkeit, sich zu verständigen. Drei Tage auf der neurologischen Intensivstation I 2 A in München liefern dazu intensivste Erfahrungen. Allerdings: Eine solche Definition des Todes macht auch Angst, sie kollidiert mit kulturell verwurzelten Vorstellungen vom Sterben und stößt in Tabuzonen vor. Denn der Hirntod eines Menschen gestattet den Zugriff auf dessen noch funktionierende Organe, etwa auf Herz und Niere, womit – dank der Fortschritte

bei der Organverpflanzung – andere Menschenleben zu retten wären.

Viele Menschen scheuen davor zurück, über den eigenen Tod und damit auch über eine mögliche Organspende nachzudenken. Einige fürchten, im Krankheitsfall zu früh aufgegeben und für tot erklärt zu werden. Der Neurologe Karl Einhäupl diagnostiziert seit Jahren den Hirntod von Patienten, im Klinikum Großhadern und im Konsiliardienst in kleinen

**Diese junge Frau, eine Apallikerin, lebt seit drei Jahren ohne funktionierendes Großhirn und damit ohne Bewußtsein. Sie bedarf aufwendiger Pflege in einem Heim. Die Schwestern haben eine noch von ihr selbst gehäkelte Decke übers Bett gelegt – ein winziges Symbol der Hoffnung. Ärzte können ihr nicht mehr helfen. Und ihren Eltern bleibt nicht einmal konkrete Trauer angesichts des »ungewissen Abschieds« ihrer Tochter**

Krankenhäusern. Er muß sich dabei an verbindliche Richtlinien halten, und die sind, versichert Einhäupl, „ganz sicher“.

Die hierzulande gültigen „Kriterien des Hirntodes“ wurden 1982 vom wissenschaftlichen Beirat der Bundesärztekammer erstmals formuliert und im Jahr 1986 leicht überarbeitet und bestätigt. Sie schreiben die einzelnen Untersuchungsschritte und -methoden und deren Dokumentation genau vor (siehe Übersicht auf den Seiten 110/111). Es müssen zwei – von einem Transplantations-Team unabhängige – Ärzte sein, die den Hirntod diagnostizieren dürfen, und einer der beiden muß über Erfahrungen in der Intensivmedizin verfügen.

Liegt keine Willenserklärung des Hirntoten vor – sei es ein Spenderpaß oder eine ausdrückliche Ablehnung der Organspende –, muß der Arzt in die Trauer der Angehörigen einbrechen, denn auf deren Zustimmung kommt es an. Der Münchener Neurologe Einhäupl hat in solchen Gesprächen erfahren: „Das Problem ist nicht, den Angehörigen den Hirntod an sich verständlich zu machen, sondern ihnen das Gefühl zu nehmen, sie hätten einen Menschen aufgegeben, nicht das letzte für ihn getan.“

Steht der Hirntod fest, darf die Beatmungsmaschine auf der Intensivstation abgestellt werden. Das hat nichts mit aktiver Sterbehilfe gemein, denn der Kranke ist ja bereits (hirn)tot. Es ist nur der letzte Schritt bis zum „einfachen Naturereignis“, bis das Herz stillsteht.

Sehnen Herr und Frau Haller für ihre Tochter Sabine den Tod, dieses „einfache Naturereignis“ herbei? Die Mutter nickt: „Der Mensch, der da liegt, ist nicht mehr unser Kind. Das ist ein aufgezwungenes Leben, was ein Mensch nicht will. Ich frage mich immer: Wäre der Tod für sie eine Erlösung? Die Antwort ist ja.“ Fritz Haller widerspricht energisch: „Unsere Tochter ist krank, ein krankes Kind, und



das besucht man. Es gehört zu unserem Leben, wie ein Kind, das von Geburt an behindert ist.“ Dem Einwurf seiner Frau, ein behindertes Kind könne wenigstens noch „Au“ oder irgend etwas sagen, entgegnet er bestimmt: „Die Sabine ist krank und lebt. Wie krank, ist eine andere Frage. Jetzt kann ich sie noch streicheln, auf dem Friedhof nicht mehr.“

Stirbt ein Mensch, so ist Trauer und damit eine Verarbeitung möglich. Angehörige apallischer Patienten

**„Die Sabine lebt. Ich kann sie noch streicheln, auf dem Friedhof nicht mehr“**

können nicht trauern, sie erleben einen „ungewissen Abschied“. In einen Teufelskreis aus Todeswünschen und Schuldgefühlen entsteht – so der Psychiater Helmut Lüdeke – „die Qual der ritualisierten Fürsorge“. Herr und Frau Haller besuchten Sabine früher täglich. Sobald beide Feierabend hatten, fuhren sie in die Klinik. Lüdeke sprach dieses Ritual als erster an und brach es damit auf. Dafür sind ihm die Eltern dankbar. Heute schaffen es die Hallers, wenigstens an drei Abenden in der Woche zu Hause zu bleiben.

In jenem Grimmschen Märchen bestraft der Gevatter Tod den Arzt, „als er sich zum zweitenmal um sein Eigentum betrogen sah“. Er läßt das Lebenslicht des Arztes ausgehen. Würde Gevatter Tod sich heute vielleicht für das apallische Syndrom entscheiden, um den Medizinern – und nicht nur ihnen – ihre Grenzen aufzuzeigen?

Apalliker sind in ihrer Mehrzahl ein Produkt der Intensivmedizin. Genaue Zahlen darüber, wie oft der medizinische Fortschritt diesen Preis verlangt, liegen nicht vor. Doch eines bestätigen betroffene Ärzte genauso wie Familie Haller: Solche

Fälle sind schwer in unserem Gesundheitssystem einzuordnen. „Keiner ist zuständig.“ Lydia Haller bringt ihre Erfahrungen auf die drastische Formel: „Für den Friedhof zu lebendig, fürs Krankenhaus zu tot, fürs Pflegeheim nicht passend.“

Sabine Haller ist kein üblicher Pflegefall. Sie braucht wie alle Apalliker und sehr viele Hirngeschädigte eine qualifizierte und zeitaufwendige „Krankenhauspflege“. Die Hallers haben seit 1978 keine finanziellen Sorgen mehr. Ein Gerichtsurteil verpflichtete die Krankenkasse, für Sabine Haller gemäß Paragraph 184 der Reichsversicherungsordnung die sogenannte Krankenhauspflege zu bezahlen, auch wenn sich dadurch das Grundleiden nicht mehr bessert.

Eine Angst läßt Familie Haller jedoch nie ganz los: Kann die Tochter wirklich in dem Akutkrankenhaus in M. bleiben, das im Jahr 1979 nach langem Hin und Her Sabine aufgenommen hat und dessen Schwestern und Ärzten die Eltern jetzt vertrauen? Der Mutter klingt oft der Satz eines Arztes im Ohr: „Sabine blockiert ein Zimmer, sie liegt hier nur rum.“

Als ein neuer Sachbearbeiter bei der Krankenkasse wieder einmal auf die Verlegung in ein billigeres Krankenhaus oder besonders ausgerüstetes Pflegeheim drängte, fragten die Hallers bei 24 Institutionen brieflich an. Alle lehnten die Aufnahme von Sabine Haller ab.

**Nachtrag:** Im März 1987 fragte ich den Stationsarzt, wie es Franziska Timm und dem kleinen Christian geht.

Nach viereinhalb Wochen auf der I 2 A war Frau Timm in ein städtisches Krankenhaus überführt worden. Dort ist sie gestorben.

Dem Jungen haben die Neurochirurgen einen neuen internen Shunt gelegt. Seit Februar liegt Christian in einem Kinderkrankenhaus in der Nähe seines Heimatortes. Inzwischen sind fünf Monate vergangen. Eine Besserung ist nicht zu erkennen. □



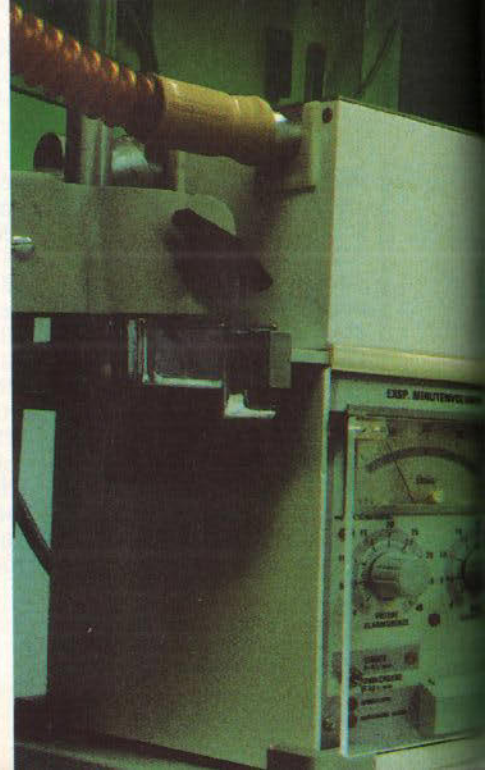
Die Wissenschaftsjournalistin **Charlotte Kerner**, 36, studierte Soziologie und Volkswirtschaft, verbrachte Stipendienjahre in Kanada und China, gewann beim Wettbewerb „Reporter der Wissenschaft“ einen 1. Preis, schrieb drei Bücher und machte sich mit Medizinreportagen in der „Zeit“ einen Namen

## Wann ist ein Mensch hirntot?

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesärztekammer hat 1986 die Kriterien des Hirntodes neu überarbeitet. Er erklärt:

*„Mit dem Organtod des Gehirns sind die für jedes personale menschliche Leben unabdingbaren Voraussetzungen, ebenso aber auch alle für das eigenständige körperliche Leben erforderlichen Steuerungsvorgänge erloschen. Die Feststellung des Hirntodes bedeutet damit die Feststellung des Todes des Menschen.“*

Der Hirntod kann – ohne Ausnahme – nur bei Patienten eintreten, die nicht mehr spontan atmen, sondern künstlich beatmet werden: Ihr Gehirn ist tot, während eine Beatmungsmaschine den Kreislauf im Körper aufrechterhält. Um einen Menschen für hirntot zu erklären, müssen zwei zentrale Bedingungen erfüllt sein: 1. Groß- und Stammhirn-Funktionen sind ausgefallen. 2. Deren Ausfall muß unwiderruflich sein. Zum Nachweis des Hirntodes empfiehlt die Bundesärztekammer in ihren „Entscheidungshilfen zur Feststellung des Hirntodes“ drei Untersuchungsschritte.





## Prüfung der Voraussetzungen

Welche Erkrankungen oder Verletzungen verursachen das Syndrom?

Vorliegen muß eine akute Hirnschädigung. Dazu zählen:

Primäre Hirnschädigungen durch Unfallverletzungen, Hirnblutungen und -infarkte sowie Hirntumore

Sekundäre Hirnschädigungen durch Sauerstoffmangel (nach Wiederbelebung), Kreislaufstillstand, langandauernden Schock und Verschuß-Hydrocephalus (Wasserkopf)

Auszuschließen sind Vergiftung, Unterkühlung und Kreislaufschock.

Sie können zeitweise die Hirntätigkeit „lahmlegen“, ohne daß Nervenzellen geschädigt werden. So kann zum Beispiel bei Unterkühlung der Stoffwechsel der Hirnzellen auf Sparflamme weiterlaufen; die Nervenzellen bleiben erhalten, arbeiten aber nicht.

## Das klinische Bild

Das Kernstück der Hirntod-Diagnostik ist das klinische Bild, das ein Patient bietet

Die Diagnose müssen zwei Ärzte stellen, die nicht einem Transplantations-Team angehören, das Organe des hirntoten Menschen verpflanzen will. Sie müssen folgende Befunde erheben:

1. Der Patient ist bewußtlos
2. Keine Spontanatmung: Das Beatmungsgerät wird abgeschaltet, um zu sehen, ob in einer „angemessenen Frist“ spontane Atemzüge ausbleiben
3. Die meist weiten Pupillen sind lichtstarr
4. Das „Puppenkopf-Phänomen“ ist nicht auslösbar
5. Ein Reiz der Augenhornhaut führt nicht zum Lidschluß
6. Schmerzreize im Bereich des Gesichtsnerves (Trigeminus) lösen keine Reaktionen aus
7. Würgereflexe fehlen

Punkt 1 bezeichnen Mediziner als „Koma“, Punkt 2 bis 7 als „Hirnstamm-Areflexie“.

Bestätigen die beiden untersuchenden Ärzte übereinstimmend dieses klinische Bild, besteht am Ausfall der „integrativen Groß- und Stammhirnfunktionen“ kein Zweifel mehr.

## Bestätigung

Auf zwei Arten kann bewiesen werden, daß der Ausfall unwiderruflich ist

### Beobachtungszeit

Sie beträgt bei einer primären Hirnschädigung für Erwachsene 12 Stunden

Wegen der Unreife des Gehirns erhöht sich die Beobachtungszeit für ein Kleinkind auf 24 Stunden

Bei Neugeborenen: 3 Tage

Die Beobachtungszeit verlängert sich bei einer sekundären Hirnschädigung für jeden Patienten auf 3 Tage

### Ergänzende Untersuchungen

Eine dieser drei Untersuchungen kann die Beobachtungszeit ersetzen oder verkürzen.

1. Das **EEG**, wenn die Hirnstromkurven eine sogenannte Null-Linie zeigen. Diese Untersuchung muß bei Säuglingen und Kleinkindern nach 24 Stunden wiederholt werden. Für Früh- und Neugeborene bleibt die Drei-Tage-Frist erhalten. Für einen Sonderfall des Hirntodes ist das EEG zwingend vorgeschrieben: Bei Erkrankungen der hinteren Schädelgrube (infratentorielle Prozesse) kann das Stammhirn isoliert ausfallen, während das Großhirn eine Zeitlang über die Halsschlagadern weiter versorgt wird. Erst wenn ein Null-Linien-EEG vorliegt, tritt in diesem Sonderfall der Hirntod ein.

2. Eine **Kontrastmitteldarstellung** der Arterien, die das Gehirn versorgen, Angiographie genannt: Das Röntgenbild muß einen Stillstand des Blutkreislaufes im Gehirn zeigen.

3. Die **akustisch ausgelösten** („evozierten“), im Hirnstamm entstehenden und über der Hirnrinde mit Elektroden abgeleiteten **elektrischen Potentiale** der Nervenzellen erlöschen. Bei dieser Methode muß der Arzt sicher sein, daß der Patient früher ein intaktes Hörvermögen hatte.

## Diagnose Hirntod

Jeden einzelnen Befund und jede ergänzende Untersuchung oder Beobachtung vermerken die beteiligten Ärzte mit Datum, Zeitangabe und ihren Unterschriften in einem Protokoll zur Feststellung des Hirntodes. Als Todeszeitpunkt gilt die Zeit und das Datum, an dem die Ärzte den Hirntod diagnostizieren.

### Organspende

Ende der Therapie

Herzstillstand





# KÜHL UND

KCM 7104B

Kleine COOL WOOL-  
Modenschau.

Von links:  
Sacco und Hose –  
Pierre Laffitte,  
Postfach 109,  
D-8400 Regensburg.

Mantel, Rock, Bluse –  
Seeler, Postfach 1269,  
D-4350 Reckling-  
hausen.

Kostüm – Windsor,  
Postfach 6120,  
D-4800 Bielefeld.

Sacco – Saint John,  
Postfach 1280,  
D-6604 Gündingen.

Hose – Wimmers,  
Postfach 90,  
D-5144 Wegberg.

Sacco – Jeune  
Europe, Postfach 129,  
D-8400 Regensburg.

Hose – WIDAX,  
Rochusstr. 33 - 39,  
D-5144 Wegberg 6.

Jacke, Bluse,  
Rock – Seeler.

Das Wollsiegel ist das  
offiziell anerkannte  
Gütezeichen (RAL)  
für Reine Schurwolle.





# PERFEKT: COOL WOOL



**C**OOOL WOOL, die extra leichte Reine Schurwolle. Das Material für ungewöhnlich schöne Stunden. Reine Schurwolle bringt Stil von Natur aus mit. Unverwechselbar in der Optik. Unübertroffen im Feeling. Wenn Sie alle Schurwoll-Vorteile wollen: Achten Sie auf das Wollsiegel, wenn es darauf ankommt. Internationales Woll-Sekretariat Düsseldorf – Wien – Zürich.

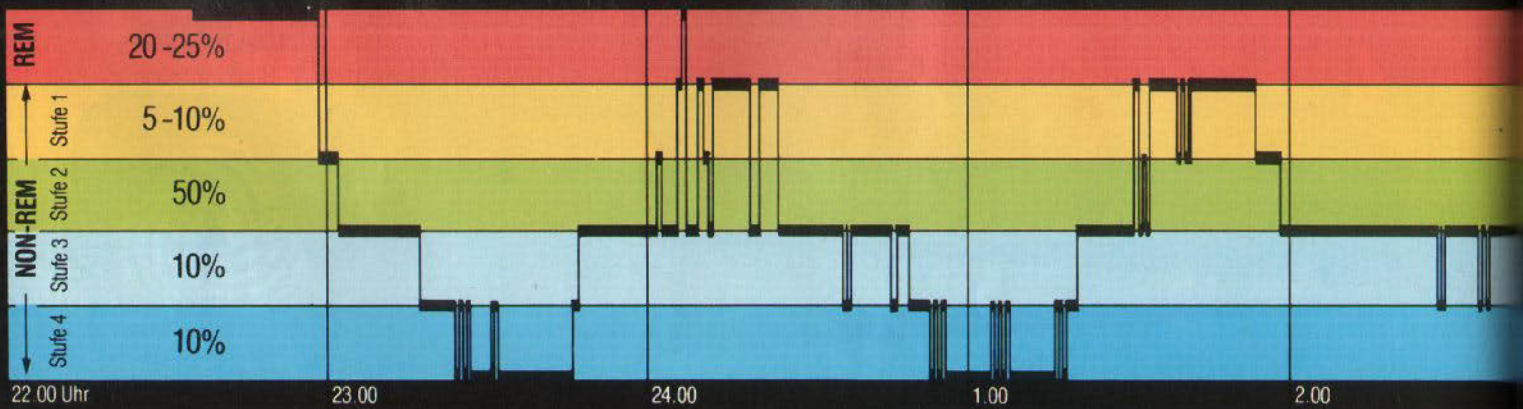
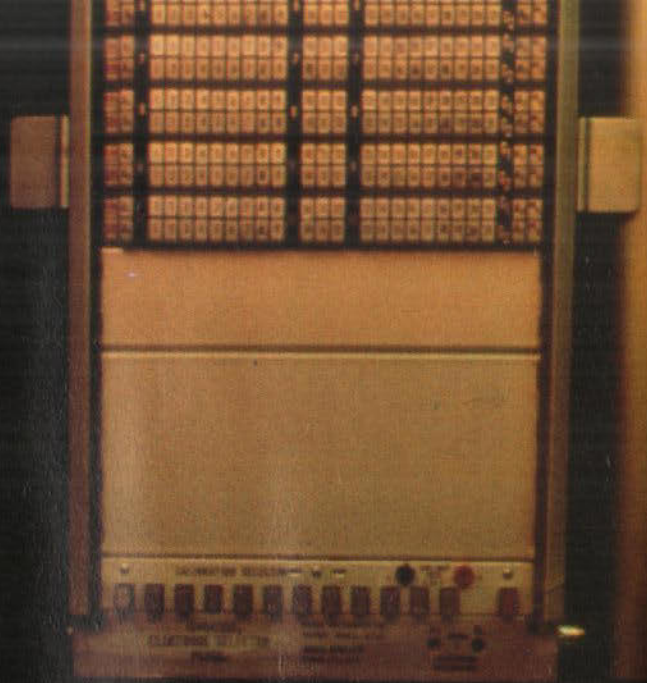
**KEINE  
KOMPROMISSE:  
WOLLSIEGEL.**

COOL  
WOOL



REINE SCHURWOLLE



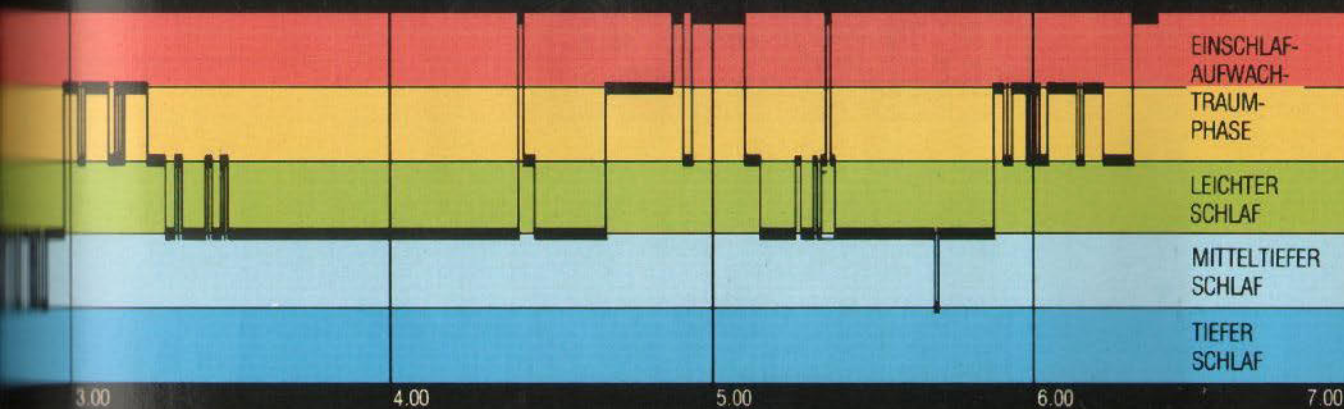




# Die entzauberte Nacht

*Wie Wissenschaftler Schlaf und Traum enträtseln*

Der schmale Durchblick in einer Wand voll Apparaturen gibt den Blick frei auf einen Schläfer. Sensoren an dessen Körper leiten Meßwerte über Kabel an Aufzeichnungsgeräte: nächtliche Routine in einer amerikanischen Schlafklinik. Aus den Daten können die Forscher den »kranken Schlaf« erkennen – zum Beispiel im Vergleich mit dem »Schlafprofil« eines Gesunden (unten) – und daraus Schlüsse für eine Therapie ziehen







## REM-PHASE

linkes Auge horizontal

rechtes Auge horizontal

linkes Auge vertikal

rechtes Auge vertikal

Kinn

Mundboden

Hirnströme linke Ableitung

rechte Ableitung

links gegen rechts

Aktogramm (Bett)

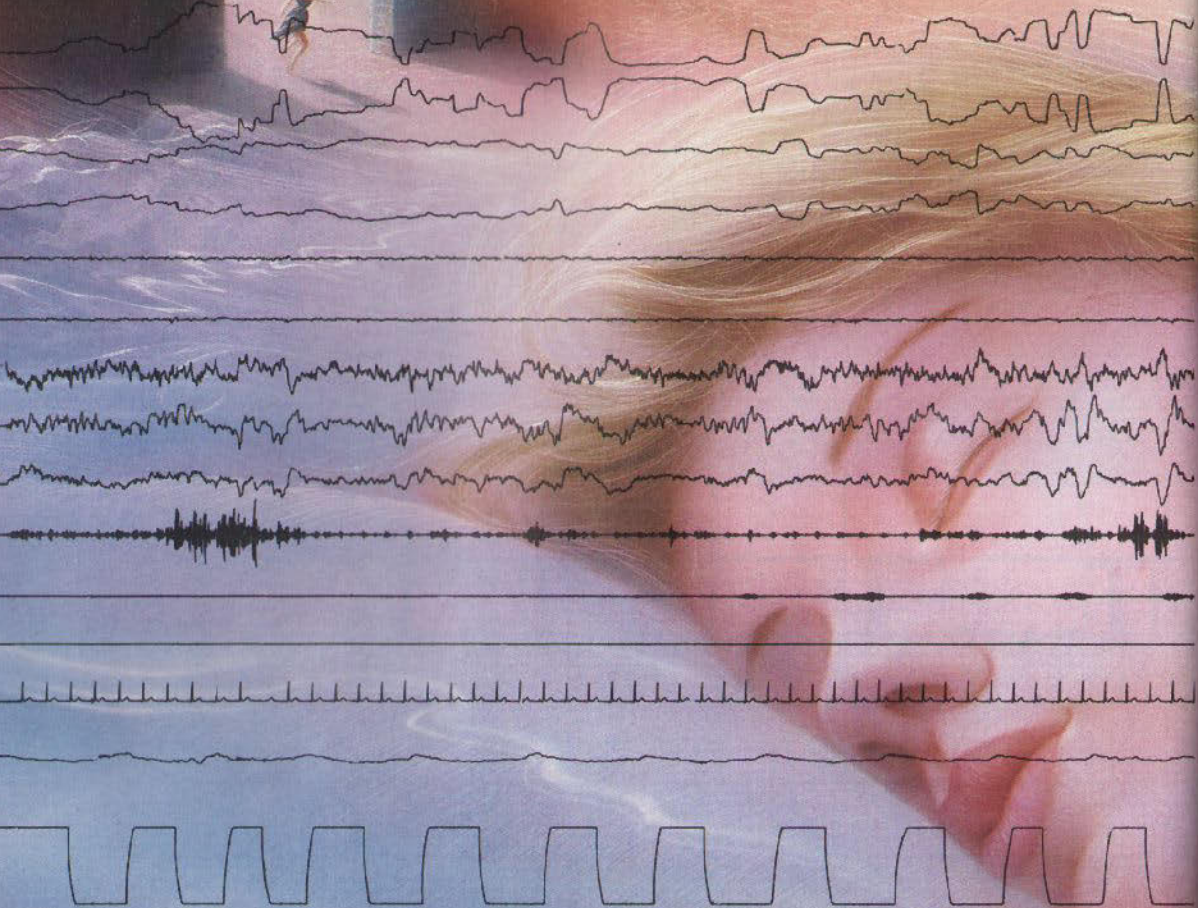
Geräusche

Aktogramm (Fußboden)

Herztätigkeit (EKG)

Atmung (Brust/Bauch)

Atmung (Nase)

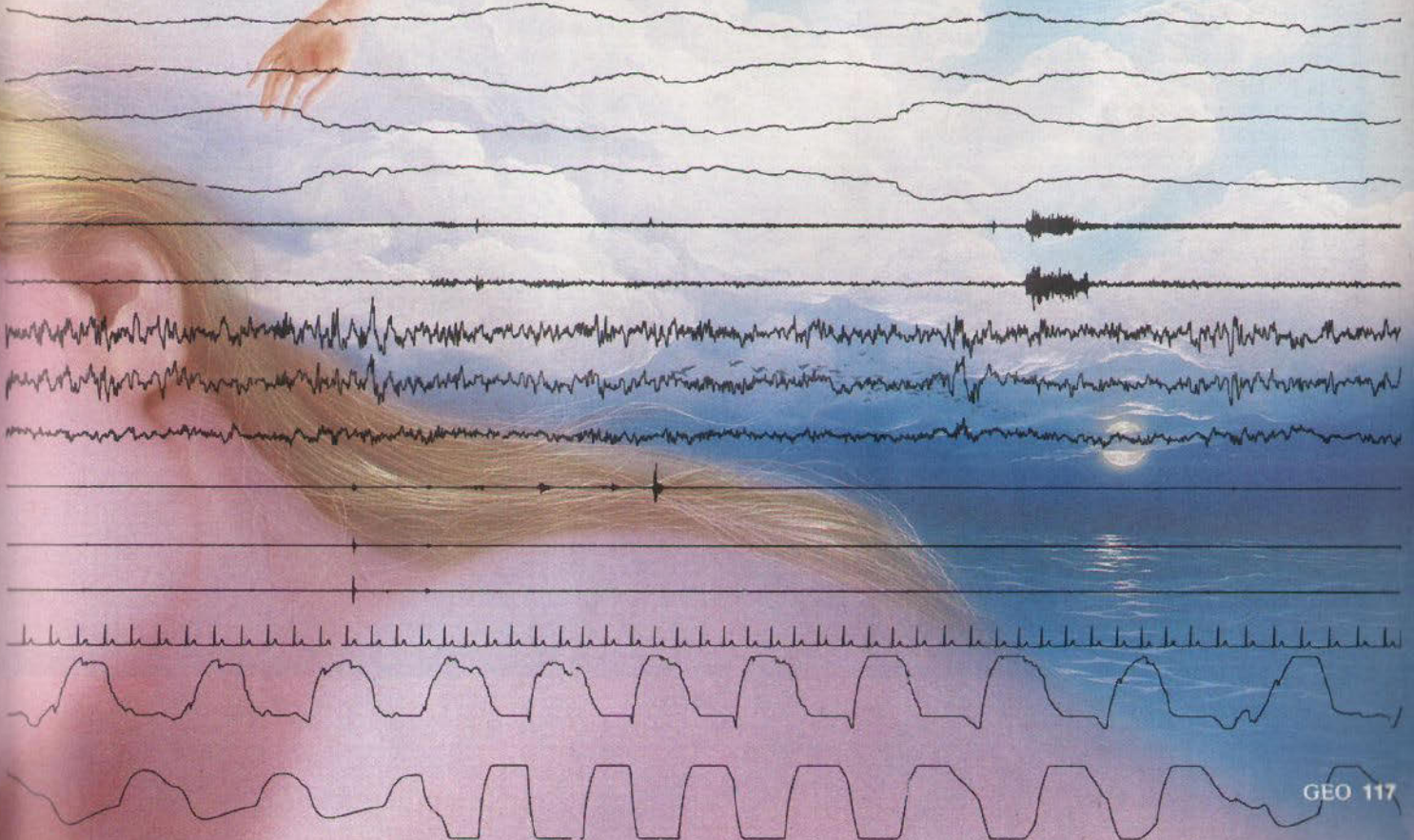




## Wenn im Theater des Traumes die Augen rollen

In Schlaflabors zeichnen Forscher ein gutes Dutzend verschiedener Meßgrößen des Schlafers auf. Heftige Augenbewegungen – »Rapid Eye Movements« – haben der »REM-Phase« ihren Namen gegeben (Kurven auf der linken Seite). In den Phasen des tieferen »Non-REM«-Schlafes sind sowohl Augen wie Hirnströme ruhiger (rechte Seite). Gleichwohl bleiben die Träume das große Geheimnis des Schlafes – den Meßkurven, wissenschaftlichen Theorien und sonstigen Deutungen zum Trotz

NON-REM-PHASE





**T**odmüde und dennoch hellwach. Die Träume finden ohne mich statt. Wälzen in fremden Betten, aufstehen, frösteln. Blicke aus dem Hotelfenster ins Nichts der Nacht. Noch ein Versuch, einzuschlafen. Vergebens. Kalifornien ist weit weg von Hamburg. Neun Zeitzonen. „Jet Lag“ heißt der Teufel des Fernreisenden.

Als Stuart Rawlings mir einen Styroporbecher herüberschiebt, bis zum Rand dampfend-glasig-braun gefüllt, schlägt meine innere Uhr im mitteleuropäischen Rhythmus bereits Feierabend. Zerschlagen wie nach einer durchzechten Nacht sitze ich am Konferenztisch des Sleep Center der Stanford University. Der Kaffeeduft schmeichelt dem müden Gehirn. Hier wird erforscht, worin wir uns alle für Experten halten, interdisziplinär: der Schlaf.

„Der Kaffee wird Ihnen guttun, wegen des Koffeins“, sagt der Hobbyzauberer Rawlings, der sein Geld als Pressesprecher des Schlafzentrums verdient. „Über den Jet Lag forschen wir hier auch.“ Der Kaffee schmeckt erbärmlich, aber er wirkt. Koffeingestärkt lasse ich mir das Institutsmaskottchen präsentieren.

Sam kennt die Prozedur. Begleitet vom heiseren Geklaff seiner sieben Zellengenossen, läßt er sich bereitwillig aus seiner Edelstahlbox heben. Ich folge dem weißbekittelten Wissenschaftler mit dem grauen Zwergpudel auf dem Arm durch die leeren, neontristen Gänge des Tierlabors. Von hier, ein paar Meter unter einem Parkplatz des Stanford University Medical Center, ist die kalifornische Sonne verbannt. Kaltes Kunstlicht gibt den falschen Takt für Tag und Nacht, damit die Versuchsergebnisse reproduzierbar bleiben – wiederholbar wie Sams eigenartige Schlafanfälle.

Im weiß lackierten Versuchsraum hält der Physiologe Scott Bowersox dem Hund einen Brocken Trockenfleisch unter die schnuppernde Nase. Dessen schwanzwedelnde Freude verliert sich rasch, der zarte Körper zittert, schwankt, bricht zusammen und bleibt schließlich eine knappe Minute regungslos auf dem kalten Boden liegen.

„Ist das nicht phantastisch“, freut sich der Forscher. Seine Gummihand tätschelt den Kopf des Hundes.

Sam leidet an Narkolepsie. Die seltsame „Schlafsucht“ befällt auch einen von etwa 4000 Menschen. Bei Sam genügt die Freude auf den leckeren Batzen, um einen Schlafanfall auszulösen.

„Schlafstörungen können gar nicht wichtig genug genommen werden“, sagt William Dement. Mit ein paar Zahlen aus seinem Standardrepertoire umreißt der

58jährige Arzt, Physiologe und Professor für Psychiatrie ein gewaltiges gesellschaftliches Problem. Ein Drittel aller Amerikaner, sagt er, klage über Schlafstörungen, sechs Prozent suchten derentwegen einen Arzt auf. Daß davon etwa die Hälfte die Praxis ohne brauchbare Diagnose, aber mit einem Rezeptzettel für ein Schlafmittel wieder verlasse, sei alarmierend.

Solang wir ihn ungestört Nacht für Nacht erleben, gehört der Schlaf zu den süßen Selbstverständlichkeiten des Lebens. Scheinbar den Befehlen einer geheimen Macht gehorchend, versinken die meisten Menschen und Tiere täglich für einige Stunden in Morpheus' Schoß. Dort finden wir Erholung, erleben das phantastische Theater der Träume, das die Menschen aller Kulturen von jeher tief bewegt.

Doch warum müssen wir überhaupt schlafen? Wozu sind Träume gut? Erst im 20. Jahrhundert haben sich Wissenschaftler aufgemacht, Schlaf und Traum zu entschlüsseln. Seit Anfang der fünfziger Jahre hat sich die Schlafforschung zu einer eigenen Disziplin entwickelt, die eine Reihe aufregender Erkenntnisse gewonnen hat. Mit Hilfe von Hirnstromableitungen, des Elektroenzephalogramms, gelang es Forschern, den Schlaf in unterschiedliche Phasen aufzuteilen. Innere Uhren wurden entdeckt, die täglich nachgestellt werden müssen. Mit neuen Analyseme-

### 300 Meter Papier: Das Meß-Protokoll einer einzigen Nacht



Gespickt mit Elektroden und geschützt vor Dauerlicht durch eine rote Brille, bringt ein Freiwilliger die Nacht im Schlafforschungszentrum der Stanford University. Dessen Chef William Dement muß in den Flur gehen, um die Länge der »Polysomnogramm« genannten Aufzeichnungen einer einzigen Nacht zu demonstrieren: 300 Meter. Solche Protokolle haben mitgeholfen, die Ursache der Schlaflosigkeit eines alten Mannes, über dessen Kopf eine Assistentin Elektrodenkabel des EEG bündelt, zu diagnostizieren: eine chirurgisch beherrschbare Atemnot







thoden konnten Moleküle aufgespürt werden, die das nächtliche Geschehen steuern.

Die Stanforder Gruppe um William Dement gehört weltweit zu den aktivsten in der jungen Disziplin. Wissenschaftler unterschiedlichster Fachrichtungen arbeiten an fast allen wichtigen Fragen der Schlafforschung.

William Dement hat es geschafft, der ganzen Forschungsrichtung seinen persönlichen Stempel aufzudrücken. Er hat sein „Lebensziel“, wie er sich ausdrückt, erreicht. Im Jahr 1970 hatte er das Forschungszentrum um der Welt erste „Schlafstörungsklinik“ erweitert. Er wollte damit den kranken Schlaf zu einer eigenständigen klinischen Disziplin entwickeln – mit Erfolg, wie er heute sagt.

Der Mann mit dem schwarzen Schnauzbart und dem vollen grauen Haar hat mehr als einen Sieg in seiner Laufbahn verbucht. Meine müden Augen brauchen eine ganze Weile, bis sie die Sammlung von Medaillen und Urkunden an seinen Bürowänden überblicken. Ehrenmitgliedschaften, „Man of the Year“, Chefredakteur von „Sleep“, der wichtigsten Zeitschrift für Schlafforscher, Mitglied der amerikanischen Akademie der Wissenschaften.

Dement mischt überall mit. Selbstverständlich wurde der Gründer der „Gesellschaft zur Erforschung des Schlafes“ 1986 auch Vorsitzender der „Vereinigung der professionellen Schlafgesellschaften“. Und als bisher einziger Präsident der 1975 gegründeten „Vereinigung der Schlafstörungszentren“, deren Vereinselement sich hintergründig altchinesisch mit Yang und Yin schmückt, freut er sich: „Die Zahl der Schlafkassen wächst und wächst“ – in den Vereinigten Staaten sind es bald 1000. Dazu kommen rund 50 Schlaf-Forschungszentren.

Und Europa?

„Nur eine Handvoll“, lautet die höflich zögerliche Antwort.

Und die Bundesrepublik?

Der Cocker-Spaniel Tucker leidet unter Narkolepsie, »Schlafzwang«. Wenn ihm ein Bissen Trockenfleisch vor die Nase gehalten wird, fällt der Hund augenblicks schlafend zu Boden – wie immer, wenn er sich freut. Unter Narkolepsie leiden auch Menschen. Bei Anfällen sinken die Opfer sofort in den »REM-Schlaf«, begleitet vom Verlust der Muskelspannung, und kippen um

**Narkolepsie:  
Sobald sich Tucker freut,  
schläft er ein**

„Bei Ihnen ist man ein wenig zurück...“ Nur in weniger als einem Dutzend bundesdeutscher Städte können Schlafgestörte ihre nächtliche Not analysieren lassen. Ein Schlafzentrum wie das der Stanford University gibt es hierzulande nirgendwo – es paßt offenbar nicht in die bundesdeutsche Klinik- und Forschungslandschaft. Das liegt freilich auch an den Besonderheiten des amerikanischen Systems. Forschung, und medizinische allemal, wird in den USA interessant, sobald sie Gewinne verspricht. Und wo immer dort sich zahlende Patienten zeigen, entstehen auch bald die Kliniken.

Dements Stanforder Zentrum könnte als Wirtschaftsunternehmen mit dem Markenzeichen „Schlaf“ durchgehen. Jeder Cent, den die Forscher ausgeben, muß erst einmal eingespielt werden. Ein Hauch von Risiko, Aufbruch und Improvisation liegt über dem „Sleep Center“. Jeder Quadratmeter der verstreuten Büro- und Laborräume wird nach Bedarf von der Universität angemietet. Unrentable Teile des Wissenschaftsunternehmens mit einem Jahresetat von drei Mil-

lionen Dollar können jederzeit abgestoßen werden. Auch Menschen. Außer dem Chef und seinem engsten Mitarbeiter kann sich keiner der 30 bis 80 Institutsmitarbeiter, die meisten davon Wissenschaftler, in der Sicherheit einer Lebensstellung wiegen.

### Auf 300 Meter Papier sind die Geheimnisse des Schlafs verzeichnet

Christian Guilleminault, Endvierziger, kam vor ein paar Jahren nach Stanford, weil es in Europa für Schlafforscher keine Stellen gab. Der heimwehkranken „Franzose aus Überzeugung“ arbeitet an einer der Schaltstellen zwischen Grundlagenforschung und Medizin. Hier kommt der Psychiatrieprofessor mit Patienten zusammen, die nach Ansicht ihrer Hausärzte sämtlich an der Krankheit Schlaflosigkeit leiden. Eine solche Diagnose indes ist für die Stanforder Kliniker viel zu pauschal. Mehr als 900 Fragen lang ist der Katalog, dem sich jeder Neuankömmling stellen muß, bevor er hier als Patient aufgenommen wird.

Nach einer allgemeinen Untersuchung und einem Gespräch mit dem Arzt wird im Vorzimmer kassiert: 225 Dollar. Alle gängigen Scheckkarten sind willkommen. Die eigentliche Prüfung steht aber erst bevor: eine Nacht in einem der drei Analysezimmer der Klinik. Kostenpunkt: von 550 Dollar an upwards. Ein Drittel des Gesamtbudgets stammt aus den Kassen der Klienten oder deren Versicherungen.

Meine innere Uhr ist noch immer auf dem Weg nach Kalifornien, als ich in die nächtlich verlassene Klinik zurückkehre. Ned Arsenaault beachtet mein Gähnen nicht weiter. Müde Menschen sind sein allnächtliches Geschäft. Der hagere Techniker kennt nur Nachtschichten. In den freien Tagen den Rhythmus umzustellen, lohne sich nicht: „Dann wird es nur schlimmer.“ Ned, der Nachtmensch, läßt sich für 15 Prozent Zuschlag auf das Paradox der Schlafforscher ein: zu wachen, wenn andere schlafen, oder verzweifelt zu schlafen versuchen wie der alte Mann in Raum 2.

Nacht für Nacht sieht Ned solchen Kämpfen auf seinen kleinen blauen Monitoren zu. Seine größte Sorge ist, daß die Elektroden am Kopf der Patienten weiterhin gut sitzen. Denn sonst kann die Nacht für die Katz sein. Zwölf Stifte kratzen über Endlospapier, zeichnen die Signale von den Elektroden in Kurven um, durch die Hirnströme, Augen-, Mund- und Beinbewegungen, Herzschlag und Atemfrequenz registriert werden. Zwölf zitterige Spuren am Ende der Nacht, eine „Polysomnographie“, mit der die Technik dem Schlaf die wenigen Geheimnisse

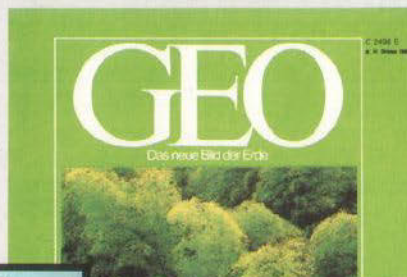




## Angebot mit 3 Vorteilen

- zur Anzeige auf Seite 164/165
- Gratis zur Begrüßung eine aktuelle GEO-Ausgabe
- Gratis 4 außergewöhnliche GEO-Farbdrucke
- Ca. 20% Preis-Vorteil = DM 2,- pro Heft gespart gegenüber Einzelpreis

### Detail-Garantie auf der Rückseite



Bitte  
mit 60 Pf  
freimachen,  
falls Marke  
zur Hand

Antwort-Postkarte

GEO  
Leser-Service  
Postfach 1116 29

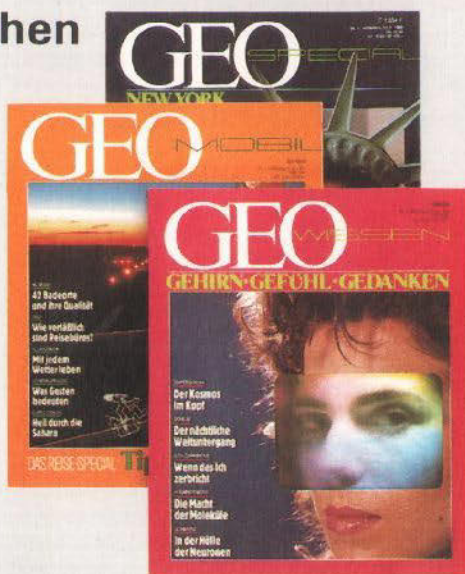
2000 Hamburg 11

## GEO-Sonderreihen für Leser, die noch mehr wissen wollen

### GEO-SPECIAL:

Die Sonderreihe GEO-SPECIAL behandelt immer ein Thema umfassend und ausführlich in fesselnden Reportagen und mit einzigartigen Fotos. Dazu Hintergrund-Informationen und Insider-Tips zum Einkaufen, für Ausflüge, Theater, Restaurants, Hotels usw. Mit GEO-SPECIAL werden Sie zum Kenner des jeweiligen Gebiets. Jedes SPECIAL hat mind. 160 Seiten. GEO-Heft-Format. Noch lieferbar sind die Ausgaben: »Texas«, »Bonn«, »Mexiko«, »Irland«, »New York«, »Wien«, »Schweiz« und »Rom«.

Bitte lesen Sie auf der Rückseite weiter.



Bitte  
mit 60 Pf  
freimachen,  
falls Marke  
zur Hand

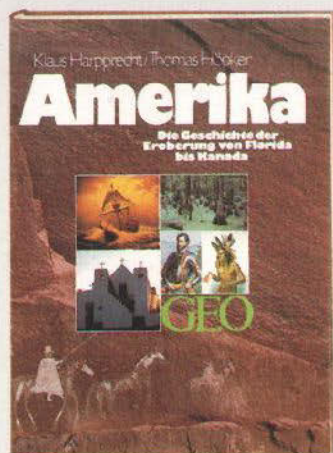
Antwort-Postkarte

GEO  
Versand-Service  
Postfach 600

7107 Neckarsulm

## Bücher von GEO – so farbig und fesselnd wie unsere Welt

In den Büchern von GEO wird unsere viel-gesichtige Welt auf neue Weise erlebbar; sie widmen sich faszinierenden Themen, vermitteln Information und Wissen aus erster Hand. Inhalt, Ausstattung und Umfang entsprechen der hohen GEO-Qualität: Bücher von GEO haben 350 Seiten und mehr, im Format 20,5x28 cm, Leineneinband und farbigen Schutzumschlag sowie 250 bis 480 fast immer farbige Abbildungen.



Bitte  
mit 60 Pf  
freimachen,  
falls Marke  
zur Hand

Antwort-Postkarte

GEO  
Presse-Versand-Service  
Postfach 600

7107 Neckarsulm



## Abruf-Karte für ein GEO-Abonnement

**JA, ich nehme Ihre Einladung an.**

Schicken Sie mir bitte kostenlos die GEO-Begrüßungs-Edition, dazu 4 GEO-Farbdrucke und die GEO-Dokumentation. Ich darf diese Geschenke auch dann behalten, wenn ich mich nicht für GEO entscheide. Nach Erhalt habe ich 14 Tage Zeit, GEO kennenzulernen. Nur wenn mich GEO überzeugt und ich nicht widerrufe, möchte ich GEO jeden Monat per Post frei Haus beziehen: Für nur DM 8,50 statt DM 10,50, also z. Zt. mit ca. 20% Preis-Vorteil. Ich kann keine Kündigungsfrist versäumen, denn ich darf jederzeit kündigen.

Name/Vorname \_\_\_\_\_

Straße/Nr. \_\_\_\_\_

Postleitzahl \_\_\_\_\_ Wohnort \_\_\_\_\_

Telefon-Nummer für evtl. Rückfragen \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_

Widerrufsgarantie: Diese Vereinbarung kann ich binnen einer Frist von 14 Tagen nach Erhalt des Probeheftes schriftlich widerrufen. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs an GEO-Leserservice, Postfach 1116 29, 2000 Hamburg 11.

Datum \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_

**Wenn ich bei GEO bleibe, bezahle ich bequem und bargeldlos durch ¼-jährliche Bankabbuchung DM 25,50**

Bankleitzahl (bitte vom Scheck abschreiben): \_\_\_\_\_

Meine Kontonummer: \_\_\_\_\_

Geldinstitut: \_\_\_\_\_

**Ich möchte statt ¼-jährlicher Bankabbuchung lieber eine Jahresrechnung (12 Hefte DM 102,-).**

Bitte ankreuzen, falls gewünscht: ☐

Auslandspreise: Schweiz Fr. 8,50 statt Fr. 10,50 Einzelpreis.

Österreich: S 65,- statt S 80,- Einzelpreis.

Sonstiges Ausland: DM 8,50 zuzüglich Porto. 81272 A/O

## Bestell-Karte für GEO-Sonderreihen

**JA, ich möchte die Möglichkeit nutzen und Ausgaben der GEO-Sonderreihen bestellen.** Bitte liefern Sie die von mir gewünschten Exemplare gegen Rechnung frei Haus. Das Porto und die Verpackung sind bereits im Preis enthalten. Senden Sie mir bitte den (die) folgenden Titel (Anzahl der gewünschten Exemplare bitte eintragen):

### GEO-SPECIAL:

- ☐ »Texas« (F 8504) DM 12,80
- ☐ »Bonn« (F 8506) DM 12,80
- ☐ »Mexiko« (F 8602) DM 12,80
- ☐ »Irland« (F 8603) DM 12,80
- ☐ »New York« (F 8604) DM 13,50
- ☐ »Wien« (F 8605) DM 13,50
- ☐ »Schweiz« (F 8701) DM 13,50
- ☐ »Rom« (F 8702) DM 13,50

- ☐ GEO-MOBIL Frühjahr/Sommer '87 (J 8701) DM 7,50
- ☐ GEO-MOBIL Herbst/Winter '87 (J 8702) DM 7,50 (erscheint im September)
- ☐ GEO-WISSEN Ausgabe 1/87 (K 8701) DM 13,50
- ☐ GEO-WISSEN Ausgabe 2/87 (K 8702) DM 13,50 (erscheint im Oktober)

Name/Vorname \_\_\_\_\_

Straße/Nummer \_\_\_\_\_

Postleitzahl \_\_\_\_\_ Wohnort \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_ 81273

## Bestell-Karte für die Bücher von GEO

**JA, bitte liefern Sie mir gegen Rechnung und mit 10 Tagen Rückgaberecht folgende Bücher von GEO:** (Anzahl der gewünschten Exemplare bitte eintragen):

- ☐ »Amerika« (X 7996) DM 98,-
- ☐ »Die New York-Story« (X 2056) DM 98,-
- ☐ »Die amerikanische Reise« (X 7029) DM 98,-
- ☐ »Die Wüste« (X 1665) DM 98,-
- ☐ »Die Sonne« (X 1720) DM 98,-
- ☐ »Tibet« (X 1721) DM 98,-
- ☐ »Bedrohte Paradiese« (X 4955) DM 98,-
- ☐ »Geburt eines Ozeans« (X 7030) DM 98,-
- ☐ »Der Planet der Meere« (X 2058) DM 98,-
- ☐ »Regenwald« (X 4572) DM 98,-
- ☐ »Verlorene Menschen« (X 4742) DM 98,-
- ☐ »Die Alpen« (X 2380) DM 98,-

Name/Vorname \_\_\_\_\_

Straße/Nummer \_\_\_\_\_

Postleitzahl \_\_\_\_\_ Wohnort \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_ 81274

## Detail-Garantie

- Gratis zur Begrüßung eine aktuelle GEO-Ausgabe und dazu 4 außergewöhnliche GEO-Farbdrucke, 42 x 30 cm groß: die 900jährige Bavaria-Buche (Abbildung auf der Vorderseite). Beide Geschenke gehören in jedem Fall Ihnen.
- Dazu: eine umfangreiche Dokumentation über GEO, die Ihnen zeigt, welche Themenbreite GEO bietet.
- Ca. 20% Preis-Vorteil, wenn Sie sich für GEO entscheiden. Sie sparen DM 2,- pro Ausgabe gegenüber Einzelpreis.
- Sie können keine Kündigungsfrist versäumen, denn Sie dürfen jederzeit absagen.

### GEO-MOBIL:

Tips, Tests und Trends fürs Reisen. Für alle, die Reisen planen, und für unterwegs als Ratgeber. GEO-Heft-Format, ca. 160 Seiten. Die Ausgabe Frühjahr/Sommer '87 liegt vor.

### GEO-WISSEN:

Reportagen aus der Wissenschaft. Für alle, die neugierig sind, die gern mehr wissen wollen. Mitleser, die sich für GEO-WISSEN interessieren, können ebenfalls mit dieser Karte bestellen.

## Ihre Garantie, wenn Sie Bücher von GEO jetzt bestellen:

- Sie können jedes Buch 10 Tage lang kostenlos zu Hause prüfen und sich so Ihr eigenes Urteil bilden.
- Sie gehen mit dem Abruf des Buches keinerlei Verpflichtungen ein.
- Sie haben das Recht, jedes Buch innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt ohne Begründung zurückzuschicken. Damit ist alles für Sie erledigt.

Alle Preise inkl. MwSt., Porto und Verpackung.

Ausland: Lieferung nur gegen Vorkasse per Scheck zuzüglich DM 3,-.



entrissen hat, die sich mit Elektroden abtasten lassen.

Den Arzt erwartet am nächsten Morgen eine Papierbahn von 300 Meter Länge, die er Zentimeter um Zentimeter auswerten muß. So umständlich das Verfahren auch sein mag, es hat sich bewährt: Gängige Störungen – wie Atemnot oder Rhythmusstörungen – werden fast immer erkannt. Erst jetzt deutet sich eine elegantere Lösung an: German Nino-Marcia und seine Assistentin Sharon Keenan, auch sie Mitarbeiter in Dements Zentrum, füttern die von 30 Kopfelektroden aufgezeichneten Aktivitäten der verschiedenen Hirnregionen in einen Computer ein. Der Rechner setzt die Signale in farbige Karten – „brain maps“ – um. Zur Zeit sind die bunten Muster noch unverständlich. Aber sie könnten in Zukunft die Aktivität des schlafenden Gehirns sichtbar machen, könnten vielleicht einmal unverwechselbare Kennzeichen für bestimmte Schlafstörungen signalisieren.

Ned winkt mich herüber. „Hier, sehen Sie mal, Raum 2 atmet überhaupt nicht.“ Augenblicklich ist meine Müdigkeit verschwunden. Länger als 20 Sekunden lang zieht einer der Stifte eine unruhige Schlangenlinie aufs Papier: Die Lungen des Mannes haben aufgehört zu arbeiten. Dann plötzlich spritzt die Tinte über den gleichmäßig dahinziehenden Papierbogen, wirre Zacken hinterlassend. „Raum 2“ ist wieder wach. Auf dem Monitor sehen wir, wie sich der Patient im zerwühlten Bett auf die andere Seite wirft. „Wahrscheinlich hat er regelmäßig solch lange Atemstillstände“, vermutet Ned und geht in die Schlaf-Testkammer. Auf dem Bildschirm sehe ich, wie er die Elektroden auf dem Kopf des alten Mannes überprüft.

### **Wieder Luft für die Lungen, wenn der Unterkiefer verrückt worden ist**

Etwa ein Viertel der Versuchsschläfer wird als „Pseudo-Insomniker“ nach Hause geschickt: Obwohl sie schlecht zu schlafen meinen, zeigen die Analysen, daß ihr Schlaf durchaus normal verläuft. Von den wirklich an Schlaflosigkeit Leidenden, in der Regel schwere Schnarcher, haben etwa drei Viertel Atemstörungen im Schlaf, sogenannte Schlaf-Apnoen. In manchen Fällen stellen die Lungen ihre Arbeit ein, sobald der Kranke eingeschlafen ist. Die Atemlosigkeit erzwingt dann ein Erwachen. Wenn, wie bei über 90 Prozent der Apnoeiker, physiologische und anatomische Gründe für die nächtliche Atemlosigkeit ausgemacht werden, kann meist geholfen werden. Manchen einfach durch Abspecken, anderen durch chirurgische Eingriffe – etwa



**Die Selbstverständlichkeit des Schlafes hat der Schweizer Maler Ferdinand Hodler 1890 in seinem Bild »Die Nacht« eingefangen. Erst wenn die nächtliche Erholung ausbleibt, wird uns ihr Wert bewußt: Ein Drittel aller Amerikaner beispielsweise klagt über starke Schlafstörungen**

### **Die sanfte Macht gesunden Schlummerns**

durch ein Versetzen des Unterkiefers. Oder mit einer mechanischen Atemhilfe aus der Intensivmedizin, dem CPAP-Gerät. Hinter der Abkürzung verbirgt sich „Continuous Positive Airway Pressure“.

Der Apnoeiker in Raum 3 probiert die Apparatur gerade aus. Deutlich ist sein regelmäßiges Atmen durch die Schlauchverbindung zum Kontrollraum zu hören. Über einen Nasenvorsatz aus durchsichtigem Kunststoff wird dem Patienten beim Einatmen ein wenig Druckluft in die Atemwege gepumpt. Und das funktioniert. Der Mann, der noch vor wenigen Tagen kaum ein Auge zugetan hat, schläft durch.

Hinter Schlafstörungen verbergen sich oft Krankheiten, die dem Menschen auch den Tag zur Hölle machen können. In den Betten der Schlafklinik wälzen sich daher auch Alkoholiker und Schizophrene, Impotente und Depressive. Letzteren kann durch Schlafentzug zumindest teilweise geholfen werden: Nach einer durchwachten Nacht verschwinden die Depressionen für ein paar Tage. Seine Macht über unsere Befindlichkeit leiht sich der Schlaf vor allem auch von den inneren Uhren, deren Diktat wir uns lebenslang nicht entziehen können.

Manche Schlafprobleme sind hausgemacht, etwa die durch Schichtarbeit. Fast jeder fünfte bundesdeutsche Arbeitnehmer widersetzt sich – meist unfreiwillig – dem Gebot seines internen Schlaf-Wach-Rhythmus. Oder aber wir bringen unse-

ren Takt von Tag und Nacht durch Fernflüge über die Zeitgrenzen aus dem Lot. Diesen Jet Lag korrigiert unser Organismus glücklicherweise mit etwa eineinhalb Stunden Verzögerung täglich – nach Flügen gen Westen. Nach sechs Tagen müßte sich also auch meine innere Uhr an den Rhythmus der pazifischen Zeitzone angepaßt haben. Nach dem Rückflug von der amerikanischen Westküste nach Deutschland, also von West nach Ost, dauert die Anpassung dagegen länger – fast neun Tage.

Bei Wesley Seidel, einem jungen Pharmakologen im Stanforder Team, läßt sich aus dem Jet Lag Kapital schlagen. Wer erfolgreich an seiner von der Pharmaindustrie finanzierten Studie teilnimmt, kriegt neben einem Freiflug von San Francisco nach Tokyo und zurück am Ende sogar noch 500 Dollar ausbezahlt. Der Haken am kostenlosen Transpazifik-Trip: Jeder Proband muß um die Zeit seiner Asienreise herum 37 Tage lang ein Schlafstagebuch führen sowie vor Beginn und nach Ende der zwölftägigen Reise insgesamt neun Nächte im Schlaflabor verbringen.

Das ist eine gemütlich eingerichtete Wohnung mit sechs Schlafzimmern und einem mit Polysomnographen vollgepackten Kontrollraum. Wesley Seidel testet an seinen reisenden Probanden, wie die Umstellungsschwierigkeiten mit Schlafmitteln verringert werden können. Für meine Abneigung gegen Schlaftabletten hat der Pharmakologe nur ein Kopfschütteln. Die hätten mir, so versichert er, bei meinem Jet-Lag-Problem auf jeden Fall besser geholfen als meine Abstinenzversuche: Ich hatte mich mit Gewalt wachgehalten – in der Hoffnung, von Mitternacht an durchzuschlafen zu können.

Seidels Kopfschütteln beruht auf den Ergebnissen seiner eigenen kürzlich abgeschlossenen Studie über das Schlafverhalten von Piloten. Eine Reihe der untersuchten Flieger hatte versucht, genau wie ich nach meiner Ankunft, sich mit Gewalt wachzuhalten, um sich kurz vor dem



nächsten Flug mit Schlaf zu „erfrischen“. In den meisten Fällen geht, wie der Pharmakologe herausfand, diese Taktik jedoch nicht auf: Einige Piloten gingen dadurch sogar ziemlich schläfrig an die Arbeit, manche litten unter regelrechten Schlafstörungen.

„Das Problem kann man gar nicht ernst genug nehmen“, sagt Seidel. Bei vielen Katastrophen der letzten Jahre – Harrisburg, Challenger oder Tschernobyl – habe Schlafmangel eine Rolle gespielt. Einen Vorteil von Schichtarbeit räumt er allerdings ganz offen ein: „Sie bringt der Schlafforschung Geld.“ Die Stanford-Gruppe bekommt etwa ein Drittel ihres Etats von der Industrie finanziert.

### Volle Blasen haben keinen Einfluß auf das Nachttheater im Gehirn

Die Grundlage der modernen Schlafforschung wurde indes mit staatlichen Geldern gelegt. Vor 34 Jahren war William Dement als Assistent des Schlafforschers Nathaniel Kleitman in Chicago bei einer wichtigen Entdeckung dabei. Dement gab dem Phänomen, das die Wissenschaft damals in Aufregung versetzt hat, den Namen „Rapid Eye Movement“, besser bekannt unter dem Kürzel REM.

Einem Doktoranden, der neben den Hirnströmen auch die Augenbewegungen eines Schlafenden aufgezeichnet hatte, war aufgefallen, daß in regelmäßigen Abständen Phasen schneller Augenbewegungen auftreten. Außerdem wurde entdeckt, daß wir in diesen durchschnittlich alle 90 Minuten auftretenden Phasen immer träumen. Schlaf besteht demnach nicht aus gleichförmigem Hindämmern, sondern aus zwei grundlegend verschiedenen Zuständen, REM und NonREM genannt, die einander periodisch ablösen.

Nutznießer der Entdeckung waren zunächst vor allem die Traumdeuter und -forscher. Sie hatten bis dahin nur an den Traumfetzen herumdeuteln können, deren sich Schlafende am Morgen noch erinnerten. Nun konnten sie – freiwillige – Schläfer aus einer REM-Phase reißen und ausführliche Berichte über die Trauminhalte abfragen, und das oft mehrfach pro Nacht.

Mit der Entdeckung der REM-Phasen geriet eine der entscheidenden Stützen der psychoanalytischen Theorie, Sigmund Freuds Traumdeutung, in den Bereich experimenteller Überprüfbarkeit. Der Wiener Nervenarzt hatte angenommen, die Funktion der Träume bestehe darin, Wünsche des „Unterbewußten“ – kindlich-sexuelles Begehren – durch „Traumarbeit“ so zu verändern, daß sie das schlafende „Ich“ nicht wiedererkennt und es somit von ihnen nicht geweckt

wird. Durch seine „Wächter“-Funktion verschleierte der Traum tiefere Wahrheiten über den Träumenden. Diese könnten durch den Psychotherapeuten in einer Art umgekehrten Interpretationsprozeß wieder ans Licht gebracht werden.

Auch William Dement beteiligte sich zu Beginn seiner Forscher-Karriere an der experimentellen Traumforschung. So versuchte er, mit einer Reihe von Experimenten zu klären, ob Träume tatsächlich Wunschprojektionen sind. Er ließ Versuchspersonen hungrig oder durstig schlafen, um zu sehen, ob sie sich in ihren Träumen die Wünsche nach Essen und Trinken erfüllen. Ergebnis: Das taten die meisten zwar nicht, doch ein Teil der durstig Schlafenden träumte zumindest von Getränken. Mit anderen Versuchen wollte der Forscher herausfinden, ob bei Schlafenden, die mit prallvoller Blase zu Bett gegangen waren, der Wunsch, sich zu entleeren, durch Träume verhindert werde. Resultat: Probanden erwachten aus traumlosem Schlaf nicht häufiger wegen des Blasendrucks als aus den Traumstadien.

Im Laufe der Jahre mußten sich die Schlaf- und Traumforscher von einigen schönen Vorstellungen trennen: Weder schützen uns Träume vor dem Wahnsinn, noch führt ein Entzug des REM-Schlafes dahin. Falsch war auch die Vermutung, allein die Perioden der schnellen Augenbewegungen im Schlaf repräsentierten die Traumphasen. Denn nur in 80 Prozent der REM-Phasen wird geträumt. Dagegen sind auch etwa 60 Prozent des Non-REM-Schlafes mit Bewußtseinsvorgängen angefüllt, die teilweise nicht von den REM-Träumen zu unterscheiden sind.

Bis heute ist es der experimentellen Traumforschung nicht gelungen, die Theorie Freuds zu widerlegen – die damit allerdings auch keineswegs bewiesen ist. Wahrscheinlich gelingt dies überhaupt erst nach der Aufklärung der physiologischen Grundlagen des nächtlichen Theaters.

Die Front der Freud-Anhänger begann indes schon vor Jahren zu bröckeln. Als



Von der Wiege bis zur Bahre, liegend, sitzend oder stehend, im Bett und in der Bahn, auf einer Geländerstange balancierend ebenso wie – kopfüber, kopfunter – schwerelos im All: Schlafen muß jeder Mensch. Säuglinge schlummern täglich etwa 18 Stunden; Erwachsene fühlen sich meist schon nach sieben bis acht Stunden munter

**Den  
Seinen gibt der Herr  
den Schlaf**





die Physiologen Robert McCarley und Allan Hobson von der Harvard University 1981 auf dem Kongreß der Amerikanischen Psychiatrischen Vereinigung eine neue Traumtheorie zur Diskussion stellten, meinten zwei Drittel der Kongreßteilnehmer in einer Abstimmung, nun sei die psychoanalytische Theorie nicht länger haltbar.

Die „Aktivations-Synthese-Theorie“ McCarleys und Hobsons besagt, daß Träume den Versuch unseres auch im Schlaf existenten Bewußtseins widerspiegeln, den sinnlosen, spontanen Aktivierungen einzelner Hirnpartien sinnvolle Geschichten zu unterlegen. Ausgelöst würden diese Aktivierungen durch ein Feld großer Nervenzellen – „Riesenneuronen“ – im Hirnstamm, deren Nervenfasern mit unterschiedlichen Regionen im Großhirn verknüpft sind.

### Ohne Hund ist kaum zu erfahren, was der Schlaf eigentlich ist

Diese Theorie harrt indes genauso der experimentellen Bestätigung oder Widerlegung wie Freuds Vermutung – oder jene Hypothese des Amerikaners Graeme Mitchison und seines britischen Partners Francis Crick, des Medizin-Nobelpreisträgers und Mitentdeckers der Doppelhelix-Struktur der Erbsubstanz DNS. Die beiden versuchten mit ihrer 1983 veröffentlichten Arbeit zu erklären, weshalb wir überhaupt träumen. Demnach dienen die Träume allein dem Verlernen. Sie sollen – als eine Art „Mülldeponie des Geistes“ – beseitigen, was dem Gehirn nicht zuträglich ist. Träume erhalten danach unser Denkgorgan realitätsstauglich.

William Dement wagt sich heute kaum noch aufs dünne Eis der Traumforschung. In seiner Gruppe beschäftigt sich nur noch Stephen LaBerge mit dem nächtlichen Geschehen. Er erforscht „luzides Träumen“, eine Psycho-Technik, die Träume bewußt erleben läßt. Sie könnte vielleicht helfen, Alpträumen zu entgehen, oder auch helfen, wie ein Prospekt des Sleep Center verheißt, „höchste Sehnsüchte zu erfüllen“. Die Flaute der Traumforschung in den USA hat auch typisch amerikanische Gründe. Stuart Rawlings: „Für Träume gibt es in diesem Land kaum noch Geld.“

Heute, in der Blütezeit von Molekularbiologie und Biochemie, fließen dagegen die Dollars reichlich in jene Labors, die ungeklärte Fragen des Schlafs mit Methoden wie Chromatographie, Sequenzanalyse oder Nervenstromableitung attackieren: Was steuert den Schlaf? Was passiert im REM-schlafenden Gehirn? Warum müssen wir überhaupt schlafen?

Das Stanforder „Sleep Center“ ist selbstverständlich dabei. Scott Bowersox



hat inzwischen Sam gegen Tucker ausgetauscht. Der junge Cockerspaniel „funktioniert“ noch eindrucksvoller als sein Zwergpudel-Nachbar. Beim leisesten Anflug von Freude streckt er alle Viere von sich. Tucker hat die schwere Narkolepsie von seinen Eltern geerbt. „Die Nachzucht dieser Tiere ist alles andere als leicht“, meint der Physiologe. Klar: Sobald ein narkoleptischer Hund sexuelle Begierde verspürt, schläft er auch schon ein. Deshalb sind die Stanforder auf ihre narkoleptische Nachzucht, weltweit die einzige, auch so stolz.

Narkoleptischer Schlaf ist kein gewöhnlicher Schlaf. Anders als ein gesunder Schläfer verfällt ein Narkoleptiker bei seinen Anfällen sofort in einen REM-Schlaf, begleitet von einem „Kataplexie“ genannten Verlust der Muskelspannung. „Deshalb sind diese Hunde für uns auch so wichtig“, erläutert Bowersox, während er mit einem Papiertuch Tuckers Urin vom Boden wischt. „In ihnen stecken wahrscheinlich die Antworten auf die meisten unserer Fragen. Wenn wir die Narkolepsie verstehen, die ja eigentlich eine REM-Erkrankung ist, begreifen wir

vielleicht, was Schlaf überhaupt bedeutet.“

Bei immunologischen Untersuchungen haben die Stanforder Forscher im Blutserum der schlafkranken Hunde eine das körpereigene Abwehrsystem reizende Substanz – ein „Antigen“ – gefunden, die auch in allen narkoleptischen Patienten nachgewiesen werden konnte. Dies legt nahe, daß Narkolepsie nicht nur vererbbar, sondern auch eine Autoimmun-Erkrankung ist. Dabei greift das Immunsystem körpereigenes Gewebe an. Zwei Gene haben die Wissenschaftler als denkbare Ursache des Defekts im Verdacht. Ihnen wollen sie jetzt auf die Spur kommen.

„Man muß flexibel sein“, sagt Thomas Kilduff. Sein Team ist in einem weißgetünchten, mit Geräten vollgestopften Kellerschlauch unter dem Anatomischen Institut der Universität untergebracht. „Wenn sich irgendwo ein hoffnungsvoller neuer Weg andeutet, muß man die Tür aufstoßen und ihn beschreiten.“ Die Geldgeber sind offenbar derselben Meinung: In den Narkolepsie-Topf seines Budgets fließt mittlerweile der Löwenan-

teil der Mittel für die schlafrelevante Grundlagenforschung.

Nachdem Kilduff mir von winterschlafenden Backenhörnchen, alternden Katzen als Apnoe-Tiermodell und dem voll computerisierten Polysomnogramm einer Ratte erzählt hat, sind wir schnell wieder bei Sam, Tucker und Genossen. In der Rückenmarksflüssigkeit dieser Hunde steckt Thomas Kilduffs Überzeugung nach ein weiterer Puzzlestein zur Lösung des Rätsels um den Schlaf: ein körpereigener Schlafstoff.

## Schlafen und träumen, wann und wie lange man will?

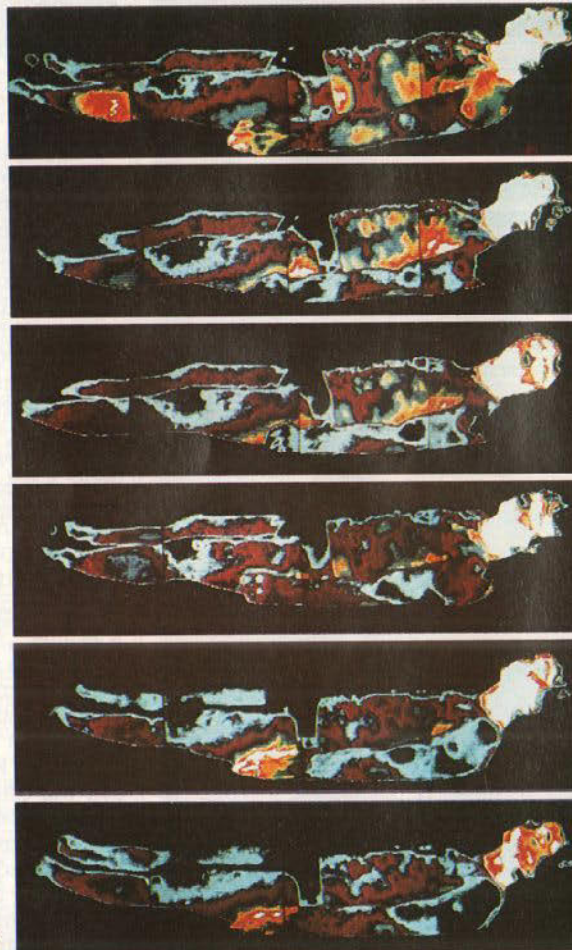
Die Idee ist keineswegs neu. Schon 1913 hatten französische Physiologen muntere Hunde zum Schlafen gebracht, indem sie ihnen Gehirnflüssigkeit von Artgenossen einspritzten, die sie vorher 500 Stunden lang wachgehalten hatten. „Hypnotoxin“ nannte Henri Piéron die in der Flüssigkeit vermutete Substanz, „Schlafgift“.

Zwar wurden diese Ergebnisse 1939 von einer amerikanischen Gruppe bestätigt, aber niemand nahm sie so recht ernst. Erst feinere Analysemethoden ermöglichten in den letzten Jahren neue Funde: Amerikanische, japanische und europäische Forscher entdeckten jeweils ein anderes „endogenes Schlafmittel“.

Wie so oft in der Geschichte der Hirnforschung führten neue Erkenntnisse auch hier zu einem komplizierteren Bild: Nicht einer, sondern viele Stoffe scheinen den Schlaf zu regulieren. Eine Substanz, die spezifisch den REM-Schlaf beeinflusst, hofft Scott Bowersox aus der Rückenmarksflüssigkeit seiner narkoleptischen Vierbeiner isolieren zu können. Durch seine Experimente glaubt er schon herausgefunden zu haben, daß es sich um einen Eiweißstoff handelt.

Vielleicht werden wir eines Tages unseren Schlaf regulieren oder sogar zu nicht geringem Teil auf ihn verzichten können. Für die Rationalisten, die sich ohnehin nur schwer damit abfinden können, ein Drittel ihres Lebens dahinzudämmern, mag das eine reizvolle Vorstellung sein. Für mich und andere Freunde des Schlafs wäre das jedoch eine perverse Utopie: Wer will sich denn die schönsten Stunden des Tages nehmen lassen?

Endlich, in der fünften kalifornischen Nacht, kann ich wieder ganz normal schlafen. Aber ich träume schlecht. Meine Wohnung in Hamburg ist verwüstet. Die Bücher sind aus den Regalen gerissen. Meine Tagebücher liegen über den Boden verstreut, ausgeschlachtet. Ich suche die fehlenden Seiten. Nichts. Mir wird heiß. Ich erwache. Die kalifornische Morgensonne scheint mir ins Gesicht. □



Nur mit einer Unterhose bekleidet ließ sich dieser Freiwillige im Laufe der Nacht mit einer Infrarot-Kamera aufnehmen. Das sensible Gerät registrierte feinste, für das Auge unsichtbare Temperaturunterschiede auf der Haut des Schlafers. Weiße Flecken sind wärmer als 35, schwarze kühler als 32 Grad Celsius. Die oberen drei Aufnahmen wurden von Mitternacht an in halbstündigem Abstand gemacht, die unteren um zwei, drei und vier Uhr. Das heiße Gesicht und die warmen Hände um drei Uhr morgens (vorletztes Bild) gehen offenbar auf einen zur gleichen Zeit ablaufenden Traum zurück

**Wenn  
Träume für warme Hände  
sorgen**



# Ist Ihre Strategie richtig?

**Wenn die Ergebnisse der Gehirnforschung richtig sind, müssen wir alle unser Verhalten ändern**

1951 begann Mewes, die Ursachen außerordentlicher Erfolge zu untersuchen. Warum sind einzelne Menschen und Unternehmen so erstaunlich erfolgreicher als die meisten anderen? Warum fließt ihnen wie von selber zu, was sich alle anderen mühsam und oft vergeblich erkämpfen müssen?

Bisher sieht man die Ursache in größerer Intelligenz, größerem Wissen, größerem Fleiß, Mut oder auch in Veranlagung, Glück oder Zufall. Mewes zeigte auf: Das ist falsch. Die wirkliche Ursache ist die bessere Strategie. Der Erfolg der Menschen und Unternehmen wird von ihrer Strategie bestimmt, d. h. davon, wie sie ihre Kräfte zielen. Je besser ihre Strategie, desto größer – ähnlich wie bei David gegenüber Goliath – die Wirkung ihrer Kräfte. Durch bessere Strategie gewinnen Kleinere und Schwächere über Größere und Stärkere.

Die Strategie hat eine „ganzheitliche Wirkung“. Das heißt: Ist die Strategie falsch, entwickelt sich auch alles andere falsch. Und umgekehrt: Man braucht nur seine Strategie zu verbessern, um sich automatisch auch alles andere verbessern zu lassen. Unter besserer Strategie entwickeln sich innerer Antrieb, Intelligenz, geistiger Vorsprung, soziale Anziehungskraft, Umsatz, Gewinn, Liquidität, Einfluß und Macht der Menschen und Betriebe ganz automatisch besser. Frage blieb: Wie ist das möglich? Die von Mewes aus der Praxis entwickelte Theorie ist inzwischen von den Erkenntnissen

der Gehirnforschung voll bestätigt worden.

Es ist nicht zu glauben: Seit Jahrhunderten haben sich Tausende von Wissenschaftlern mit der Frage beschäftigt, wie man Menschen am besten bildet, wie man sie besser, leistungsfähiger und erfolgreicher macht. Dabei entwickelte man gelehrte Theorien. Sie wurden zur Basis des öffentlichen Bildungssystems. Jeder muß durch seine Mühle. Aber nach einem wurde dabei nicht geforscht: Wie das menschliche Gehirn tatsächlich funktioniert. Das ganze Bildungswesen ist eine Rechnung ohne den eigentlichen Wirt: das menschliche Gehirn. Es funktioniert, wie man erst jetzt entdeckt, ganz anders. Es ist „kein Behälter, der gefüllt, sondern ein Feuer, das entfacht werden muß – und kann“. Wenn die neuen Erkenntnisse der Gehirn- und Verhaltensforschung richtig sind, dann ist unser Wissenschafts- und Bildungswesen fundamental falsch.

Nach den neuen Erkenntnissen der Gehirnforschung kann jeder Mensch (und jeder Betrieb) erheblich erfolgreicher werden als er ist. Aber dazu braucht er eine bessere geistige Strategie: Die von Mewes entwickelte EKS-Strategie. Sie entspricht den neuen Erkenntnissen über die Funktionsweise des menschlichen Gehirns und hat sich in der Praxis bereits vieltausendfach bewährt.

## MEWES-SYSTEM (EKS)

Im Trierischen Hof 7/n

6000 Frankfurt 1

Tel. (069) 29 44 43 (Tag + Nacht)

## Wissenschaftliche Beurteilungen

In einem internationalen Vergleich wurden die wichtigsten Managementlehren darauf untersucht, wie weit sie die Probleme, mit denen Mensch und Betrieb heute konfrontiert sind, tatsächlich lösen. Die EKS-Strategie erhielt die höchste überhaupt erreichbare Punktzahl. Mehr als doppelt soviel wie die nächste. Zitat: „Mewes entdeckte das allen Ereignissen zugrunde liegende Strategiegesez – nur das Modell von Mewes kann optimal bestehen...“ (J. Baur, European Management Programme der Hochschulen Amiens, Leeds, Bielefeld, 1976).

Der bekannte Biologe und Verhaltensforscher Prof. Dr. Hans Hass: „Die EKS (ist) eine brillante Lösung... sie zeigt einen Weg auf, der im Rahmen der weltpolitischen Situation von wesentlicher Bedeutung sein könnte“.

Der Nestor der Marketinglehre, Dr. Herbert Gross in „Die Chancen ändern sich – Gedanken zum Wachstum“ (ECON 1976): „Was Mewes so erfolgreich verwirklicht hat, ist keine materialistische, auch keine kapitalistische, sondern eine energetische Lehre, orientiert an den Spannungsverhältnissen... (sie) sei jedem empfohlen...“.

Prof. Bruno Wolf, Nürnberg: „Mewes hat durch die kreative Vernetzung von Prinzipien der Kybernetik mit dem Wachstumsgesetz Liebig's, dem Energiegesetz von Mayer/Helmholtz und der Evolutionstheorie Darwins intuitiv ins Schwarze getroffen“, Manager-Magazin, Hamburg, 6/1980.

Die EKS wurde inzwischen in über 60 wissenschaftlichen Arbeiten (Diplomarbeiten, Dissertationen, Fachbücher) untersucht und bestätigt.

## Praktische Erfolge

Prof. Dr. Lorenz Wolff berichtet in „Berufszufindung und Studienstrategie“, Köln 1983, wie ganze Gruppen von Hochschulstudenten unter Einfluß der EKS bei Stellensuche und Aufstieg deutlich erfolgreicher waren als vergleichbare Kommilitonen.

Dr. Sandmann, 49, hatte sich 22 Jahre lang bemüht, ins Top-Management zu kommen. Ohne Erfolg. Mit der EKS-Strategie schaffte er es in wenigen Monaten.

Fachbuchhandlung: „In knapp 18 Monaten habe ich mit Hilfe der EKS meinen Marktanteil bundesweit von 5 auf 50 Prozent steigern können...“.


Maschinenfabrik: „Unter dem Einfluß der EKS ist unser Umsatz von 25 Mio. DM (1975) über 180 Mio. (1978) auf 610 Mio. DM (1986) gestiegen...“.

Einzelhändler: „Mit der EKS haben wir in knapp 2 Jahren mehr erreicht als in 18 mühevollen Jahren vorher...“.

**Haben Sie eigentlich je über Ihre Strategie, also wie Sie Ihre Fähigkeiten, Kenntnisse und Kräfte am wirkungsvollsten einsetzen, konsequent nachgedacht? Es ist doch ganz klar, daß jemand, der seit 1951 mehr als 40 000 Angestellte und Betriebe bei der Verbesserung ihrer Strategie beraten hat, sehr viel mehr darüber weiß, als der einzelne in seinem ganzen Leben je erfahren kann.**

Telefonieren oder schreiben Sie: „Wünsche EKS-Information“ (kostenlos, unverbindlich, keine Vertreter).



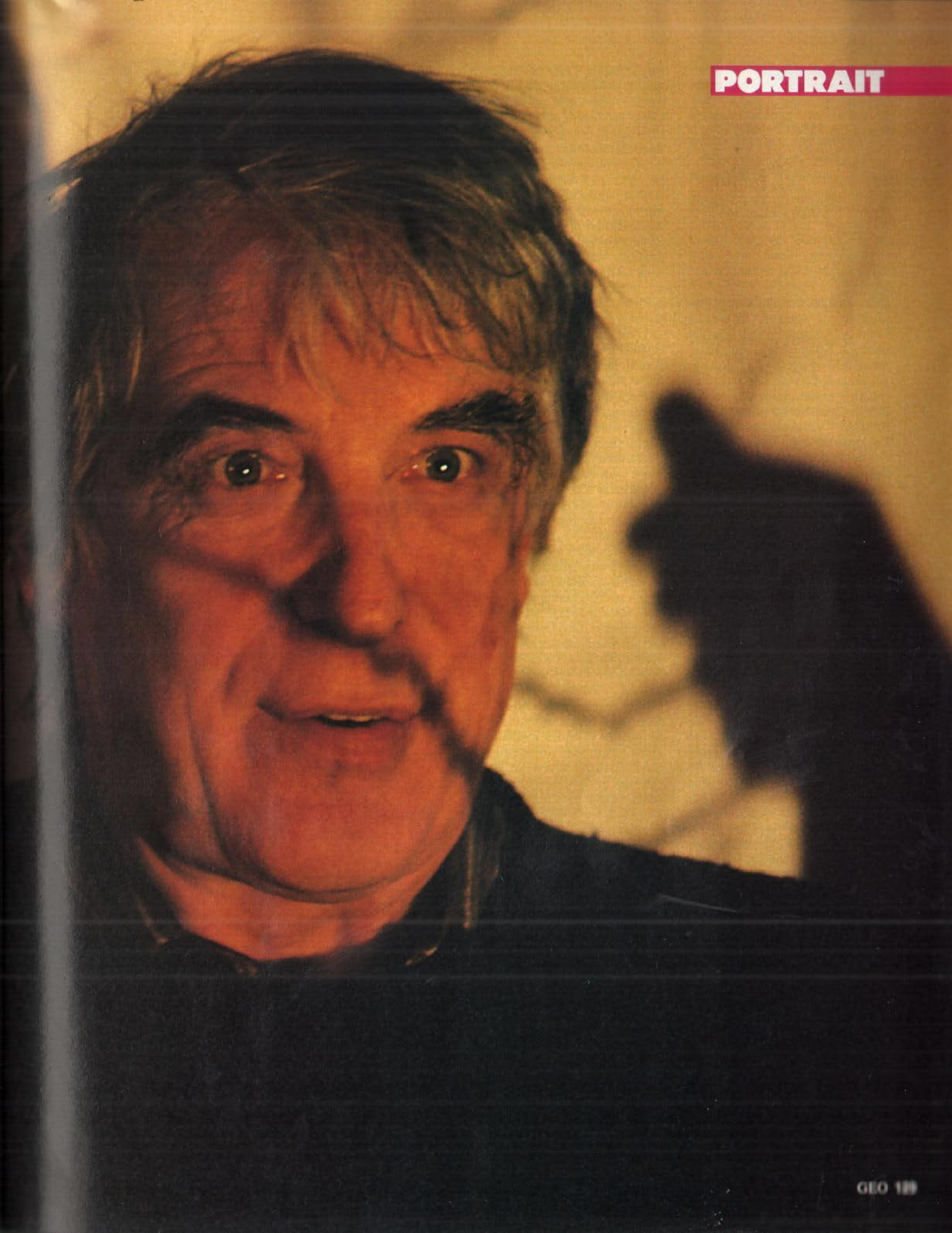


»Gehirngespinnste« lautet der Titel eines Buches von Valentin Braitenberg. Und für Hirngespinnste halten manche seiner Kollegen die weit ausgreifenden, oft spekulativen Theorien des Tübinger Professors. »Wer nicht ersticken will in der Menge des Detailwissens«, meint jedoch der Direktor am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, »der muß auch Entwürfe wagen, die nicht sofort im Labor überprüft werden können«

# In den Gespinnsten des Geistes



**PORTRAIT**





**Nicht was  
er treibt, sondern  
wie er das, was er treibt, be-  
handelt, unterscheidet  
den philosophi-  
schen Geist**

Friedrich Schiller: Antrittsvorlesung  
an der Universität Jena

**A**lles bucklig, bergig und krumm in diesem Tübingen. Licht wie schwäbischer Barock noch im November. Sanft brummend fährt mich das Taxi den Hügel hinauf, den ich vor zehn Jahren zum erstenmal hochgestrampt bin, um den berühmten Hirnforscher Valentin Braitenberg kennenzulernen.

Ich studierte Biologie und Philosophie im ersten Semester, eine Fächerkombination, von der ich mir mit der Zeit eine zwanglose Gesamtschau von Geist und Materie erhoffte.

Damals war mir das Buch „Gehirngespinnste“ von Valentin Braitenberg in die Hände gefallen, ein Diskurs über das Gehirn über jenes Gewebe, das gleichzeitig Materie und Geist, Natur und Kultur ist.

Beeindruckt von der scheinbaren Leichtfüßigkeit, mit der die Gedanken des Buches immer wieder den Abgrund zwischen Natur- und Geisteswissenschaften übertanzten, fasziniert von der Idee, die mikroskopischen Strukturen des Hirngewebes ließen sich deuten „wie Texte“, hatte ich mir ein Herz gefaßt und den Direktor am Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik um eine Audienz antelefonierte. „Kommen Sie halt am Nachmittag vorbei.“

„Grüßgottwiegehts.“ Die Arme im Nacken verschränkt, saß der damals noch schwarzhaarige Valentin Braitenberg hinter seinem Holzschreibtisch. Mit dem Charme des Professors, der es nicht nötig hat, den Professor zu spielen, plazierte er mich auf einen Schaukelstuhl mit rutschendem roten Kissen und sah mich neugierig, schalksnasig an.

Mit eulenspiegelhaftem Witz pries er den Nutzen des Denkens in der Forschung und den Nutzen seiner alten Schreibmaschine für

das Denken: Daß das Schreiben auf ihr so beschwerlich sei, das sei gerade das Gute an dem alten Ding. So erziehe sie ihn, genau zu überlegen, präzise und möglichst kurz zu formulieren.

„Doch mein wichtigster Erzieher ist dieses Gerät hier.“ Braitenberg hatte und hat noch heute ein Duo-Mikroskop auf dem Tisch stehen, in das man zu zweit hineinschauen kann. „Kein Mensch weiß, wie das Gehirn funktioniert. Aber fein zerschnitten unter dem Mikroskop ist es der interessanteste Gesprächspartner.“

„Schauen Sie!“, forderte er mich auf. Vor einem tiefgelb leuchtenden Hintergrund sah ich wirre Büschel schwarzer Fasern, manche aus schwarzen Knubbeln entspringend, manche recht gradlinig, manche scheinbar ohne Richtung und Ziel durch das Gewebe mäandernd. Ich war fasziniert: „Ist das Menschenhirn?“ „Das sind Pyramidenzellen aus der Hirnrinde der Maus. Aber Menschengehirn sieht im Prinzip genauso aus.“

Der Gedanke war verführerisch: Wenn Mäuse- und Menschenhirnrinde so ähnlich aussehen – was lag näher als die Idee, daß sie nach dem gleichen Grundprinzip arbeiten! Und was lag näher als die Hoffnung, daß dieses Grundprinzip ganz einfach ist!

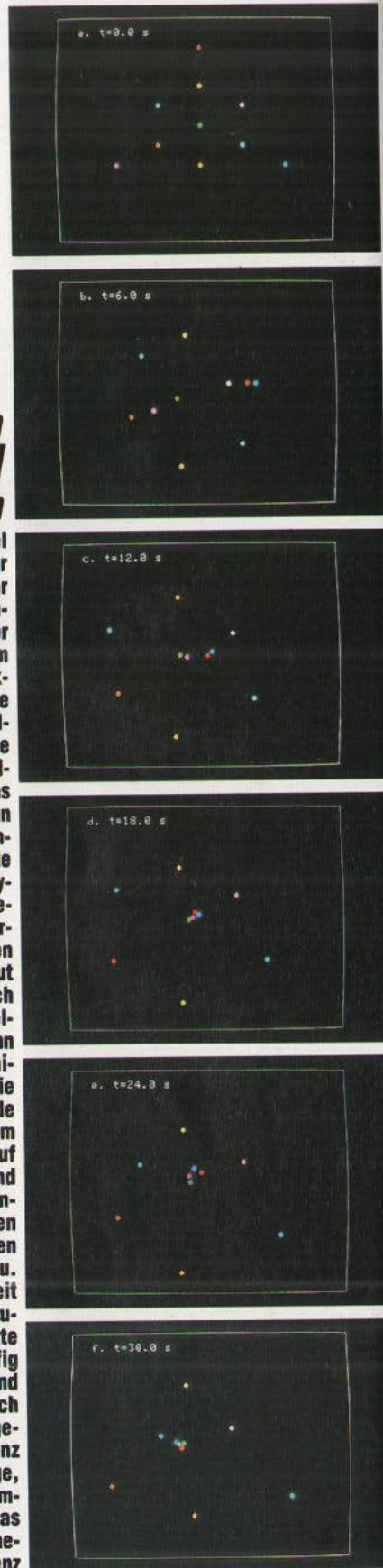
Jetzt also bin ich wieder in Tübingen. In neonerleuchteter funktioneller Architektur steigt man die Treppe hinunter in den Bauch des Instituts, in einen Ring aus vier kurzen, weißgetünchten Backsteinkorridoren voller Bilder und sorgfältig gemalter Plakate, die irgendwann auf den Märkten der Wissenschaft, irgendwelchen Kongressen, ausgestellt waren.

Der lebenslänglich versorgte Meister kann es sich leisten, den hektischen Betrieb der Kongresse und Symposien ernst zu nehmen, doch seine Leute, die sich auf befristeten Stellen der Wissenschaft geweiht und verkauft haben, müssen sich mit möglichst eindrucksvollen Attraktionen im Gelehrsamkeitszirkus bemerkbar machen, wenn sie nicht nach ihrer Karriere am Institut, statt Professor zu werden, gnadenlos Gebrauchtwagen verkaufen oder Postbote werden wollen.

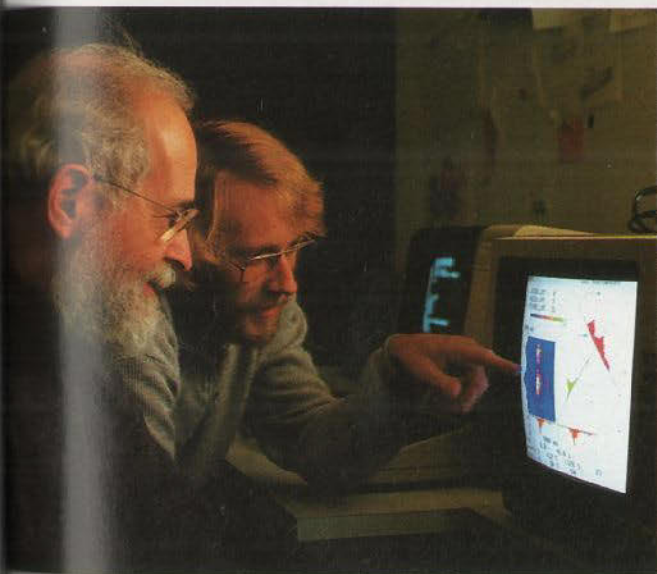
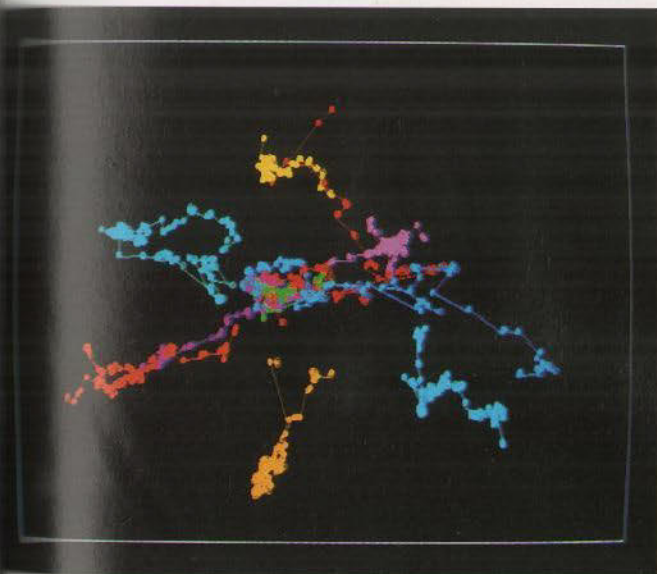
„Franz wiegehts?“ So begrüßt er mich wieder – der klügste

## Ein Punktspiel fürs Hirn

Das Zusammenspiel von Nervenzellen in der Hirnrinde sichtbar machen wollen der graubärtige Amerikaner George Gerstein, Gast am Tübinger Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, und sein holländischer Kollege Ad Aertsen in einer Bildschirmsequenz. Das Problem: Wenn zehn Mikroelektroden im Hirngewebe gleichzeitig die Aktivität von zehn »Pyramidenzellen« registrieren, ertrinken die Forscher schon nach wenigen Sekunden in einer Flut von Daten. Um dennoch herauszufinden, welche dieser Neuronen wann miteinander kommunizieren, kennzeichnen die beiden Forscher jede Pyramidenzelle mit einem farbigen Punkt auf dem Bildschirm. Sind mehrere Zellen gemeinsam aktiv, bewegen sich die betreffenden Punkte aufeinander zu. Nach einer gewissen Zeit symbolisieren eng zusammenliegende Punkte jene Zellen, die häufig gemeinsam aktiv sind und deshalb vielleicht auch funktionell zusammengehören (in der Sequenz ganz unten). Die Wege, die alle Punkte genommen haben, zeigt das Bild rechts oben neben der Sequenz







## Licht aus dem Leib der Zelle

Wenn die Substanz »Lucifer Yellow« in eine Pyramidenzelle gespritzt wird, leuchtet diese unterm Mikroskop bis in die feinsten Verästelungen. Strahlend sitzt im Zentrum dieses wohl wichtigsten Zelltyps der Hirnrinde der pyramidenförmige Zellkörper. Aus ihm wachsen die verzweigten Dendriten und – weniger gut sichtbar zum unteren Bildrand hin – das dünne Axon

Mensch, die banalste Frage. „Ein Schnaps? Ein Kaffee?“ Die Idee, das Institut samt mittlerweile weißhaarigem Direktor lebend zu portraitieren, ist mir mit einemmal nicht mehr so ganz geheuer. Während Braitenberg den Kaffee holen geht, lasse ich mich von der Inschrift auf dem Bauch seiner alten Schreibmaschine ermutigen: „Da questa macchina viene fuori tutto quello che vuoi – Aus dieser Maschine kommt alles raus, was man will“. Also denn.

Auch aus Gehirnen kommt, großzügig gesehen, raus, was man will, und man möchte hier am Institut verstehen, warum.

Almut Schütz, in stiller Symbiose mit ihrem Mikroskop, zeichnend, rechnend, licht- und elektronenmikroskopische Bilder von Mäuse- und Meerschweinchenhirnen analysierend. Sie sucht nach anatomisch sichtbaren Spuren des Gedächtnisses und erforscht die Grundverschaltung der Hirnrinde.

Günther Palm, Formeln ausbrütend am Schreibtisch, in Denkpausen „Happy birthday to you“ auf der Posaune üübend, entwirft mathematische Modelle, „assoziative Netzwerke“, um an ihnen zu studieren, wie die Hirnrinde funktionieren könnte.

Der spindeldürre Holländer Ad Aertsen entwickelt an seinem stets prächtig bunten Computerbildschirm statistische Verfahren, mit denen man das Zusammenspiel sehr vieler Nervenzellen untersuchen kann.

Ein „wissenschaftlicher Gast“ aus den USA sitzt mit Aertsen im Zimmer: George Gerstein, einer der ersten, die sich an die komplizierte Analyse der Wechselwirkung vieler Neuronen in der Hirnrinde wagten.

Doch die Aktivität einzelner Zellen ist schon kompliziert genug: Umstellt von Computern und verwirrend verdrahteten Meßgeräten untersucht Josef Rauschecker, wie Zellen im Katzengehirn reagieren, wenn die Katze etwas sieht. Die Beantwortung der Frage: „Wie lernen Katzen sehen?“ könnte die Frage nach den Basismechanismen des Lernens im Gehirn mitbeantworten helfen.

Ein kleines Institut. Braitenberg mag das, er hält die subtile Kommunikation von wenigen Leuten für menschlicher und ef-

fektiver als die Unüberschaubarkeit eines Großinstituts, mag intimes Streichquartett, in dem jede Stimme wichtig ist, lieber als dröhnendes, einem Pomposius parierendes Orchester.

Natürlich erklingen nicht nur harmonische Töne hier in Braitenbergs Denzimmer, dessen Bequemlichkeit weniger der Bequemlichkeit dient als der atmosphärischen Förderung des einsamen und gemeinsamen Nachdenkens über Mensch und Tier, Hirn und Welt bis in lange, abgeschiedene Abende hinein.

## Dem Gehirn zeigt und verbirgt sich die Natur zur gleichen Zeit

Braitenberg beherrscht die ungewöhnliche Kunst, in sokratischer Plauderei, verschmitzt und provokativ, doch ohne zu beleidigen, Besserwisseri aufzulösen, eine menschlich und wissenschaftlich produktive Atmosphäre zu schaffen. Ein intellektueller Tiroler Bauer, 1926 in Bozen geboren, in dessen Gegenwart so mancher, der sich für den Größten hielt im Froschkonzert der Wissenschaft, gern aus seinem eisigen Himmel auf die menschliche Erde heruntergestiegen ist.

Braitenberg stellt die Kaffeetassen auf das Glastischchen. „Ich weiß auch nicht recht, was ich schreiben würde, wenn ich an Ihrer Stelle übers Institut was erzählen sollte. Jedenfalls würde ich mehr über Ideen schreiben als über Leute. Die Wissenschaft ist kein Bilderbuch, das ist mir klar. Der Zugang ist anstrengend, und die meisten unserer Ideen sind wohl so ohne weiteres nicht jedermann verständlich zu machen. Auf der anderen Seite sind selbst wir Wissenschaftler dazu verdammt, unseren Kollegen das Wesentliche an der Arbeit eines Jahrzehnts in einem halbstündigen Vortrag zu erzählen. Unser Beruf ist die Erzeugung von Fünfsseitenpapieren und Halbstunden-vorträgen. Unsere Grundgedanken sind vermittelbar und erzählenswert genug. Und wir haben sogar schöne Bilder.“

Tatsächlich. Wo die Gegenstände anderer Wissenschaften immer mehr hinter zitternden Zeigern, ratternden Schnelldruckern und flackernden Leuchtziffern verschwinden, sind die Ob-



jekte der Hirnforschung oft von beeindruckender Unmittelbarkeit. Schnelles und langsames Knattern aus dem Lautsprecher macht das schnelle und langsame Feuern eines Neurons „direkt“ hörbar. Ausgeklügelte Gewebefärbemethoden machen Nervenzellen bis in die letzten Verästelungen sichtbar, „wie sie sind“. Mit feinsten Tusche ausgearbeitete Schattenrisse von Hirnrindenzellen, direkt aus dem Mikroskop übertragen, hängen hier im Denkkzimmer als Meditationsbilder, intellektuelle Mantren.

Hinter Braitenbergs Schreibtisch hängt ein vergilbter Zettel. Auf den hat er vor Urzeiten einen Kreis gemalt, der stellt seinen Tageslauf dar. In verschiedenen großen Segmenten stehen Wörter wie „Lesen“, „Schreiben“, „Beobachtung“, „Meditation“, „Diskussion“. Zwar ist der Tageskuchen nur ein Anhaltspunkt zur Ermahnung und Erinnerung, aber es fällt doch auf, wie groß die Segmente „Meditation“ und „Diskussion“ sind.

Denn die Unmittelbarkeit täuscht, und der Liebhaber des Schönen muß bald erfahren, daß die Natur im scheinbaren Sichzei-

gen sich verbirgt, daß Wissenschaft mit anderen als sinnlich erfassbaren Schönheiten zu tun hat. Immer wieder zeigt sich, daß auch die Hirnwissenschaft in fast keinem Sinn unmittelbar die Natur wahrnimmt. Sie ist, wie andere Wissenschaften, mit dem Entwurf von Bildern aus Bildern beschäftigt. Sie befaßt sich auch mit der schwierigen, Denkgewohnheiten aufbrechenden Prüfung, ob nicht manche Theorien, die wir schon fast für Fakten halten, in Wahrheit nicht ganz angemessene Konstrukte sind.

Wie erhellend und wie täuschend kann schon der einfache Blick durchs Mikroskop sein! Zuerst zeigt sich ein verwirrendes Kaleidoskop von Zellgestalten. Man kann sich in die Vielfalt der Formen, in die bizarren Verästelungen dieser Neuronen vernarren und 100 oder 500 Typen definieren. Für ein erstes Bild der Großhirnrinde scheint es jedoch zu genügen, „Stern-“, „Martinotti-“ und „Pyramidenzellen“ zu unterscheiden. Wer die Abgrenzung dieser drei Zelltypen einmal als grundlegend akzeptiert hat, „sieht“ ganz selbstverständlich nur noch Stern-, Martinotti- und

## Mit der Lupe dem Gedächtnis auf der Spur

**Almut Schütz sucht nach Spuren von Erinnerungen in dem Bildmosaik auf ihrem Labortisch. Die Fotos sind elektronenmikroskopische Aufnahmen von Mäusehirn-Nervenzellen, deren Synapsen sich nach Lernvorgängen vielleicht verändert haben. Valentin Braitenbergs »Denkzimmer« bietet eine Atmosphäre, in der sich aus experimentellen Fakten neue Ideen entwickeln**









Pyramidenzellen im Mikroskop, jede Zelle quasi mit Namensschildchen.

Die Pyramidenzelle ist die häufigste Nervenzelle der Hirnrinde. Im Mikroskop ist sie ganz leicht zu erkennen: Aus einem knubbeligen Zellkörper entspringen buschig nach den Seiten sogenannte basale Dendriten, senkrecht nach oben ein langer, dicker apikaler Dendrit, der sich erst in den obersten Schichten der Hirnrinde verzweigt.

Die Dendriten der Pyramidenzellen empfangen, das ist bekannt, Informationen von Sinnesorganen und anderen Nervenzellen über Synapsen. Diese Kontaktstellen liegen auf winzigen, pilzförmigen Vorstülpungen, den „Dornen“. Der dichte Dornenbesatz der Dendriten erinnert an Stacheldraht. Er läßt sich auch schon im Lichtmikroskop gut erkennen (siehe Seite 11 oben rechts).

### **Daß Lügen kurze Beine haben, zeigt die Klasse des Gehirns**

Gerade noch sichtbar ist auch eine dünne, „Axon“ genannte Nervenfaser. Axone von Pyramidenzellen sind der einzige Ausgang, den eine Information von der Hirnrinde nehmen kann: Sie leiten elektrische Signale zu anderen Nervenzellen oder über das Rückenmark zur Muskulatur. Die meisten ziehen wieder in die Hirnrinde hinein, um Kontakt mit anderen Pyramidenzellen aufzunehmen. Und bevor ein Axon die Hirnrinde verläßt, schickt es kurze, waagerechte Äste – die „Kollateralen“ – seitlich in das Gewebe hinein: So verknüpfen sich benachbarte Pyramidenzellen miteinander.

In den Eigenschaften und Verknüpfungsmustern der Pyramidenzellen scheint das Geheimnis unseres Geistes zu stecken, zumindest ein Teil der Antwort auf die Frage, warum wir uns klüger dünken dürfen als Fliegen, Frösche oder auch Supercomputer.

Braitenberg tippt sein von drei Magneten beeinflusstes Pendel an, dessen Bewegungen schnell unvorhersehbar werden – wie vielleicht schon das Zusammenspiel weniger Nervenzellen. „Zwar ist es schon schwierig, einigermaßen exakt zu definieren,

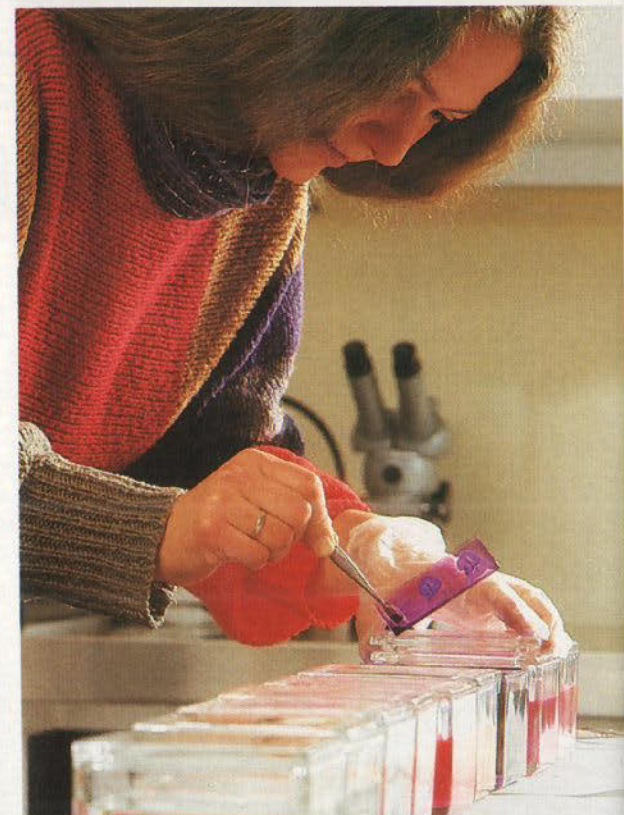
was das Gehirn eigentlich tut. Aber es fällt doch auf, daß wir uns von Fliegen und Computern unter anderem durch die Fähigkeit unterscheiden, Wahrnehmungen hochsensibel aus Kontexten zu interpretieren. So kann man heutige Computer zwar programmieren, Sätze wie ‚Fliegen haben kurze Beine‘ zu verstehen und zu übersetzen. Doch an Sätzen wie ‚Lügen haben kurze Beine‘, die nur mit diffiziler Analogie, mit viel gleichzeitig aktiviertem Wissen zu verstehen sind, ist bis jetzt noch jedes Computerprogramm gescheitert. Und diese Fähigkeit, viele Informationen gleichzeitig zu berücksichtigen und gegeneinander zu balancieren, scheint direkt in der Mikroanatomie des Gehirns abgebildet zu sein!“

Seine lebhafteste Gestik wird noch lebhafter, Melodie des Körpers, fast, als ob er Italienisch spräche.

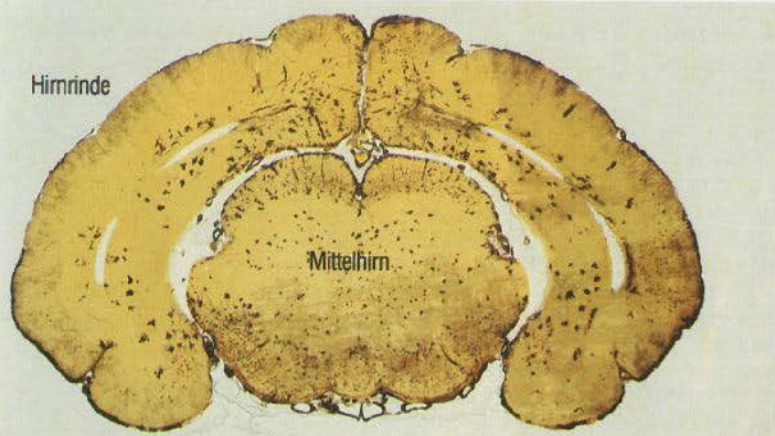
„Jede Pyramidenzelle wird von etwa 5000 anderen Pyramidenzellen beeinflusst und beeinflusst selbst wieder 5000 Pyramidenzellen durch ihre Aktivität. Jede Pyramidenzelle könnte also zumindest indirekt, über ein, zwei Stationen über den Aktivitätszustand der gesamten Hirnrinde informiert und damit äußerst kontextsensibel sein.“

Schon aus der Mikroanatomie kann man also ableiten, daß die Hirnrinde eine große Informationsmischmaschine ist, in der Signale von jeder Zelle zu möglichst vielen anderen Zellen geschickt werden und umgekehrt jede Zelle von möglichst vielen anderen Signale empfängt. Da viele Pyramidenzellen auch von Sinnesorganen beeinflusst werden, fließt dauernd Wissen über die Außenwelt in diese Informationsmischmaschine.

„Doch die internen Verbindungen der Rinde, die Axone von Pyramidenzellen zu Pyramidenzellen, sind etwa hundert- bis tausendmal zahlreicher als Axone mit Sinnesinformation und aus anderen Teilen des Nervensystems. Wenn auch die Sinnesinformation stark gewichtet sein kann, so scheinen doch die vielen internen Verbindungen der Hirnrinde gut zu unserer Selbstbeobachtung zu passen: Ohne viel wahrzunehmen, können wir weitgehend mit uns selbst, mit unseren Gedanken und Phantasien beschäftigt sein.“

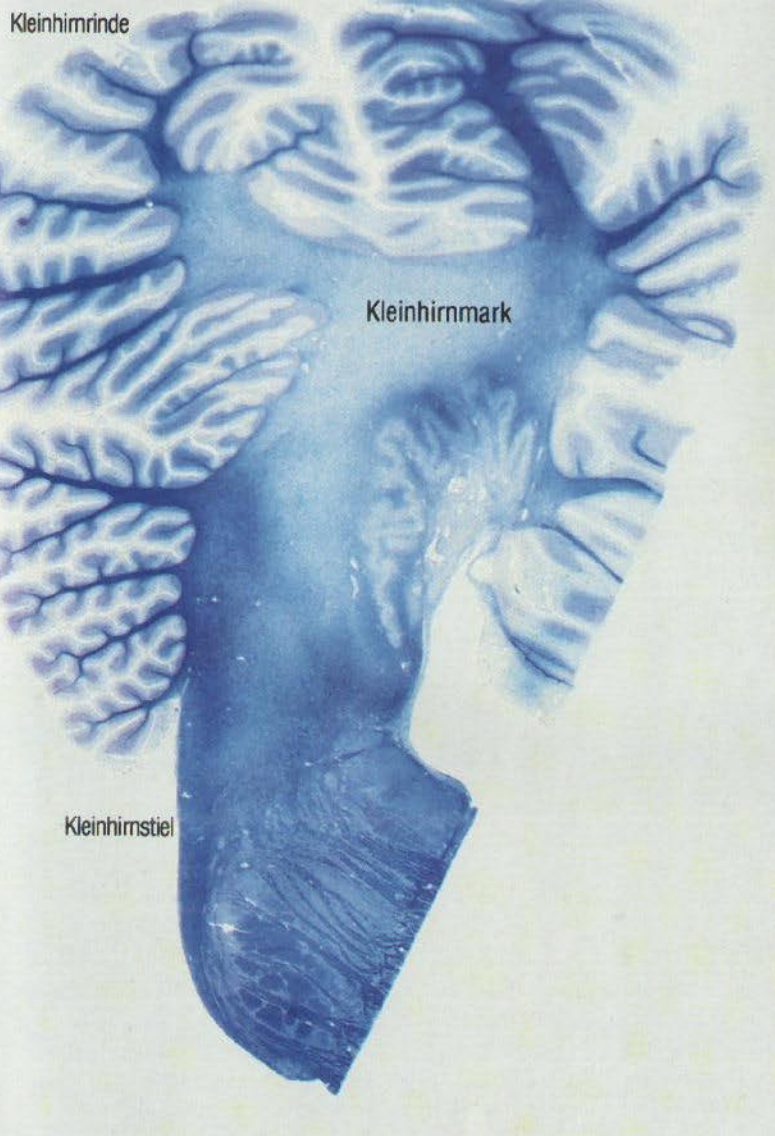






## Das Gehirn in dünnen Scheiben

Einem Stamm mit feinem Geäst ähnelt der hauchdünne Schnitt durch das Kleinhirn eines Affen. Ungefaltet ist dagegen die Großhirnrinde eines Meerschweinchens, die sich auf dem Präparat um das Mittelhirn schmiegt. Bevor Hirngewebe unter dem Mikroskop studiert werden kann, muß es fixiert, gehärtet, in feinste Scheiben geschnitten und gefärbt werden. Denn ungehärtetes Gehirn läßt sich nicht schneiden, unfixiertes Gewebe verwest. Zunächst wird das bereits fixierte Gehirn aus dem Schädel herauspräpariert (links oben), mit Paraffin durchtränkt und geschnitten. Dann werden die auf Glasplättchen geklebten Schnitte zum Färben in verschiedene Bäder getaucht. Für elektronenmikroskopische Aufnahmen muß Hirngewebe mit einem speziellen Gerät (Mitte links) zerstückelt werden



Als der junge Valentino Braitenberg sich 1948 als angehender Psychiater in Rom die fixe Idee in den Kopf setzte, Hirnstrukturen als sinnvoll funktionierende Apparate deuten zu wollen, waren seine Lehrer entsetzt, daß der begabte junge Mann seine wissenschaftliche Zukunft auf solch einen Spleen gründen wollte. Der Versuch, das Netzwerk im Kopf zu verstehen, sei völlig hoffnungslos, ein Hirngespinnst.

Kann sein, meinte der junge Braitenberg und schnitt neben seiner psychiatrischen Ausbildung unverdrossen Gehirne, färbte und mikroskopierte. Er sprach mit Physikern, begeisterte sich für die damals junge Kybernetik und Informationstheorie, für die ebenso junge Elektronik und Computerei, versuchte, Verknüpfungen zwischen Nervenzellen zu rekonstruieren und als Schaltbilder zu deuten, bis ihm 1958 tatsächlich ein erster großer Wurf gelang: ein Funktionsmodell des zellulären Netzwerks der Kleinhirnrinde.

Der junge Braitenberg war nun plötzlich berühmt und begeht. „Trotzdem bin ich noch eine ganze Weile von Institut zu Institut rumgekugelt.“ Bis er 1968 als einer von vier Direktoren ans neu gegründete Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik in Tübingen berufen wurde. „Dann hatte ich erst mal meine Depression, und das nicht zu knapp. Es dauerte eine ganze Weile, bis ich das Institut nicht als Käfig, sondern als Chance begriff, mein Leben zu gestalten.“

Gemeinsam mit der Mikroanatomin Almut Schüz und dem Mathematiker Günther Palm hat Braitenberg in den letzten Jahren einen „Skelett-Cortex“ entworfen, der nur aus idealisierten Pyramidenzellen besteht, um an diesem Modell mögliche Funktionsweisen der Hirnrinde zu studieren. „Wenn wir hoffen wollen, irgendwann einmal den riesigen Abstand zwischen den Details, die wir wissen, und den Zusammenhängen, die wir wissen möchten, zu überwinden, dann müssen wir in dem Faktengewirr zunächst einmal nach einfachen, allerersten Bildern suchen. Wir sollten nicht vergessen, daß die Hirnwissenschaft sich immer noch in einem Stadium befindet, das etwa dem der Physik in der Antike entspricht. Spekulieren gehört mit



zum Sinnvollsten, was wir tun können.“

Günther Palm, der sich seit zwei Jahren um Professuren bewirbt, steckt in der Klemme, die den meisten Nachwuchswissenschaftlern zu schaffen macht: Es gibt so gut wie keine Stellen, und für die eigenwilligen Leute schon gar nicht. „Wenn man mich nach meinem Beruf fragt, habe ich zwei Antwortmöglichkeiten. Will ich eine kurze Diskussion, brauch ich nur zu sagen, ich bin Mathematiker. Will ich eine lange, dann sag ich, ich würde versuchen, das Gehirn zu verstehen.“

Goethe hat ja die Mathematiker apostrophiert als Leute, die „mit verwickelten Mitteln einfache Zwecke zu erlangen suchen“. Und auch Braitenberg ist skeptisch gegenüber „Aftertheoretikern“, wie er sie nennt, die sich an interessante Gedanken anderer anhängen, um Kartenhäuser von möglichst komplizierter Mathematik daraus zu bauen. Umgekehrt Günther Palm: Für verwickelte Zwecke einfache Methoden zu erfinden, das ist für ihn die Kunst des guten Mathematikers. Und die Erkenntnis der Gehirnfunktion ist nun wahrlich ein „verwickelter Zweck“.

„Man möchte gern wissen, wieso Gehirne können, was Computer nicht können“, sagt Palm. „Unsere Betrachtungen am Skelett-Cortex geben uns Ideen, wie die Hirnrinde uns dabei helfen könnte, etwa einen alten Bekannten nach 20 Jahren wiederzuerkennen, aus ein paar Akkorden sich an ganze Sinfonien zu erinnern oder aus Geräuschfetzen sinnvolle Sätze zu verstehen.“

Der Skelett-Cortex ist im Prinzip ein „assoziatives Gedächtnis“, eine gedachte Maschine aus idealisierten Pyramidenzellen, deren Grundidee auf den britischen Psychophysiologen Donald Hebb zurückgeht. Hebb fragte sich in den vierziger Jahren, wie neuronale Netzwerke lernen. Seine Hypothese: Wenn Nervenzellen, die untereinander durch Synapsen verbunden sind, gemeinsam aktiv seien, dann würden die synaptischen Verbindungen zwischen ihnen verstärkt. Durch diesen Mechanismus entstünden Gruppen eng miteinander verbundener Neurone, sogenannte „Cell Assemblies“. Diese durch Lernen entstandenen Zellverbände neigten dazu, als Einheiten

zu feuern, auch wenn zunächst nur ein Teil ihrer Neuronen aktiviert würde. Diese zündeten dann die übrigen Zellen der Assembly. Deshalb könne eine Cell Assembly ein gelerntes Muster auch dann erkennen, wenn dieses später unvollständig oder verfälscht eingegeben würde. Ein System von Cell Assemblies könne – wenn aktive Zellverbände andere Zellverbände zünden – zu gegebenen Mustern weitschweifig assoziieren und Ähnlichkeiten zwischen Mustern erkennen.

„Wir stellen uns bei unseren Meditationen über das Gehirn gern vor“, meint Braitenberg, „ein kluger Ingenieur hätte das Netzwerk zu sinnvollen Zwecken entworfen. Verstehen heißt heute, im Computerzeitalter auch: bauen können.“

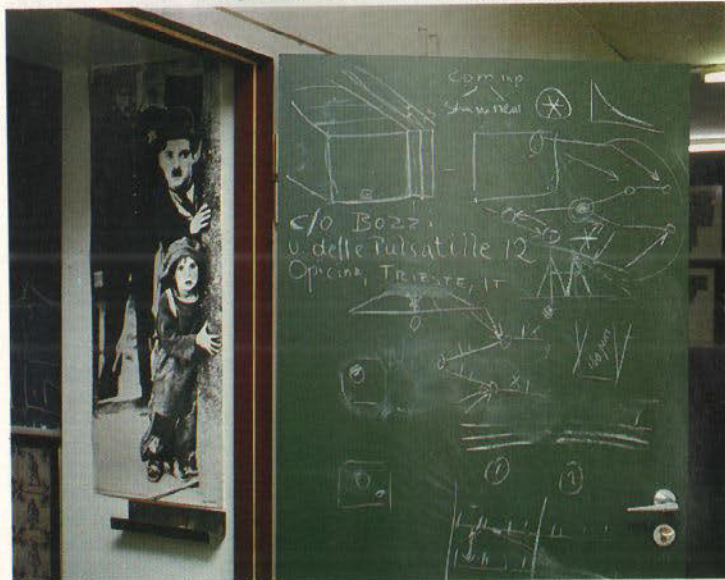
Aus dem Wechselspiel von Betrachtung der Hirnrinde, Psychologie („Was tut der denkende Mensch eigentlich?“), Ausprobieren von Gleichungen und Spekulation ist auch einer der ersten „assoziativen Computer“ der

Welt, ein elektronischer „Skelett-Cortex“, entstanden. Von Günther Palm und Tobias Bonhoeffer, einem Diplomanden, zusammengebastelt, steht der Prototyp – „bitte nicht fotografieren, ein Profi würde sich mit Grausen wenden!“ – auf einem Tisch in Palms Zimmer. „Ich wußte zwar, daß meine Gleichungen funktionieren. Wir hätten den Apparat eigentlich gar nicht wirklich bauen müssen. Aber irgendwie war es doch ein Überraschungseffekt, als das Ding tatsächlich getan hat, was ich mir gedacht habe.“

Doch nicht Computerbau ist das Hauptinteresse der Braitenberg-Gruppe, sondern die Frage, wie unsere kleinen grauen Zellen schlechte Gedichte schreiben und gute Physiknoten ergattern. Und alle schönen Modelle in Ehren: Es ist sehr schwer, experimentell nachzuweisen, daß die bedeutungstragenden Strukturen in der Hirnrinde tatsächlich gekoppelte Systeme von Cell Assemblies gemeinsam aktiver Pyramidenzellen sind. Fürs erste würden sich

## Ein Spielchen fürs Kleinhirn

Lämpchen an Arm und Bogen machen das Spiel auf einer selbstgebastelten Geige sichtbar. Mit solchen Versuchen will sich Valentin Braitenberg der Frage nähern: Wie »lernt« das Kleinhirn das Wesentliche einer Bewegung? Die Mischung aus Ernst und Spiel ist typisch für das Tübinger Institut, wo auch Charlie, der Tramp, an einer Labortür lauert









die Forscher schon freuen, wenn sie zeigen könnten, daß beim Lernen in der Hirnrinde tatsächlich Synapsen an Pyramidenzellen neu gebildet oder verstärkt werden, wie Hebb vermutet hat.

Almut Schüz hat vor kurzem in mühevoller Kleinarbeit ziemlich sicher nachweisen können, daß die Synapsen nicht beim Lernen, sondern unabhängig davon bei der Reifung des Gehirns entstehen. Jetzt vergleicht und analysiert sie Berge von licht- und elektronenmikroskopischen Fotos, um eventuell durch Lernen veränderte Synapsen von anderen zu unterscheiden. „In letzter Zeit finde ich Hinweise, daß die Zahl der ‚synaptischen Vesikel‘, dieser kleinen Bläschen, die Transmittersubstanz enthalten, in bestimmten Synapsen beim Lernen erhöht wird. Aber ich weiß, wie entsetzlich man sich da vertun kann.“

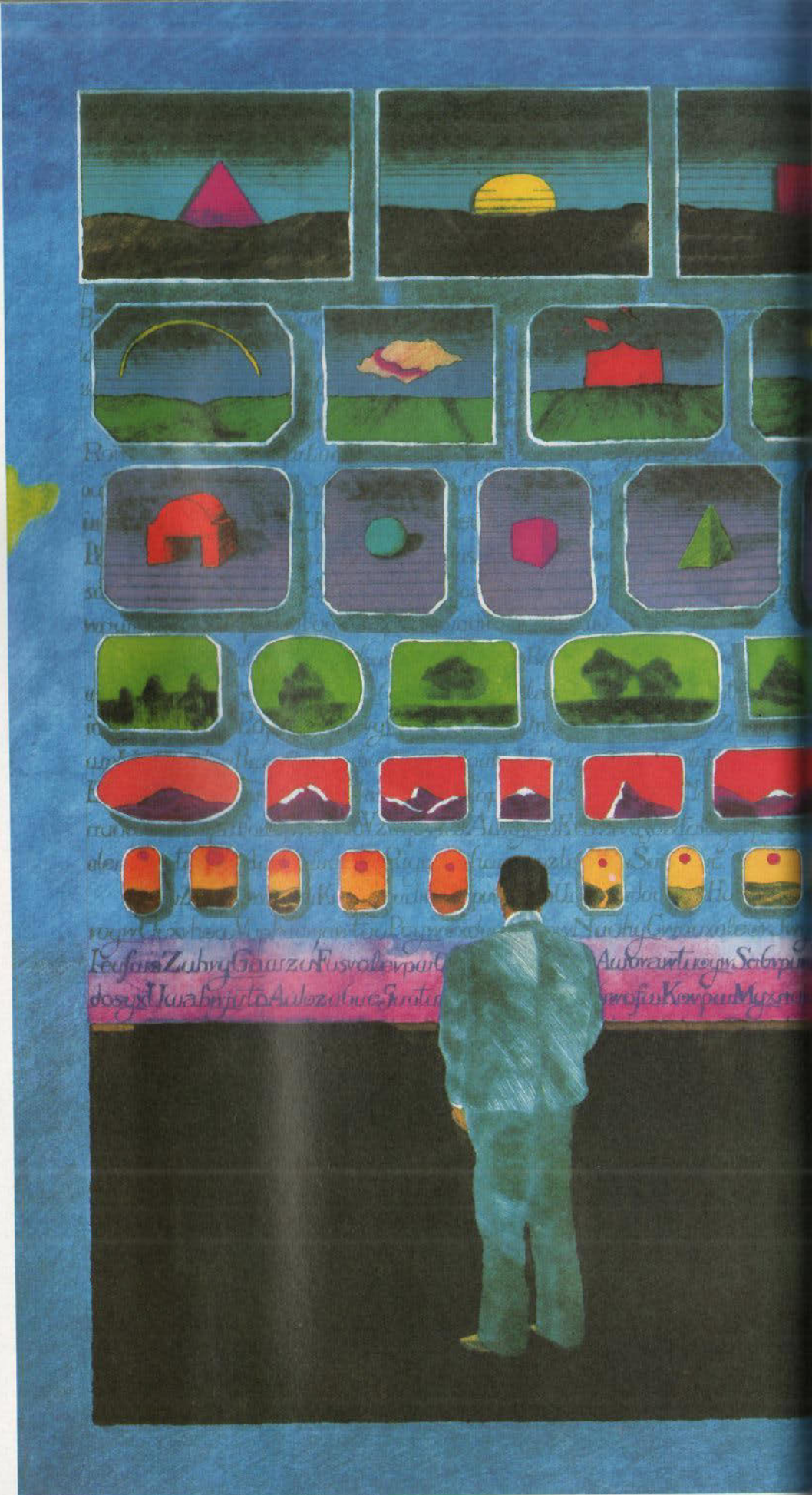
Es gibt auch Hinweise aus anderen Instituten, daß es durch Lernen veränderbare Synapsen gibt. Aber vorläufig bleibt die schöne Idee des assoziativen Gedächtnisses trotz ihrer Verführungskraft und des funktionierenden Computers schöne Theorie.

„Schöne Theorien“ sagen auch – mit abfälligem Unterton – manche Wissenschaftler, denen das allzu ausführliche Nachdenken über das Gehirn suspekt ist, weil es von der einzig achtenswerten harten Laborarbeit abhalte.

„Über diese Leute sollte man sich freuen“, meint Braitenberg, „denn durch die Überbewertung der Betriebsamkeit entsteht ständig neues Detailwissen über das Gehirn, das man natürlich gern als Gedankenfutter akzeptiert. Aber: Unser Wissen über manche Hirnteile – ich denke da besonders an das Kleinhirn – ist schon so groß, daß nur noch der Newton zu kommen braucht, der uns ihre Funktion erklärt. Wir wissen viel zu viel und denken viel zu wenig.“ □



Der Biologe, Romanautor und Journalist **Franz Mechsner**, 33, hält seine Bekanntschaft mit Valentin Braitenberg für „ein großes Glück“. Mechsner ist Redakteur bei GEO-Wissen





# Wie spiegelt sich die Welt im Kopf?

*Wege und Irrwege des Denkens über das Denken*

VON FRANZ MECHSNER

**W**ie klingt das Klatschen einer Hand? Mit derart perfiden Denksport - Aufgaben, „Koans“ genannt, bedenken japanische Zen-Meister ihre Schüler. Die sollen dann über das Udenkbare nachdenken. Tage, Wochen, Monate. Jedoch: Solange sie denken, finden sie die Antwort nicht.

Die östlichen Denker denken, uns das Denken gleichzeitig zu lehren und abzugewöhnen – könnte man denken. Sollen wir auf diese vertrackte Weise die Illusion des Denkens erkennen lernen? Doch solange wir noch denken, können wir es natürlich nicht wirklich wissen.

Der Westen hat auf seine Weise über Illusionen und Möglichkeiten des Denkens nachgedacht.

Seit dem berühmten „Ich denke, also bin ich“ des Descartes sahen viele Philosophen das Denken als Teil des Bewußtseins. Was lag näher für die frühen Psychologen als der Versuch, die Natur des Denkens durch Selbstbeobachtung, durch „Introspektion“ zu enträtseln? Wer jedoch die

Augen zumacht, um das Denken im eigenen Kopf zu beobachten, der sieht nicht viel mehr als ein paar Brocken im Nebel, deren Konturen sich im Unbewußten verlieren.

„Weißt du, was das ist: Denken?“ fragte der Genfer Entwicklungspsychologe Jean Piaget in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts Kinder der ersten Schulklassen, worauf die Knirpse meist mit einem schlichten „Ja!“ antworteten.

„Womit denkst du?“

„Mit dem Mund.“



**Zen: Du sollst nicht denken**

Manche Kinder dachten mit den Ohren, nur eines mit dem Herzen, andere meinten, eine Stimme sei im Kopf: „Der Mund dort hinten redet zu meinem Mund vorne.“

Zwei Jahrtausende lang schien klar zu sein, was das Denken ist: Begriffsdefinition und Schlußfolgerung nach den Regeln der Logik. Als Ur- und Abbild, als Ideal aller Denkvorgänge galt den Schulmeistern des Abendlandes der Syllogismus des Aristoteles, ein Klappermechanismus zur Erzeugung richtiger Schlußfolgerungen: „Alle Menschen sind sterblich. Sokrates ist ein Mensch. Also ist Sokrates sterblich.“

Die Denker des Mittelalters glaubten, die logische Untersuchung von Begriffen allein garantiere schon die größtmögliche Reichweite des Denkens. Die Neuzeit betonte die Bedeutung von Beobachtung und Experiment. Aber immer faszinierte am Denken die Möglichkeit, allein durch die Kraft des Geistes Wissen zu erschließen, das sonst verborgen bliebe.

Die moderne Psychologie interessiert sich dafür, wie das



Denken tatsächlich in unseren Köpfen abläuft, und weniger für formale Prinzipien. „Assoziation“ hieß das Zauberwort, mit dem die meisten Psychologen zu Beginn dieses Jahrhunderts Denkvorgänge erklären wollten. Durch Assoziation entstünden zunächst beliebige, zufällig kombinierte Gedankenverbindungen, die anschließend von der Logik auf Stimmigkeit geprüft und entweder akzeptiert oder verworfen würden. Wenn der einfache evolutionäre Mechanismus von Mutation und Selektion den unüberschaubar vielfältigen Kosmos des Lebens hervorgebracht hatte, warum sollte nicht der ebenso simple Mechanismus von Versuch und Irrtum auch das

geistige Universum eines Dostojewskij, eines Einstein, eines Mozart, eines Jedermann erklären können?

Die „Gestaltpsychologen“ um Max Wertheimer in Berlin waren es, die zwischen den Weltkrieg Jahren den Aufstand gegen die „Assoziationisten“ inszenierten. Ihr Kredo: „Produktives Denken“ ist kein blindes Probieren unter den Augen einer Prüfungsinstanz, die erst anschließend das Sinnvolle vom Sinnlosen scheidet. Niemals wird doch aus zwei Messern durch blindes Probieren plötzlich eine Schere, sondern nur durch gezielte, angemessene, einsichtige „Umstrukturierung“ zu einem neuen, sinnvollen „Ganzen“ – zu einer „Gestalt“ namens Schere.

Aber das Nachdenken über das Denken wollte auch damit nicht enden: Was ist eigentlich eine „Einsicht“? Wie sind Begriffe „strukturiert“? Wie werden sie bei neuerer, besserer Einsicht „umstrukturiert“? Welche verschiedenen Typen von Begriffen gibt es überhaupt? Welche Beziehung haben die Begriffe zueinander im Gehirn, wie spiegelt das Denkgorgan das Wissen über die Welt wider?

Die meisten Psychologen wissen, daß sie nicht viel wissen: Ihre Wissenschaft erforscht die schwierigste aller uns bekannten Welten, die des menschlichen Geistes. Dennoch kann sich ihre Leistung in diesem Jahrhundert sehen lassen. Von eher unangemessenen, simplen Vorstellungen des Anfangs sind die Psychologen zu wahrscheinlich angemesseneren, wenn auch komplizierteren Konzepten gekommen: So stellten sich Philosophen und Psychologen traditionell vor, daß Begriffe definiert werden durch ihre Stellung in einem System von Ober- und Unterbegriffen – „ein Rotkehlchen ist ein Vogel ist ein Tier“.

Inzwischen ist erkannt worden, daß viele Begriffe vor allem Versuche sind, die Struktur von Situationen zu erfassen. Früher galt die Vorstellung, daß Denken logisches Schließen sei und nichts anderes. Heute wächst die Einsicht, wie vielfältig Denkprozesse sein können, wie verwoben sie sind mit Gefühlen, Gedächtnis und Wahrnehmung der Welt.

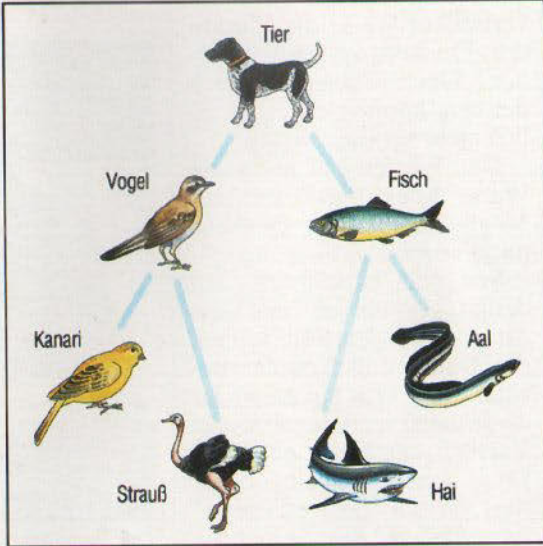
Jean Piaget untersuchte in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts, wie sich beim

## Denken in Netz

Was haben »Horn-ochsen« mit »Hyänen« und einem »Hasenfuß« zu tun? Wie verknüpfen sich Gänse, Gnus und Grünschnäbel im Kopf des Redakteurs Günter Haaf? Sein spielerischer Versuch auf einem Notizblatt zeigt: Schon das Netzwerk einiger Begriffe, die beim Spiel mit dem Wort »Tier« eine Rolle spielen, ist kaum zu entwirren. Denken ist eben nicht nur »logisches« Verknüpfen von Fakten, sondern auch ständiges – oft unbewusstes – Ausbalancieren vielfältigster Einflüsse. Und das nicht nur in einem einzigen Kopf, sondern im Wechselspiel mit anderen Menschen

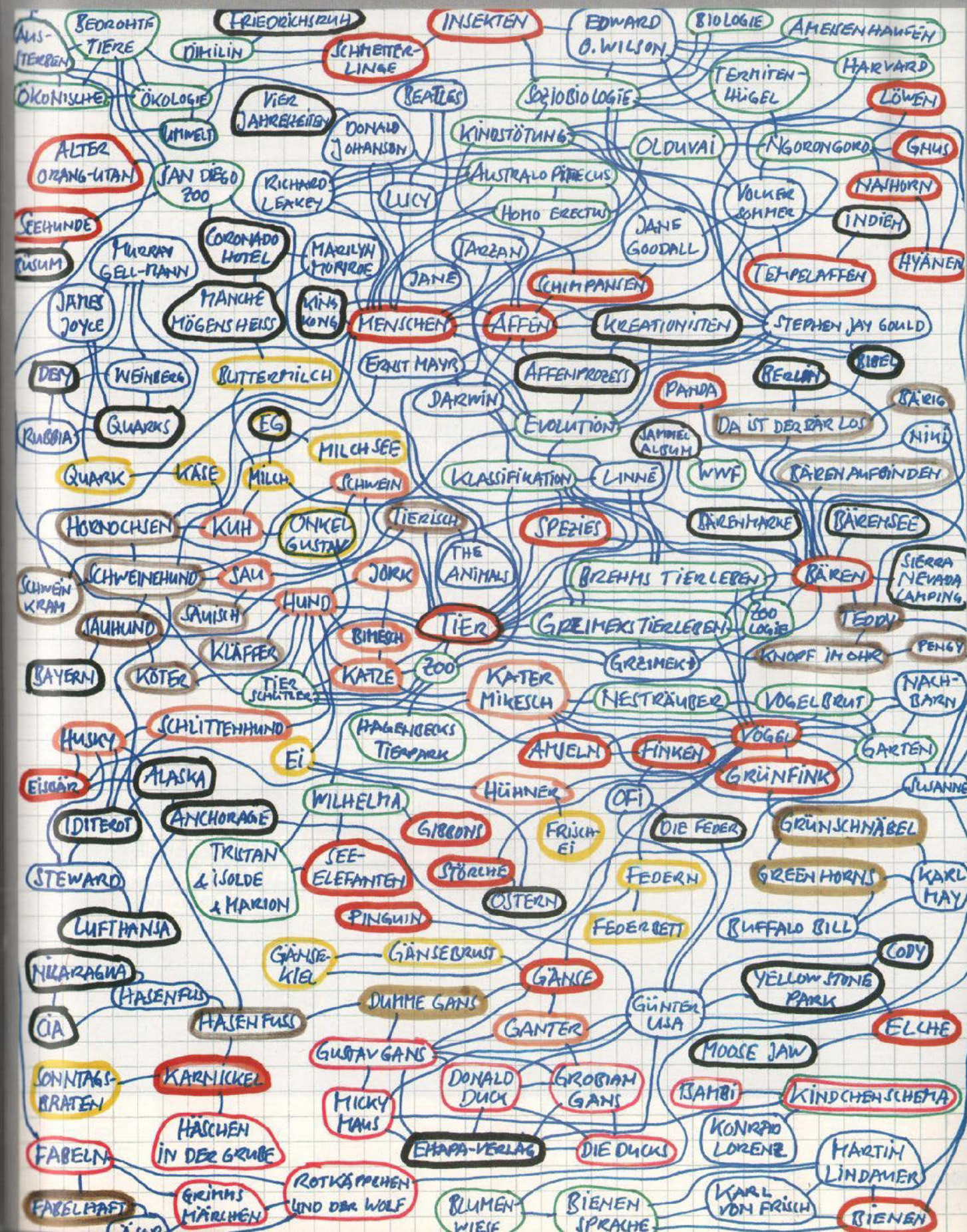
Schwimmt, ist schwarzweiß, läuft auf zwei Beinen und kann nicht fliegen: Schon aus diesen spärlichen Angaben assoziieren wir den Pinguin – wahrlich nicht der Prototyp eines Vogels. Normalerweise denken wir Begriffe um »prototypische« Beispiele gruppiert – etwa den Begriff »Vogel« um das vertraute Bild einer Amsel. Wissenschaftliche Systematik dagegen ordnet hierarchisch – mit Ober- und Unterbegriffen

## Amsel, Geier, Fink und Strauß





## Werken: Wenn sich alles mit allem verstrickt





## Geniales Gehirn im Glas

Was war einzigartig an Einsteins Gehirn? Zwar hat kein ernstzunehmender Wissenschaftler eine Idee, worin sich »geniale« von »normalen« Denkorganen sichtbar unterscheiden könnten. Dennoch bewacht ein amerikanischer Pathologe namens Thomas Harvey seit 1955 die zerteilten und markierten Teile des Physiker-Gehirns in drei mit konservierender Flüssigkeit gefüllten Glasgefäßen – eine obskure Reliquie wider Einsteins Willen



Kind das „räumliche Denken“ entwickelt, wie das „kausale“ und das „soziale“. Er erforschte die sich verändernde Struktur des „Objektbegriffs“, des „Zahlbegriffs“, des „Zeitbegriffs“. Denken, so betonte der Schweizer Psychologe, ist zunächst nicht logisch und abstrakt, sondern sinnvoll mit der Lebenswirklichkeit des Kindes verbunden, mit dem Begreifen von Szenen wie „gebadet werden“, „essen“, „mit der Rasel spielen“.

Piaget wußte, wie wichtig für das Denken die Fähigkeit ist, den Standpunkt eines anderen einzunehmen. Er glaubte, Kinder seien dazu erst in späteren Jahren in der Lage – eine Vermutung freilich, die in letzter Zeit angezweifelt wird.

Heute gewinnt auch die Vorstellung an Boden, daß die meisten Denkprozesse nicht Schritt für Schritt ablaufen, sondern ein ständiges Ausbalancieren vielfältigster Einflüsse erfordern. Ein Beispiel: Wer mit seinem Chef zum Essen geht, muß mehr wissen als nur das übliche Verhalten in einem Restaurant: Er darf nicht lediglich das „Restaurant-Schema aktivieren“, wie die Psychologen sagen.

In jeder konkreten Lebenssituation wirken unüberschaubar viele Aktivitäten des Gehirns zusammen, die

sich gegenseitig beeinflussen und durchdringen. Welche komplexe Organisation hinter unserem Denken und Handeln steckt, hinter dem Speichern von Wissen in sogenannten „Schemata“ oder „Skripten“ oder „semantischen Netzwerken“, wurde in den letzten Jahren immer deutlicher.

### Ein Ereignis wirkt aufs Gehirn, wie wenn ein Stein ins Wasser fiel

Dieses ständige Ausbalancieren unzähliger Informationen in unserem Gehirn versucht nun ein Zweig der kognitiven Psychologie mit neuen Modellen zu simulieren. Die dazu erdachten Modell-Netzwerke ähneln – wohl nicht zufällig – dem dicht geknüpften Netzwerk der Nervenzellen in der Hirnrinde: Dort ist jedes Neuron mit Tausenden anderer verknüpft. Hier scheint sich endlich eine fruchtbare Verbindung zwischen Psychologie, Neurologie und Computerwissenschaft anzubahnen, nachdem diese drei Disziplinen einander so viele Jahre lang ignoriert oder irritiert hatten.

Wenn beim Denken riesige Informationsmengen ineinanderfließen, ist es wahrscheinlich, daß dabei große Teile unseres Gehirns aktiv werden müssen. Diese Vermutung scheinen auch „Bilder“ aus denkenden Gehirnen nahezulegen, die mit der neu entwickelten PET-Technik aufgenommen worden sind.

Aber: Gibt es überhaupt Ereignisse von Bedeutung, die nur kleine Bereiche des Gehirns beeinflussen? Die Aktivität einer Stelle im sensibel schwingenden Netzwerk des Gehirns könnte die Anregung größerer Gebiete verursachen – ähnlich einem Stein, der ja auch kein Loch ins Wasser bohrt, sondern dem ganzen Tümpel sein Wellenmuster aufprägt.

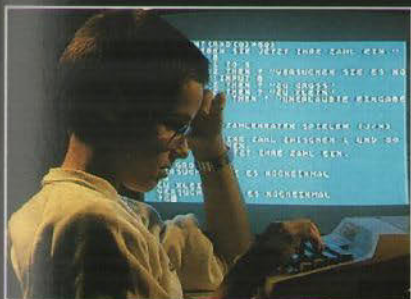
Eine solche Sicht der Gehirnaktivität wird durch die jüngsten Forschungsergebnisse der Neurowissenschaftler Christine Skarda und Walter Freeman von der Stanford University in Kalifornien unterstützt. Ihre experimentellen Daten über die Geruchserkennung bei Kaninchen weisen auf ein raffiniertes, grundsätzliches Verfahren hin, mit dem das Gehirn die unterschiedlichsten Sinnesindrücke verarbeiten und wiedererkennen könnte.

Die Stanforder Forschergruppe hatte die Nervenaktivität des Riechkolbens – der ersten Verarbeitungsstation für Gerüche im Gehirn – beim Ein- und Ausatmen der Versuchstiere aufgezeichnet. Registriert wurde die Aktivität an der Oberfläche des Riechkolbens mit dem besonders dicht gepackten Elektrodendübel eines speziellen Elektroenzephalographen (EEG).

Die empfangenen Signale interpretieren Freeman und Skarda so: Vor dem Einatmen kann der Riechkolben auf „Bereitschaft zum Riechen“ umschalten, wobei die quasi „zufällige“ Aktivität seines gesamten Nervennetzwerkes durch Impulse vom restlichen Gehirn verstärkt wird. Dadurch entsteht ein „deterministisches Chaos“, wie die Fachleute den erhöhten, aber nicht geordneten Aktivitätszustand nennen. Jetzt ist der Riechkolben „empfangsbereit“.

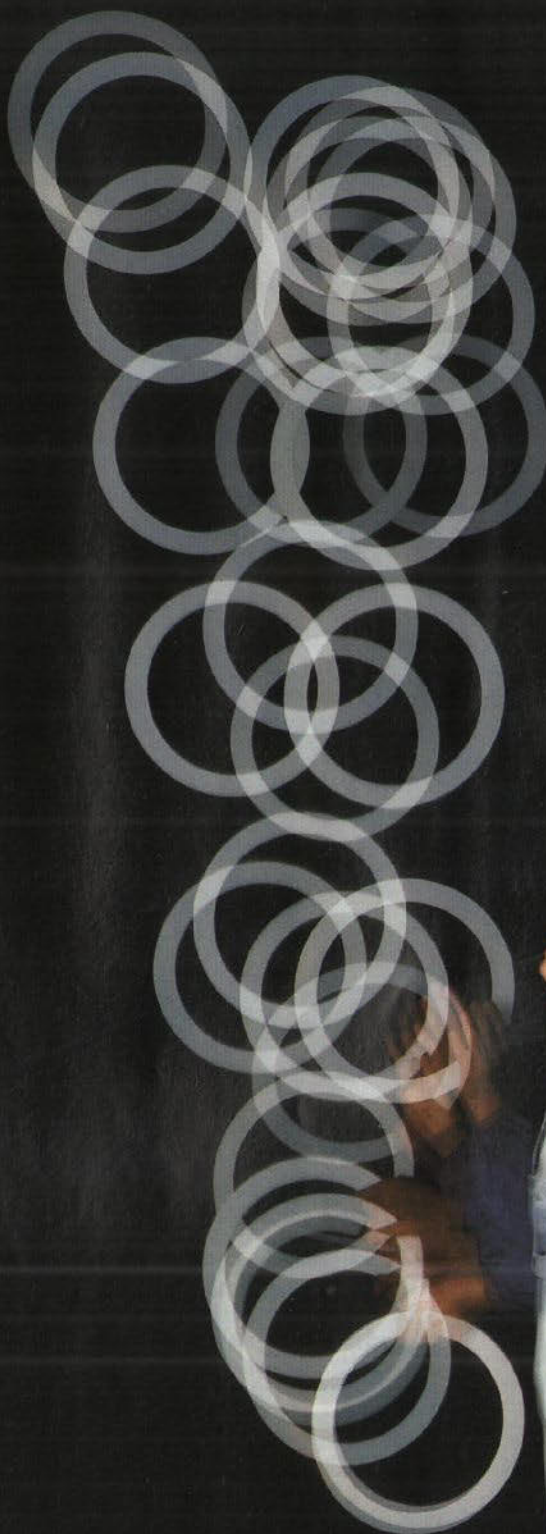
Wenn das Kaninchen nun Luft holt, reizen bekannte oder unbekannte Stoffe die Geruchsnerve der Nasenschleimhaut. Die jeweiligen Nervenreize laufen zum Riechkolben, wo sie – dem Stein im Tümpel ähnlich – gleichsam ins chaotische Aktivitätsgekräusel fallen und ihm ein ganz bestimmtes Muster aufprägen, das für jeden Geruch so unverwechselbar ist wie ein Fingerabdruck:



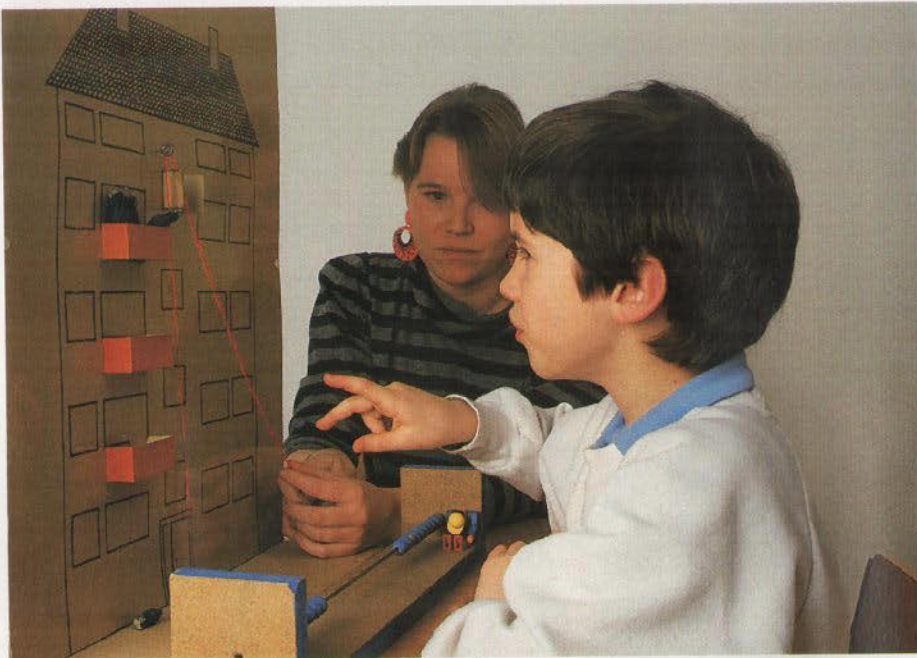


## Spielereien an den Grenzen des Geistes

Mit 13 Ringen jonglieren, simultan Schach gegen Dutzende von Gegnern spielen, blitzschnell und zugleich raffiniert beim Tischtennis zurückschlagen, Zwiesprache mit dem Computer halten – ständig versuchen Menschen, die Leistungsfähigkeit ihres Gehirns auszuloten. »Der Mensch unterscheidet sich vom Tier hauptsächlich durch das Übermaß seiner subjektiven Neigungen«, schrieb der amerikanische Psychologe William James Anfang dieses Jahrhunderts. »Seine Überlegenheit über jene beruht einzig und allein auf der Menge und dem phantastischen, unnotwendigen Charakter seiner physischen, moralischen, ästhetischen und intellektuellen Wünsche«







## Kindliches Denken hinter drei Bergen

Wie »anstrengend« ist es, Säcke mit einem Seil auf verschieden hohe Balkons zu hieven? Bei solchen Versuchen zeigte sich, daß schon Kinder im Alter von fünf Jahren meist sowohl die Zahl der Säcke – das Gewicht – als auch die Höhe der Balkons berücksichtigen. Kinder bedenken also gleichzeitig zwei physikalische Größen – anders als es der Schweizer Entwick-

lungspsychologe Jean Piaget postulierte. Piaget hatte auch behauptet, ein Kind denke »egozentrisch«, könne sich also nicht in andere Menschen hineinversetzen, sich zum Beispiel nicht vorstellen, wie ein anderes Kind aus anderem Blickwinkel eine Modell-Landschaft sieht (unten). Doch neueren Erkenntnissen zufolge kommen Kinder damit durchweg gut zurecht

Dieses Geruchsmuster löst als Ordnungszustand das vorherige Chaos ab.

Der Geruchsreiz bestimmt also, welches geordnete Aktivitätsmuster die Nervenzellen des Riechkolbens bilden. Ein derartiges »selbstorganisiertes Muster« könnte, weitergeleitet, in höheren Gehirnregionen als der »typische Geruch« wahrgenommen und auch in Zukunft immer wieder erkannt werden. Im Riechkolben selbst wird mit dem Ausatmen das alte Muster gelöscht und der nächste Geruchseindruck vorbereitet.

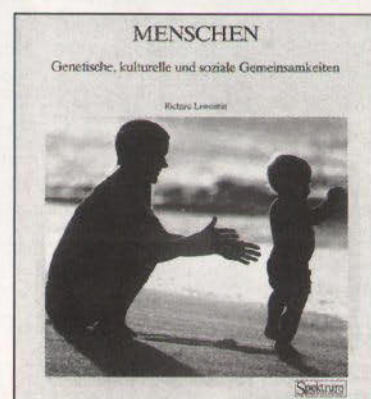
Die Theorie von Freeman und Skarda eröffnet eine faszinierende Perspektive: Könnte es sein, daß Informationen im Gehirn – Wahrnehmungen, Gefühle, Gedanken – stets in Form solcher »selbstorganisierten Muster« vorliegen? Daß letztlich auch geistige Vorgänge auf die geschickte Nutzung des »deterministischen Chaos« durch Nervenzellverbände zurückgehen?

In der unbelebten Welt ist die aus dem Chaos geborene, selbstorganisierte Ordnung beinahe allgegenwärtig: Wolkenmuster am Himmel, Wellen im Teich, Dünen in der Sandwüste. Die Ordnung der Informationsmuster im Gehirn weist jedoch eine für Lebewesen typische Besonderheit auf: Sie soll die Überlebensfähigkeit des Organismus gewährleisten, also »sinnvoll« sein. Diese »adaptive Ordnung« hat, wie Biologen argumentieren, über ungezählte Generationen die evolutionäre »Fitness« der Tiere und schließlich des Menschen gewährleistet.

Und nun, so scheint es, hilft das sinnvolle Zusammenspiel von Chaos und Ordnung in unserem Kopf, ein Auto in die Parklücke zu manövrieren, über Wolken, Wellen und Gehirne nachzudenken – und darüber, wie das Klatschen einer Hand klingt. □



# Für alle, die viel wissen und noch mehr verstehen wollen



**Spektrum der Wissenschaft** – die deutschsprachige Ausgabe von SCIENTIFIC AMERICAN – informiert Sie laufend über die aktuellen Entwicklungen in Wissenschaft, Forschung und Technik. Mit einer Monatszeitschrift und einem umfassenden Buchprogramm.

### Die Zeitschrift:

Interdisziplinär, kompetent und authentisch. Mit jeweils acht farbig bebilderten Originalbeiträgen und weiteren interessanten Rubriken: „Monatsspektrum“ mit aktuellen Kurzbeiträgen. „Computer-Kurzweil“, Buchbesprechungen, „Experiment des Monats“. Pro Ausgabe im Abonnement 8,25 DM, für Studenten 7,40 DM, im Einzelverkauf 9,80 DM.

### Die Spektrum-Bücherreihen: Verständliche Forschung

Diese Kompendien zu aktuellen wissenschaftlichen Themen sind umfassend, verständlich und in die Tiefe gehend jeweils einem einzelnen Fachgebiet gewidmet. Jedes dieser bislang 16 Bücher, enthält auf rund 200 Seiten 14 bis 16 farbig illustrierte Originalbeiträge führender Wissenschaftler. Sie kosten zwischen DM 39,- und DM 42,-.

### Die Spektrum-Bibliothek

Diese Reihe kompetenter Sachbücher bietet Ihnen ein weites Spektrum faszinierender, verständlich geschriebener Betrachtungen über die Phänomene und Naturge-

setze unserer Welt. Interdisziplinär, themenübergreifend, verlässlich und aus erster Hand. Jährlich erscheinen vier weitere Bände. Umfang etwa 200 Seiten, Preis DM 56,-.

### Die Spektrum-Fach/Sachbuchreihe

Diese Bücher sind jeweils einem Wissenschaftsthema gewidmet. Wie die Titel: „Rekombinierte DNA“, „Hormone“, „Linkes/Rechtes Gehirn“ und im September 1987 „AIDS“.

Fordern Sie Informationen über Ihren Buchhändler oder direkt an.

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Mönchhofstraße 15 · D-6900 Heidelberg



# Das Problem

**Seit drei Jahrhunderten scheitern Philosophen und Naturwissenschaftler an einer zentralen Frage unserer Existenz: Wie kommt das Ich in das Gehirn?**

VON FRANZ MECHSNER

**E**s ist ganz unmöglich, von der ungeheuren Entwicklung der Hirnforschung nicht beeindruckt zu sein“, schrieb kürzlich der englische Neurobiologe Steven Rose. Aber dann stellte der für unbequeme Fragen bekannte Wissenschaftler eine simple Frage: „Wozu das alles? Was wollen wir denn eigentlich erklären mit unseren Elektronenmikroskopen, Ultrazentrifugen, Mikroelektroden und Computer-Tomographen? Auf welche Frage sollen uns diese Instrumente eine Antwort liefern?“

Roses Irritation scheint neueren Datums zu sein. Denn: „Als ich 1959 mit der Neurobiologie anfang, tat ich das, weil ich glaubte, daß die Hauptaufgabe darin bestehe, das Gehirn und damit den Geist zu erklären.“

In der Tat: Die Hoffnung, eines Tages den Geist und schließlich das geheimnisvolle Zentrum unserer Existenz, die „innere Erfahrung“, als Funktion des Gehirns definieren zu können, ist manchem Neurobiologen nicht fern.

Aber ist die Erwartung, die „Seele“ mit Begriffen der Physik und Biologie beschreiben zu können, nicht von vornherein absurd? Zwar schwer in Worte zu fassen, aber unmittelbar einleuchtend ist schließlich unsere Intuition, daß es zwei grundverschiedene Wirklichkeiten gibt: eine körperliche und eine geistige.

Da ist die „objektive“ Welt der Moleküle der elektromagnetischen Wellen und Hormone. Aber da gibt es auch die „subjektive“ Welt der Gerüche und Farben, der Gefühle und Gedanken. Einerseits leben wir in der Welt der unverrückbaren Naturgesetze, denen wir unterworfen sind. Andererseits sind wir „verdammte zur Freiheit“, wie Sartre

sagt, leben in einer Welt, in der wir uns für unser Tun und Lassen verantwortlich fühlen. Und diese beiden Welten sollen, genau betrachtet, ein und dieselbe sein? Unsere Intuition sagt deutlich: Nein.

Am schärfsten beschrieb René Descartes (1596 bis 1650) diese Intuition in seinem konsequent „dualistischen“ Weltbild. Unabhängig von der mechanisch funktionierenden Welt existiere die freie, unsterbliche Seele in ihrer eigenen Wirklichkeit. Der Mensch sei eine naturgesetzlich funktionierende Maschine, die von der freien, unsterbli-

chen Seele bedient werde. Der Geniestreich des französischen Philosophen erklärte den Menschen zum Objekt neuzeitlicher Naturforschung, rettete aber zur gleichen Zeit dessen Freiheit und Unsterblichkeit.

Da blieb freilich ein hartnäckiges Problem: Wie treten Körpermaschinerie und Seele miteinander in Verbindung? Wie kann der Körper auf die Seele wirken? Wieso tut der Körper, was die Seele will? Wer behauptet, daß die Seele unabhängig von der Körperwelt existiere, der darf sich nicht an der Frage vorbeimogeln, wie beide miteinander in Wechselwirkung treten.

Auch Descartes war sich des Problems bewußt. Er postulierte deshalb einen Ort, wo die Seele auf den Körper einwirke: die Zirbeldrüse. Hier, tief verborgen im Gehirn, säße die Seele, betrachte die von den Sinnesorganen kommenden Bilder und beeinflusse den Weg des „Lebensgeistes“ – eines feinen Stoffes, der in den als feine Röhrchen gedachten Nerven zirkuliere. Wünsche die Seele zum Beispiel, den rechten Arm zu heben, dann dirigiere sie eine Portion „Lebensgeist“ in die Nervenröhren, die zu den Armmuskeln führen.

Doch der Dualismus hat unabänderlich einen großen Haken: Er verstößt gegen die Physik.

Wer einen Hebel bewegen will, muß Energie aufwenden, physikalisch wirksame Energie. Energie muß auch aufwenden, wer Hirnvorgänge beeinflussen will. Wie aber soll ein geistiges Wesen, Bestandteil einer nichtphysikalischen Welt, physikalische Energie mobilisieren? Oder gibt es eine Möglichkeit, so etwas wie „geistige Kraft“ in wirksame Energie umzuwandeln? Wie und unter welchen Umständen soll das geschehen?

Das „psychophysische Problem“ erweist sich damit als perfektes Dilemma: Wer die innere Erfahrung als Teil der materiellen Welt erklären will, setzt sich in Widerspruch zu unserer dualistischen Intuition, denn die Empfindung „Rot“ ist nun einmal etwas wesentlich anderes als die sie begleitenden Hirnprozesse. Und wer die Welt der inneren Erfahrung als eigenständige Wirklichkeit sieht, gerät spätestens dann in

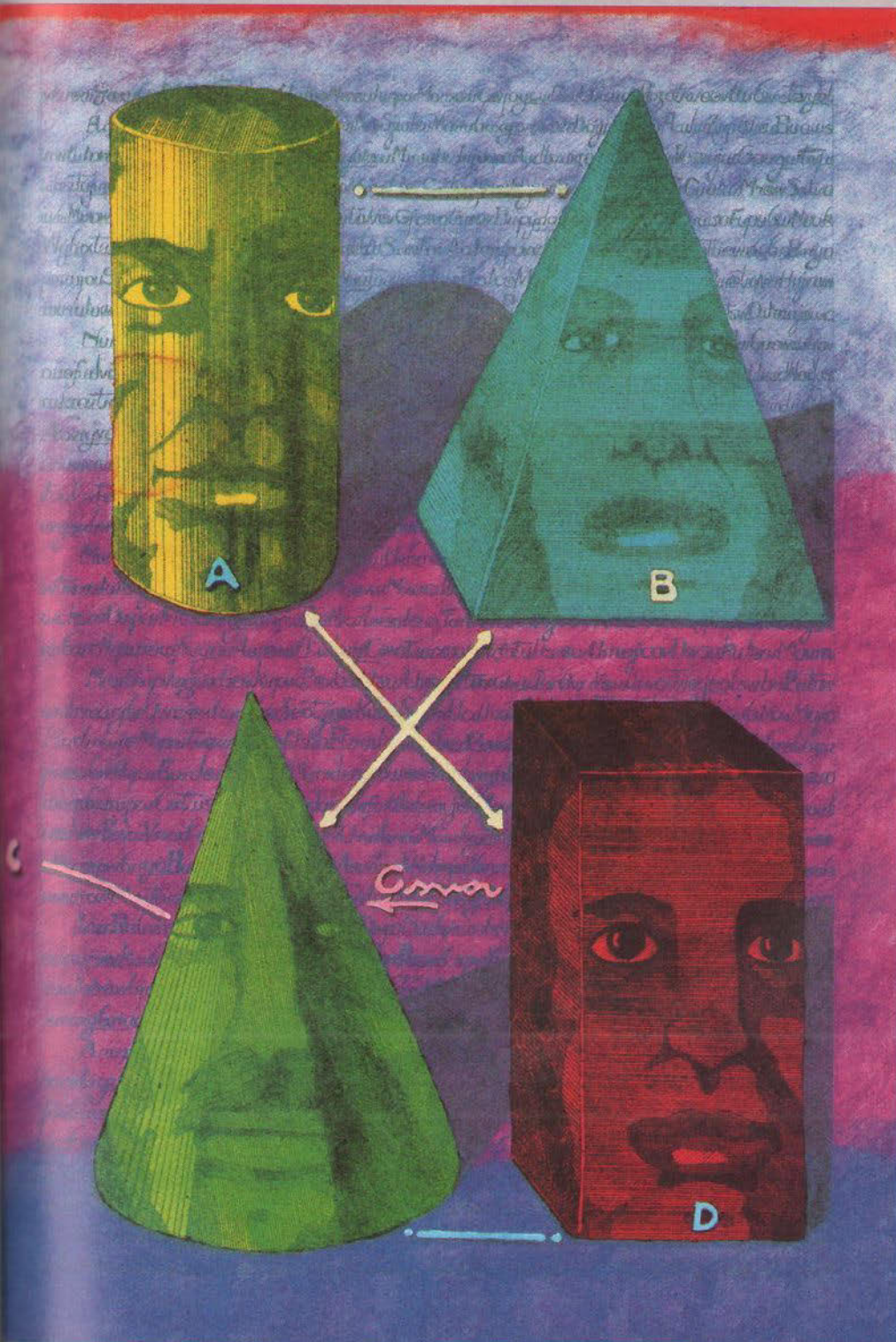
## Positionen zum Leib-Seele-Problem

- 1. Dualismus:** Körper und Geist sind zwei unterschiedliche »Substanzen«.
- 1a Interaktionismus:** Körper und Geist wirken aktiv aufeinander (Descartes, Eccles)
- 1b Parallelismus:** Körper und Geist sind synchronisiert, ohne jedoch aufeinander zu wirken (Leibniz)
- 1c Epiphänomenalismus:** Körperliche Prozesse erzeugen als Begleiterscheinung den Geist
- 2. Monismus:** Geist und Materie gehören zu einer einzigen »Substanz«
- 2a Neutraler Monismus:** Geist und Materie sind verschiedene Aspekte einer einzigen – unzugänglichen – Substanz (Spinoza)
- 2b Strikter Materialismus:** Geist existiert nicht
- 2c Identitätstheorie:** Psychische und körperliche Zustände sind das gleiche



# mit der Seele

PHILOSOPHIE



Körper und Bewußtsein: Eine Welt? Zwei Welten? Drei Welten?

Schwierigkeiten, wenn er die Wechselwirkung zwischen Geist und Materie erklären soll.

Oder sehen wir nur schief, denken wir falsch? Könnte genaueres Hinsehen das Paradox als einen in Wirklichkeit nicht existierenden Widerspruch auflösen? Gibt es vielleicht doch einen Weg aus der Sackgasse des Leib-Seele-Problems – eine andere Theorie, die wir noch nicht bedacht haben?

An Versuchen, dem Dilemma zu entkommen, mangelte es jedenfalls nicht. „Fast alle philosophischen Positionen seit dem 18. Jahrhundert“, schrieb der amerikanische Philosoph Herbert Feigl, „waren primär durch den Wunsch motiviert, das psychophysische Problem zu umgehen.“ Wer von den Philosophen an Freiheit und Unsterblichkeit der Seele glaubte, der mußte – koste es, was es wolle – allen Denkschwierigkeiten zum Trotz den Dualismus vertreten.

Als vermeintlichen Ausweg ersann der Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 bis 1716) seine Version des „psychophysischen Parallelismus“: Körperliche und geistige Prozesse liefen zwar streng parallel, aber nicht weil Körper und Seele wechselweise aufeinander einwirkten, sondern weil alle Abläufe von Anbeginn durch den Schöpfungsakt synchronisiert worden seien – den Ereignissen in zwei Uhren ähnlich, die einmal aufeinander abgestimmt wurden.

Eine zweite wichtige Variante des „psychophysischen Parallelismus“ stammt von dem niederländischen Philosophen Arnold Geulincx (1624 bis 1669): Gott stifte als Mittler die Gleichzeitigkeit von materiellen und seelischen Ereignissen.

So wird die ganze Schwierigkeit des Dualismus sichtbar: Die Versuche, eine dualistische Weltansicht beizubehalten und gleichzeitig das Problem der Wechselwirkung von Leib und Seele zu umgehen, enden in hilflosen Konstruktionen. Wer andererseits diese Wechselwirkung behauptet, kann sie nicht erklären.

Wir sind heute meist nicht mehr so versessen darauf, die Unsterblichkeit der Seele um jeden Preis zu behaupten.



ten. Dem Zeitgeist des 20. Jahrhunderts entsprechend würden wir am liebsten nur an die wissenschaftlich überprüfbare Welt der Naturgesetze glauben und sonst gar nichts. Es gibt die schöne Metapher, die Seele sei wie die Stimmung einer Geige, und wenn die Geige zerbreche, dann vergehe auch ihre Stimmung. Ist also unser Geist „nur“ die Stimmung einer Geige namens Gehirn, sozusagen ein auf naturgesetzliche Weise entstandenes Beiprodukt? Und wie wollen wir dann das eigenartige, durch Überlegungen eher rätselhafter werdende Phänomen der „inneren Erfahrung“ erklären? Oder wenigstens verstehen, wie unsere innere Welt existieren kann, ohne die Naturgesetze zu verletzen?

**V**ielleicht ist aber unser Verhalten restlos von physikalischen Prozessen im Gehirn determiniert und das „Seelische“, die inneren Erlebnisse, sind nichts als ein begleitendes Schattenspiel – von physikalischen Vorgängen erzeugt, aber physikalisch unwirksam: ein „Epiphänomen“, ein aus anderen Phänomenen hervorgegangenes Phänomen.

Doch auch der „Epiphänomenalismus“ führt die Philosophen nicht aus der Teufelsküche. Zunächst scheint alles ganz einfach zu sein. Da gibt es eine geschlossene Welt aus Energie und Materie, in der zunächst unkomplizierte,

dann jedoch zunehmend kompliziertere Prozesse ablaufen – bis dann plötzlich bei einer bestimmten Art hochkomplizierter Prozesse eine „zweite Welt“ entsteht: die der Bilder, Gefühle, Wünsche. Und dies soll „einfach so“ geschehen: ohne die Geschlossenheit der ersten, der physikalischen Welt aufzubrechen, ohne daraus auch nur minimale Mengen an Energie, Materie und Information zu entnehmen?

Doch wozu sind mentale Zustände nütze, die keine physikalische Wirkung haben? Und erneut taucht die unbeantwortete Frage des Dualismus auf: Wie wirkt die Materie auf den Geist? Etwa durch nichtphysikalische Signale aus einer physikalischen Welt? Wenn aber die Epiphänomenalisten dies annehmen, muß ihnen die Entstehung des geistigen Kosmos so rätselhaft bleiben wie die Entstehung des materiellen Kosmos aus dem Nichts. Die Epiphänomenalisten waren angetreten, die Geschlossenheit des physikalischen Weltbildes zu retten. Und nun finden sie sich bei konsequentem Überdenken ihrer Position in Spekulationen ver-

strickt, die ihnen ein Graus sein müssen.

In Zeiten der Verwirrung wird der Radikale gern gehört, der den gordischen Knoten mit einem scharfen Gedankenhieb löst. Gilbert Ryle (1900 bis 1976), ein englischer Philosoph, wagte 1949 einen solchen Streich. In seinem Buch „The Concept of Mind“ versuchte er das psychophysische Problem nicht etwa zu lösen, sondern als Scheinproblem zu entlarven. In Wahrheit existierten die „inneren Zustände“ gar nicht, behauptete Ryle, und bewies es so: Über „innere Zustände“ anderer Menschen kann ich nichts wissen und daher nicht sinnvoll, „überprüfbar“ darüber reden. Über meine eigenen inneren Zustände kann ein anderer Mensch nichts wissen; deshalb kann ich ihm auch nichts darüber mitteilen in einer öffentlichen, sinnvollen Sprache, mit der sich nur über Überprüfbares reden läßt.

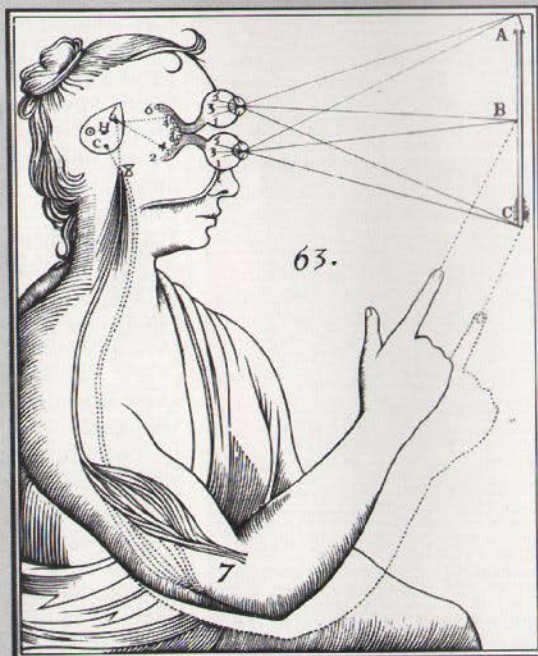
Aber sagen wir nicht: „Du bist traurig“ und „Ich bin froh“ und meinen damit innere Zustände?

Das sei eben der Grundirrtum, würde Ryle antworten: Wenn wir sagen „Fritz ist traurig“, können wir – weil Sprache nur von öffentlich überprüfbaren Dingen handelt – nicht irgendwelche „inneren Zustände“ von Fritz meinen. Wenn wir so reden, sprechen wir Ryle zufolge von „Verhaltendispositionen“. So wie wir sagen „Glas ist zerbrechlich“, so sagen wir „Ich bin traurig“ und meinen damit, daß wir von uns ein bestimmtes Verhalten erwarten – etwas Physikalisches und nichts Psychisches. Das Bewußtsein, die Seele, das „Gespenst in der Maschine“ und auch die Idee des Dualismus sind demnach nur die Folgen eines kolossalen Irrtums in der Verwendung unserer Sprache. Der Geist existiert nicht, da wir in Wahrheit nicht sinnvoll darüber reden können – es scheint uns nur so.

**R**yles radikale Attacke war wirksam. Fast zwei Jahrzehnte lang gab es so etwas wie eine philosophische Diskussion des Leib-Seele-Problems nicht mehr. Nachdem die uralte, schwierige Frage als Scheinproblem entlarvt war, blieb der Philosophie nur noch die Aufgabe, die sprachliche Konfusion bei der Verwendung mentaler Ausdrücke allmählich zu beseitigen.

Zurück blieb freilich auch ein schwer zu unterdrückendes Unbehagen: das Gefühl, von Ryles Argumentation im Grunde nur brillant hereingelegt worden zu sein. Was würden wir von einem Ingenieur halten, der uns in atemberaubender, nicht zu widerlegender Gedankenakrobatik beweist, daß die Hummel

## Wie wirkt Materie auf Geist? Wie wirkt Geist auf Materie?



Descartes sah die Seele in der Zirbeldrüse





Die Seele verläßt den Körper: Frühdruck einer Lutherbibel

nicht fliegen kann? Wir wissen, daß sie fliegen kann. Wir wissen auch, daß wir ein Bewußtsein haben. Und es gibt kein Argument, das dieses Wissen zerstören kann: „Ich denke, also bin ich.“ Diese Erkenntnis galt Descartes sogar als die einzig gewisse.

Was tun?

Die innere Welt zu leugnen, widerspricht unserer elementarsten Gewißheit. Sie nur als Begleiterscheinung physikalischer Prozesse im Gehirn zu deuten, führt bei konsequentem Weiterdenken ausgerechnet zu paranormalen Spekulationen – ein Schreckgespenst für Naturwissenschaftler.

**A**ber gibt es nicht doch einen Ausweg? Was ist von den „monistischen“ Versuchen zu halten, die Materie und Bewußtsein als Phänomene einer einzigen, in sich geschlossenen Welt zu sehen? Eine solche „monistische“ Lösung bot der Philosoph Baruch de Spinoza (1632 bis 1677) an. Spinoza hielt Materie und Bewußtsein für Ausdrucksformen einer einzigen, uns unzugänglichen „Substanz“: Materie sei „Substanz“ von außen gesehen, Bewußtsein die gleiche „Substanz“ von innen. Damit würden alle Probleme der Wechselwirkung von Geist und Materie entfallen, da „Substanz“ auf „Substanz“ in einer einzigen, geschlossenen Welt wirke.

Die Frage, ob geistige und körperliche Vorgänge im Grunde dasselbe seien, wurde in den letzten Jahrzehnten umfassend und eingehend diskutiert. Nicht nur für Naturwissenschaftler ist die Vorstellung verführerisch, Hirn-

## Ist die Psyche nur ein Schattenspiel der Physik?

und Bewußtseinszustände seien eigentlich dasselbe, seien „identisch“. Nur: Was ist eigentlich mit dem Wort „identisch“ gemeint?

Die Geschichte der Wissenschaft ist voller Entdeckungen überraschender Identitäten. Der Morgenstern ist identisch mit dem Abendstern, obwohl er doch zu anderer Zeit an einem anderen Ort erscheint. Wasser ist identisch mit  $H_2O$ . Blitze sind identisch mit elektrischen Entladungen in der Atmosphäre.

Ist diese Art der „Identität“ gemeint, wenn gesagt wird, unsere Wünsche, Phantasien und Schmerzen seien „identisch“ mit bestimmten Aktivitätszuständen des Gehirns? Es fällt uns nicht schwer, zu glauben, daß Blitze elektrische Entladungen sind. Denn beide Phänomene sind Bestandteile der materiellen Welt und durch Experimente oder logisches Denken als dasselbe Geschehen mit unterschiedlichem Namen zu erkennen.

Dagegen werden wir die „Identität“ von Materie und Bewußtsein niemals wirklich begreifen können, muß den Monisten entgegengehalten werden: Die „Identität“ von Körper und Seele könnte, konsequent gedacht, nur in der uns unzugänglichen Welt der „Substanz“ plausibel gemacht werden. Wenn

diese „Substanz“ existiert, herrschen in ihr nicht Gesetze der Physik, sondern Gesetze, denen materielle und geistige Phänomene zugleich gehorchen.

Abermals steigt Unbehagen auf: Wird hier nicht eine „dritte Welt“ – die mysteriöse „Substanz“ – konstruiert, um die Identität der ersten Welt mit der zweiten plausibel zu machen? Ist das Spiel mit dem Wort „identisch“ vielleicht wieder nur ein Trick, um unsere Hilflosigkeit zu vernebeln?

Sämtliche Lösungsversuche des Leib-Seele-Problems führen somit zu einer erstaunlichen Konsequenz: Die Vorstellung, daß die Naturwissenschaft „im Prinzip“ alles erklären kann, was wir über die Welt wissen, ist nicht haltbar. So gesehen wäre sogar eine Rückkehr zu dualistischen Vorstellungen nicht mehr völlig absurd.

**D**ennoch wurde der erste derartige Versuch in jüngerer Zeit einhellig verrissen. Im Jahr 1977 hatten John Eccles und Karl Popper in ihrem Buch „Das Ich und sein Gehirn“ den Dualismus wiederaufleben lassen. Der in England lebende Philosoph Popper stellte sich darin den Geist zwar als selbständiges Wesen, aber doch als Evolutionsprodukt vor. Der australische Hirnforscher und Nobelpreisträger Eccles behauptete jedoch wie Descartes die Existenz der „unsterblichen Seele“, die den Körper bedient. Das „Gespenst in der Maschine“ war zurückgekehrt.

Trotz allgemeinen Spotts stellte sich Eccles in der Folgezeit konsequent dem Problem, das schon Descartes sah, und versuchte, den Ort der Wechselwirkung von Körper und Seele zu finden. Heute meint er, diesen Ort in bestimmten Arealen der Hirnrinde gefunden zu haben: Dort könnte die Seele die Aktivität der Nerven beeinflussen.

Wer diese Lösung absurd nennt, sollte bedenken, daß auch sämtliche anderen Versuche, das Leib-Seele-Problem zu lösen, nicht weiter geführt haben. Geblieben sind eine gewisse Ratlosigkeit und die Verblüffung darüber, daß unser so erfolgreiches physikalisches Weltbild hier an seine Grenzen stößt.

„Die Diskussion in diesem Jahrhundert hat zumindest gezeigt, daß das psychologische Problem nicht als Scheinproblem abgetan werden kann“, sagt der Bremer Neurobiologe Hans Flohr, der sich um Zusammenarbeit von Biologen, Psychologen und Philosophen in dieser Frage bemüht. „Die Wissenschaft darf diesen Fragenkomplex nicht weiter ignorieren. Eine Theorie des menschlichen Verhaltens und des Gehirns wird sich nicht um das Leib-Seele-Problem herumogeln können.“ □



**G**ehirne existieren nicht im Vakuum, Gefühle sind steril ohne Partner, Gedanken wollen ausgetauscht sein: Ein einzelner Mensch, aufgewachsen ohne jeden sozialen Kontakt, wäre hilflos und erschiene uns so befremdlich wie einst Kaspar Hauser seinen Zeitgenossen. Gemeinsam ist uns unsere biologische Basis, der »Gen-Pol« des Homo sapiens, und Menschenhirne werden erst durch Gemeinsamkeit stark. Dieses Prinzip, vom Leben auf der Erde in Äonen erprobt, hat den Aufstieg des Menschen ermöglicht. Der evolutionäre Sprung zur Menschwerdung war offenbar die Befreiung unserer Vorfahren aus allzu engen, genetisch fixierten Verhaltensmustern. Dank dieser Öffnung konnten sich Hirnwachstum und Freiheit des Verhaltens so lange gegenseitig aufschaukeln, bis daraus etwas völlig Neues keimte: menschliche Kultur. Wir können, anders als alle übrigen Lebewesen dieses Planeten, unsere individuell gewonnenen Erfahrungen dank der Sprache untereinander austauschen und mittlerweile auch außerhalb des Körpers speichern – auf Papier etwa oder in Computern. Die Schnittstelle aber zwischen Natur und Kultur bleibt unser Gehirn. Erst dessen Fähigkeit erlaubt das Experiment auf den folgenden Seiten: Ein einziges Wort, ein Bild, ein Zitat kann genügen, um Gefühle, Erinnerungen und Gedanken spontan zu wecken – unsere individuellen Welten der Phantasie, eingebettet im Kosmos des menschlichen Geistes

## TRAUER FREUDE



**Wer mit dem Geist der Traurigkeit geplagt wird, der soll auf's höchste sich hüten, und vorsehen, daß er nicht allein sei.**

*Martin Luther*

**Mein Gott, wie ist die Welt noch jung und schön! Wie ist noch nichts ausgeschöpft, wie kann alles noch das Herz der Menschen höher schlagen lassen!**

*Louis Aragon*











Die Freiheit ist uns ein schönes Weib:  
Sie hat ein' Ober- und Unterleib.  
Sie ist kein fettes Bürgerschwein.  
So soll es sein!

*Wolf Biermann*

# FREIHEIT UNFREIHEIT

Sein Blick ist vom Vorübergehn der Stäbe  
so müd geworden, daß er nichts mehr hält.  
Ihm ist, als ob es tausend Stäbe gäbe  
und hinter tausend Stäben keine Welt.

*Rainer Maria Rilke*





# VÖLLEREI ASKESE



**Fröhliche Armut ist ehren-  
voll; freilich ist sie gar nicht Armut,  
wenn sie fröhlich ist . . .  
Denn wer genug hat, ist nicht arm,  
sondern wer mehr begehrt.**

*Seneca*

**Ein Stück Schwarzbrot und  
ein Krug Wasser stillen den  
Hunger eines jeden Menschen;  
aber unsere Kultur hat die  
Gastronomie geschaffen.**

*Honoré de Balzac*















**Hoffnung wäre ja keine  
Hoffnung, wenn sie nicht ent-  
täuscht werden könnte.**

*Ernst Bloch*

**Die Bürger können zwei Dinge  
tun: Die Stadt verlassen, bevor die  
Schlacht beginnt, was meistens  
passiert, wenn es genügend Zeit  
gibt, oder Schutz unter der Erde  
suchen. In Schutzkellern. Die sind  
sehr einfach und auch billig.**

*Samuel T. Cohen,  
Erfinder der Neutronenbombe*

# HOFFNUNG ANGST







**Auch das geringste  
Schaffen steht höher als das Reden  
über Geschaffenes.**

*Friedrich Wilhelm Nietzsche*

# **SCHAFFEN ZERSTÖREN**

**Beim Zerstören gelten alle  
falschen Argumente, beim Aufbauen  
keineswegs. Was nicht wahr  
ist, baut nicht.**

*Johann Wolfgang v. Goethe*











**Kursiv gedruckte Wörter  
sind Querverweise**

### Acetylcholin

Wichtiger Neurotransmitter

### Apikaldendrit

Aufwärtssteigender Dendrit der Pyramidenzelle (siehe Grafik Seite 163).

### Axon

Oft sehr langer Fortsatz der Nervenzelle, der elektrische Impulse vom Zellkörper weg zu den Synapsen leitet (siehe Grafik Seite 163).

### Balken

(siehe Gehirn und Ausklappseite 21)

### Basaldendriten

Buschig verzweigte Dendriten der Pyramidenzelle (siehe Grafik Seite 163).

### Bildgebende Verfahren

Sammelbegriff für moderne diagnostische Techniken, bei denen aus dem Körper gewonnene Daten mit Computerhilfe in Bilder umgesetzt werden. Für die Neurologie spielen die Computer-Tomographie (CT), die Kernspin-Tomographie und die PET-Technik eine wachsende Rolle (siehe Grafiken Seite 162).

### Brücke

(siehe Gehirn und Ausklappseite 21)

### Computer-Tomographie (CT)

Bildgebendes Verfahren der Röntgen-Technik (siehe Zeichnung Seite 162).

### Cortex (= Hirnrinde)

Die vielfach gefaltete äußere Schicht des Gehirns. Sie besteht aus Grauer Substanz. Großhirn und Kleinhirn werden von ausge-

dehnten Rinden umhüllt. Aber auch bestimmte Kerne des Gehirns besitzen einen Cortex.

### Dendrit

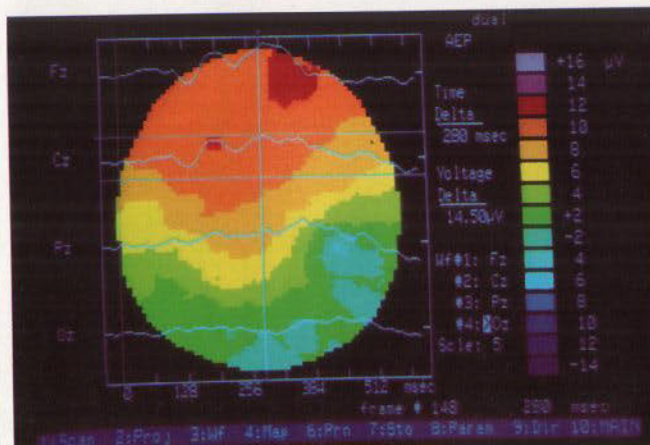
Fortsatz der Nervenzelle, der – oft vermittelt über Neurotransmitter – Erregungen empfängt. Eine Nervenzelle hat meist viele, stark verzweigte Dendriten (siehe Grafik Seite 163).

### Dendritischer Dorn

Dornen oder „Spines“ sind Ausstülpungen der Dendritenmembran, die man im Lichtmikroskop als kleine Knöpfchen sehen kann (siehe Seite 11 rechts oben). Auf jedem Dorn liegt eine Synapse. Über die Synapsen empfängt der Dendrit Erregungen von anderen Nervenzellen. Synapsen, die auf Dornen liegen, scheinen in ihrer Durchlässigkeit („Stärke“) veränderbar zu sein; sie könnten eine wichtige Rolle beim Lernen spielen. Übersät mit Dornen sind vor allem die Pyramidenzellen des Großhirns und die „Purkinje-Zellen“ des Kleinhirns (siehe auch Grafik Seiten 21 bis 23).

### Elektroenzephalographie (EEG)

Verfahren zur fortlaufenden graphischen Darstellung von Gehirnströmen, die mit Elektroden von der Kopfhaut abgeleitet werden. Hirnstromkurven können bestimmte Gehirnzustände widerspiegeln, etwa Tiefschlaf oder Aufmerksamkeit. Bei vielen Krankheiten – zum Beispiel Epilepsie – ist das EEG charakteristisch verändert. Mit Hilfe von Computern lassen sich die EEG-Aufzeichnungen neuerdings auch in Sequenzen farbiger Schnittbilder umsetzen. Diese „Kartierung der elektrischen Hirnaktivität“ wird nach der englischen Bezeichnung „Brain Electrical Activity Mapping“ kurz „Beam-Technik“ genannt (siehe Foto): So



EEG-Signale, mit der »Beam«-Technik in farbige Bildsequenzen umgesetzt

kann zum Beispiel die Aktivität des Gehirns bei verschiedenen geistigen Aufgaben oder bei Hirnleistungsstörungen sichtbar gemacht werden.

### Formatio reticularis

Netzförmige, wenig gegliederte Nervenmasse mit vielfältigen Aufgaben im Stammhirn. Sie spielt eine entscheidende Rolle bei lebenswichtigen Reflexen – zum Beispiel dem Atemreflex – und erfüllt eine Art Weckfunktion für die Großhirnrinde.

### Gehirn

Das Gehirn der Wirbeltiere besteht aus mehreren Teilen: Im verlängerten Mark (ocker, siehe Grafik) und im Hinterhirn (orange) entspringen viele Hirnnerven – Nerven, die aus dem Gehirn vor allem in den Kopf ziehen. Hier liegen auch Zentren vieler vegetativer Funktionen wie Atmung, Kreislauf und Stoffwechsel. Das Mittelhirn (rot) enthält im Tektum ein primitives Sehzentrum, das bei niederen Wirbeltieren dominiert, bei Säugern jedoch an Be-

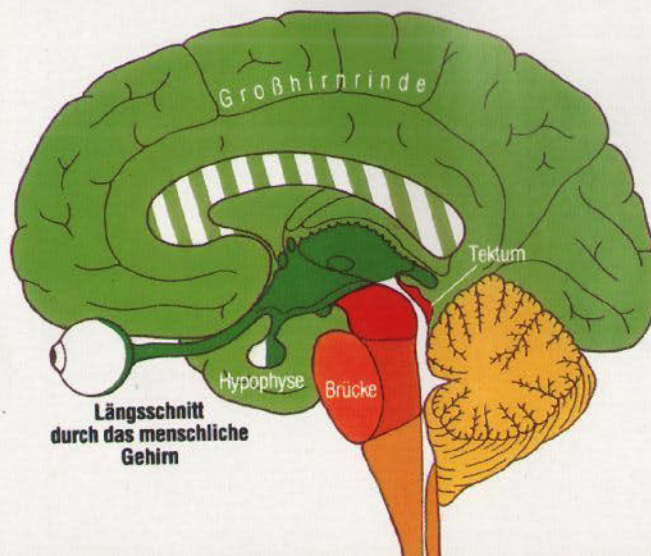
deutung gegenüber der Sehrinde des Großhirns verloren hat (siehe Großhirnrinde). Das Zwischenhirn (dunkelgrün) reguliert wichtige Triebe und ist eine bedeutende Umschaltstation zur Hirnrinde – vor allem der Thalamus. Die Netzhaut des Auges gehört samt dem Sehnerv zum Zwischenhirn. Die bis jetzt erwähnten Hirnteile werden oft zum Stammhirn zusammengefaßt. Entwicklungsgeschichtlich gesehen geht auch das Kleinhirn (gelb) aus dem Stammhirn hervor. Die Großhirnrinde ist eine Vergrößerung des Riechhirns unserer tierischen Vorfahren. Sie überwuchert bei höheren Säugetieren und vor allem beim Menschen die tieferen Hirnteile völlig (siehe Seiten 38/39). Im „Balken“ (grünweiß gestreift) kreuzen Axone von Pyramidenzellen zur jeweils gegenüberliegenden Hirnrinde.

### Gene

Die materiellen Träger des Erbgutes. Gene sind definierte Abschnitte der DNS-Kettenmoleküle im Zellkern.

### Gliazellen (= Neuroglia)

Sie sitzen in großer Zahl im Nervengewebe, sorgen für die Ernährung der Nervenzellen, für Stoffaustausch und Entgiftung und gewährleisten ein konstantes „inneres Milieu“, das für die diffizilen Vorgänge an der Neuronenmembran äußerst wichtig ist. Schwannsche Scheiden aus Gliamaterial (siehe Grafik Seite 163) umhüllen die Axone im peripheren Nervensystem. Die „Mikroglia“ besteht aus kleinen, wandernden Zellen, die Gifte beseitigen.





## Golgi-Färbung

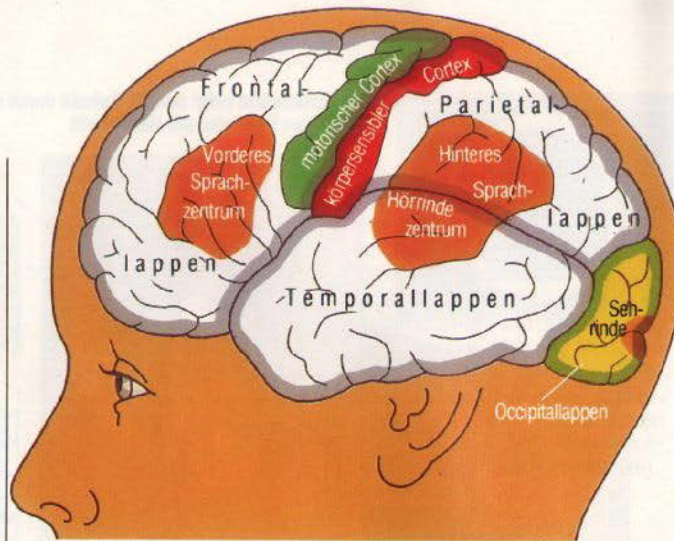
Nervenzellfärbemethode

## Graue Substanz

Bereiche des Zentralnervensystems, die sehr viele, dichtgepackte Nervenzellkörper enthalten. Sie sind dunkler als die Gebiete der sogenannten *Weißer Substanz*, die vor allem Axone enthalten. Zur Grauen Substanz gehören die verschiedenen Hirnrinden, der innere Teil des Rückenmarks und die *Kerne* des Gehirns.

## Großhirnrinde

Sie umgibt wie ein gefaltetes Tuch die beiden Großhirnhälften. Sie wird anatomisch in „Lappen“ unterteilt (siehe Grafik). Ausfallerscheinungen bei Hirnverletzten und Reizexperimente an verschiedenen Stellen der Hirnrinde haben gezeigt, daß bestimmte Rindengebiete jeweils für bestimmte Funktionen wie Sprache, Sehen oder Hören zentrale Bedeutung haben. Die Grafik zeigt das vordere, „motorische“ Sprachzentrum der linken Hirnhälfte sowie das hintere Sprachzentrum, das zum Verstehen gesprochener Sprache und zum Lesen unerlässlich ist. Sichtbar sind auch die Hörinde und die Sehrinde. Von den *Pyramidenzellen* der Motorischen Rinde reichen *Axone* bis hinunter ins *Rückenmark* und beeinflussen von dort die Körpermuskeln. Die „körpersensible Rinde“ empfängt Signale aus Muskeln und Haut und bildet so Empfindung, Bewegung und Haltung des Körpers ab. Das wesentliche Geschehen in der Großhirnrinde ist wohl die wechselnde Aktivität von *Pyramidenzellverbänden*. Aus dem Zellkörper dieser wohl wichtigsten Nervenzelle der Rinde wächst ein dicker *Apikaldendrit* nach oben und verzweigt sich in den obersten Schichten der Rinde. Seitlich entspringen aus dem Zellkörper buschige *Basaldendriten*. Alle *Dendriten* sind übersät mit *Dendritischen Dornen*. Ein dünnes *Axon* läuft nach unten aus der Hirnrinde heraus. *Pyramidenzellen* wirken höchstwahrscheinlich erregend aufeinander und auch auf andere Nervenzellen. Die *Axone* der weniger häufigen „Sternzellen“ und „Martinottizellen“ (Grafiken rechts) verlassen dagegen die Rinde nicht. Der Begriff „Sternzelle“ umfaßt recht verschiedene, teils erregende, teils hemmende



Großhirnrinde: Karte der »Lappen« und einiger wichtiger Rindenfelder

Zelltypen, die vielleicht die Aktivität von *Pyramidenzellverbänden* regulieren. Ob die *Martinottizellen* erregend oder hemmend wirken, ist nicht bekannt.

## Hippokampus

Entwicklungsgeschichtlich alter Teil der *Großhirnrinde*. Er spielt eine wichtige Rolle für das Gedächtnis.

## Hirtheorie

Neuer Zweig der Gehirnforschung. Er versucht, theoretische Modelle der Hirnfunktion zu entwerfen und, wenn möglich, zu testen. Die wenigen Hirntheoretiker treffen sich erst seit einigen Jahren zu regelmäßigem Gedankenaustausch.

## Hypophyse

Die Hypophyse (Hirnanhangsdrüse) ist die wichtigste Brücke zwischen Nervensystem und Hormonsystem. Sie schüttet sowohl eigene als auch Hormone des *Hypothalamus* in die Blutbahn aus.

## Hypothalamus

Zentrum für Hunger, Durst, Sexualität und Temperatur; oberste Hormondrüse. Er liegt unter dem *Thalamus* und steuert die *Hypophyse*.

## Ion

Elektrisch positiv oder negativ geladenes Atom oder Molekül. Der Transport von Ionen durch die Zellmembran bildet die Grundlage der Erregung von Nerven- und Muskelzellen.

## Kerne

Inseln *Grauer Substanz* wie z. B. die „*Basalganglien*“ oder die Kerne im *Thalamus*.

## Kernspin-Tomographie

Bildgebendes Verfahren, englisch „*Nuclear Magnetic Resonance Tomography*“ (NMR oder MR). Das 3-D-Bild des Hirntumor-Patienten auf der Ausklappseite 20 wurde von einer Forschergruppe der Universität Hamburg um Karl-Heinz Höhne mit Hilfe eines Computers aus Daten konstruiert, die mit einem Kernspin-Tomographen aus dem Kopf des Kranken gewonnen worden waren. Technische Details siehe Grafik Seite 162.

## Kleinhirn

Das Kleinhirn ist an der Feinsteuerung der Körperbewegung und -haltung beteiligt. Es ist umgeben von einer sehr eng gefalteten, dünnen Rinde. In dieser Rinde stehen – flach wie *Spalierobstbäume* – die „*Purkinje-Zellen*“ nebeneinander. Zur anatomischen Lage des Kleinhirns siehe *Gehirn* und Ausklappseite 21.

## Limbisches System

Komplexes Gebilde aus mehreren Hirnstrukturen, das an der Entste-

hung der Gefühle und gefühlsbetonter Verhaltensweisen beteiligt ist. Ältere Teile der Hirnrinde wie der *Hippokampus* gehören ebenso dazu wie Teile des Zwischenhirns. Das Limbische System bildet in etwa einen Ring um den *Balken*.

## Martinottizelle

Nervenzelltyp der *Großhirnrinde* (Bild unten)

## Mikroglia

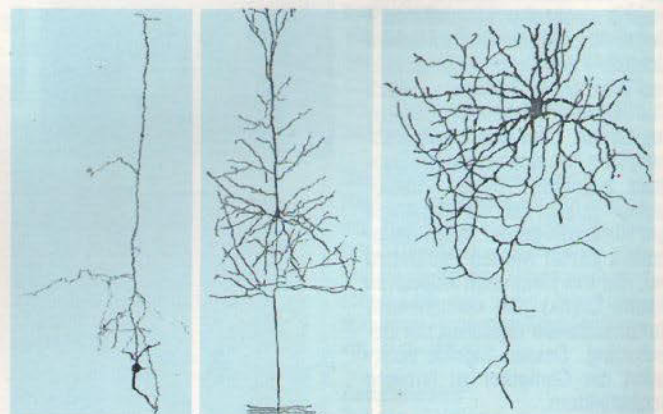
Kleine, wandernde *Gliazellen*

## Nerv

Ein Bündel von vielen Neuronenfortsätzen, das meist von *Axonen* gebildet wird. „*Sensorische*“ Nerven leiten Sinnesinformation ins *Zentralnervensystem*, „*motorische*“ geben Befehle des *Gehirns* und *Rückenmarks* an die Muskeln weiter. Meist leiten die Axone, die zusammen in einem Nerv liegen, verschieden schnell (siehe *Nervenzelle*). Zusätzlich zu den erwähnten motorischen und sensorischen Nerven, die den Körper mit Gehirn und Rückenmark verbinden, gibt es die Nerven des *Vegetativen Nervensystems*. Neben „reinen“ Nerven gibt es auch „gemischte“ mit Fasern von sensorischen, motorischen und vegetativen Neuronen.

## Nervenzelle (= Neuron)

Neuronen sind die Bausteine des Nervensystems. Bis zu 100 Milliarden davon gibt es in unserem Körper – etwa so viele wie Sterne in der Milchstraße. Neuronen leiten elektrische Signale von Sinnesorganen zu Neuronen, von Neuronen zu Muskeln, Drüsen und Gefäßen. Sie sind erstaunlich vielgestaltig, doch ihr

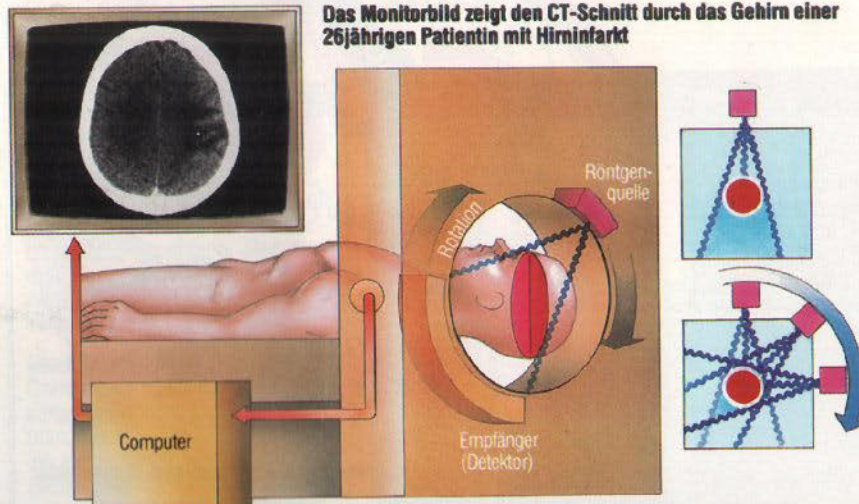


Nervenzelltypen: Martinottizelle, Pyramidenzelle, Sternzelle



## Computer-Tomographie (CT)

Das erste der neuen Verfahren, die elektronisch aufbereitete Schnittbilder – „Tomographien“ – aus dem Körper liefern. Der Patient liegt in der Öffnung des Geräts. In diesem rotieren Röntgenquelle und -empfänger. Während sie den Körper durchlaufen, werden Röntgenstrahlen vom Gewebe je nach dessen Dichte unterschiedlich stark abgeschwächt (kleine Grafiken). Aus den so modulierten Signalen errechnet der Computer ein Schnittbild, das auf dem Monitor sichtbar wird. Die Grauwerte zeigen die unterschiedliche Dichte des Gewebes: Feste Knochen sind weiß, Gewebsflüssigkeit ist fast schwarz.

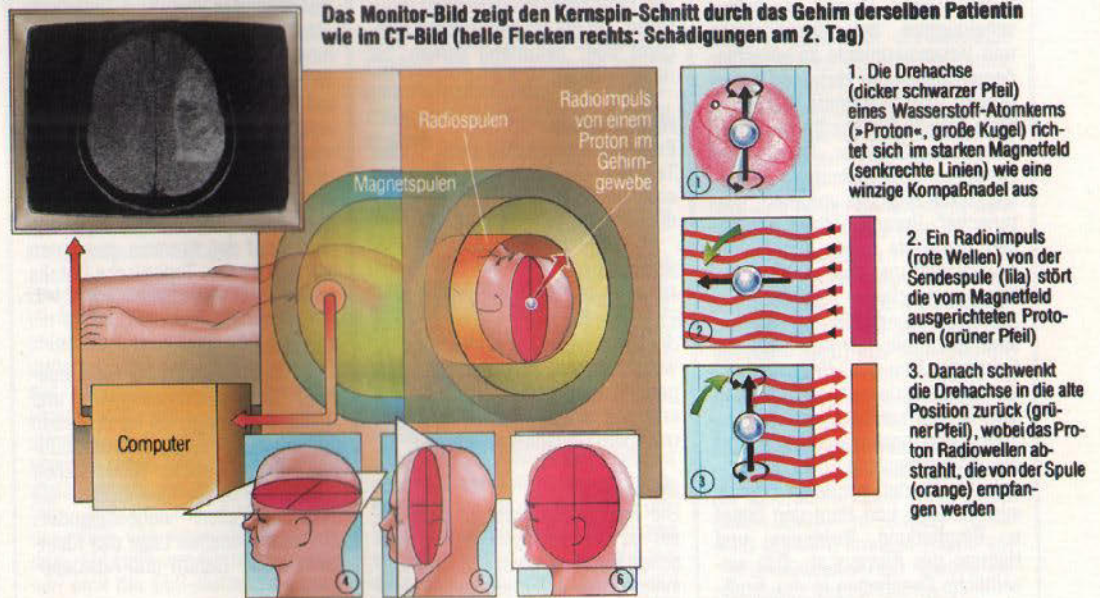


Das Monitorbild zeigt den CT-Schnitt durch das Gehirn einer 26jährigen Patientin mit Hirninfarkt

Die aus der Röhre (lila) kommenden Röntgenstrahlen (blau) treffen im Gewebe (hellblau) mitunter auf Atomkerne (dunkelrot) und werden absorbiert. Durch die vielen Strahlungswinkel während eines Umlaufs der Röntgenröhre werden unterschiedliche »Schatten« (mittelblau) geworfen

## Kernspin-Tomographie

Neue Diagnosetechnik ohne Röntgen- oder Gamma-Strahlung. Das Gehäuse birgt starke Magnetspulen, die röhrenförmige Radiospulen umschließen. Der Patient liegt innerhalb der Radiospulen. Durch drei senkrecht aufeinander stehende Magnetfelder werden Raumkoordinaten erzeugt und damit Schnittebenen (rote Fläche im Kopf) festgelegt. Ein weiteres Magnetfeld übt »Zwang« auf die Wasserstoff-Atomkerne im Körpergewebe aus: Es richtet deren unterschiedlich orientierte Drehachsen (Grafik 1) gleich. Diese werden mit einem Radio-Impuls gestört (2) und strahlen, wenn sie in ihre Ausgangsposition zurückschwenken, Radiowellen ab (3). Daraus errechnet der Computer das Schnittbild – in verschiedenen Ebenen (4, 5, 6) – und sogar in 3-D.

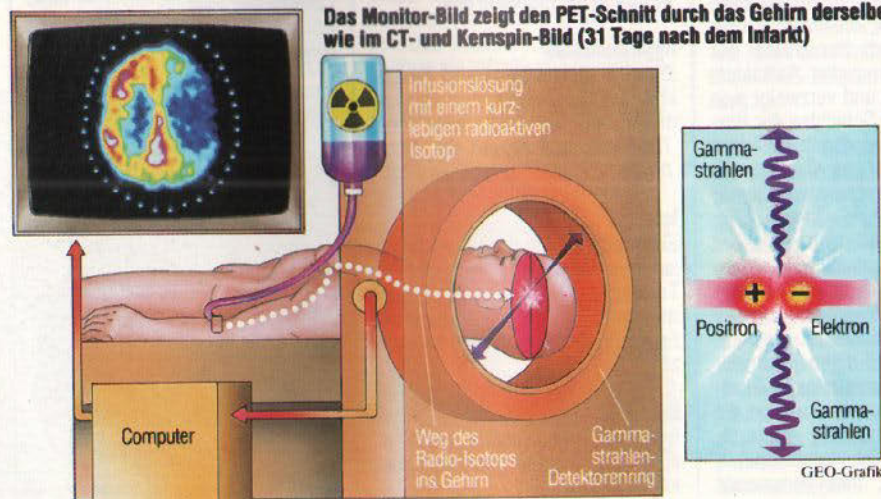


Das Monitor-Bild zeigt den Kernspin-Schnitt durch das Gehirn derselben Patientin wie im CT-Bild (helle Flecken rechts: Schädigungen am 2. Tag)

1. Die Drehachse (dicker schwarzer Pfeil) eines Wasserstoff-Atomkerns (»Proton«, große Kugel) richtet sich im starken Magnetfeld (senkrechte Linien) wie eine winzige Kompaßnadel aus
2. Ein Radioimpuls (rote Wellen) von der Sendespule (lila) stört die vom Magnetfeld ausgerichteten Protonen (grüner Pfeil)
3. Danach schwenkt die Drehachse in die alte Position zurück (grüner Pfeil), wobei das Proton Radiowellen abstrahlt, die von der Spule (orange) empfangen werden

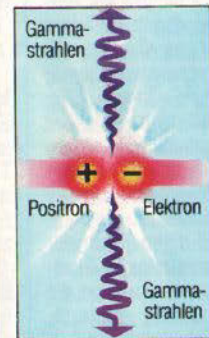
## PET

Die Positronen-Emissions-Tomographie macht physiologische oder biochemische Aktivitäten im Gehirn sichtbar – und das in höchster zeit- und räumlicher Auflösung. Auch hier liegt der Patient in der Öffnung des Geräts. Über eine Infusionslösung wird ihm eine radioaktive Substanz zugeführt. Dieses »Radioisotop« gelangt über die Blutbahn in den Hirnstoffwechsel. Beim radioaktiven Zerfall werden Positronen frei, die mit Elektronen kollidieren (kleine Grafik). Die entstehenden Gammastrahlen registriert der Detektorring. Dessen Signale verarbeitet der Computer zu farbigen Schnittbildern.



Das Monitor-Bild zeigt den PET-Schnitt durch das Gehirn derselben Patientin wie im CT- und Kernspin-Bild (31 Tage nach dem Infarkt)

Beim Zerfall eines kurzlebigen Radio-Isotops im Körper entstehen Positronen (+), die sofort mit negativ geladenen Elektronen (-) kollidieren. Dabei schließt in entgegengesetzter Richtung je ein Gammastrahl davon



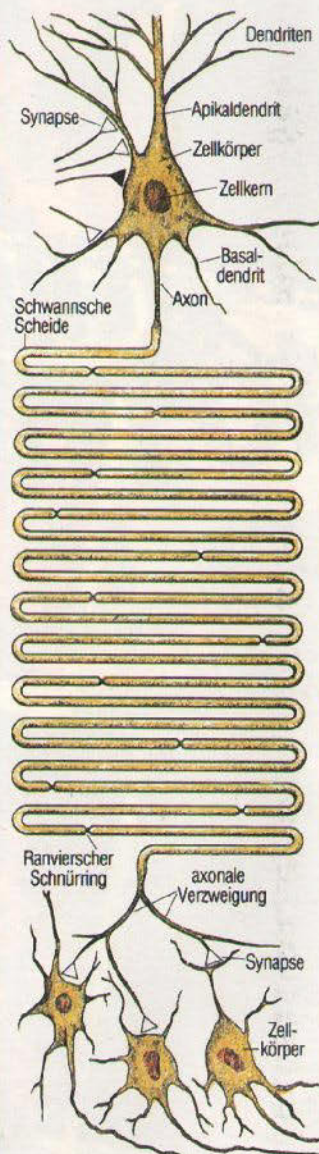
GEO-Grafik



prinzipieller Aufbau ist stets der gleiche (Grafik rechts): Aus einem Nervenzellkörper, in dem auch der Zellkern liegt, entspringen zwei Arten von Fortsätzen. Die *Dendriten* sind – ebenso wie der Zellkörper – von *Synapsen* anderer Neuronen bedeckt und werden so elektrisch erregt. Aber nur, wenn die Erregung eine bestimmte „Schwelle“ übersteigt, erzeugt der Zellkörper ein kurzes elektrisches Signal, das sogenannte Aktionspotential, das durch das *Axon* in voller Stärke weitergeleitet wird: Das Neuron „feuert“. Axone können zwischen wenigen Mikrometern und mehreren Metern lang sein (z. B. die Axone vom Elefantenrückenmark zum Elefantenfuß). In dünnen Axonen läuft das Signal relativ langsam, in dickeren schneller. In Axonen, die von der sogenannten Schwannschen Scheide (*Gliazellen*) umhüllt sind, läuft es am schnellsten: Es hüpf von einem „Ranvierschen Schnürring“ zum nächsten – in dicken Axonen bis zu 120 Meter pro Sekunde. Schließlich erreicht das Signal in den Verzweigungen des Axons die *Synapsen*; diese Endstrukturen des Neurons übertragen die Erregung auf andere Zellen. Neben „exzitatorischen“ Neuronen, deren Synapsen die nachgeschalteten Zellen erregen, gibt es auch „inhibitorische“, hemmende Nervenzellen. Je intensiver Dendriten und Zellkörper eines Neurons elektrisch erregt werden, desto häufiger erzeugt der Nerv Aktionspotentiale. Die von den Neuronen übertragene „Information“ steckt nur in Ausnahmefällen im einzelnen Aktionspotential. Wichtiger ist die Frequenz, mit der diese Signale aufeinander folgen. Für eine *Pyramidenzelle* sind 100 Aktionspotentiale pro Sekunde bereits eine starke Erregung.

## Nervenzellfärbemethoden

Ungefärbtes Nervengewebe sieht unter dem Lichtmikroskop weißlich durchscheinend aus. Wer Strukturen erkennen will, muß das Gewebe mit speziellen Methoden färben. Die Fortschritte der mikroskopischen Neuroanatomie der letzten hundert Jahre beruhen im wesentlichen auf zwei Verfahren: Die „Golgi-Methode“ (linkes Foto) färbt einzelne *Neuronen* eines Gewebes bis in die letzten Verästelungen und läßt die restlichen unge-



**Prinzipieller Aufbau einer Nervenzelle: Dendriten empfangen Signale, der Zellkörper verarbeitet sie, das Axon leitet sie weiter**



färbt und durchsichtig. Sie erlaubt, die Formen der Zellen zu studieren. Die „Nissl-Methode“ färbt Strukturen im Zellkörper blau, so daß jede Zelle als kleiner blauer Fleck erscheint (rechtes Foto). Sie erlaubt, Zellen zu zählen und ihre Verteilung zu erforschen. Moderne Methoden lassen Neuronen „leuchten“: gelbgrün mit „Lucifer Yellow“ („Teufelsgelb“; siehe Fotos Seiten 10/11), feuerrot mit „Meerrettich-Peroxidase“ (siehe Foto Seite 36).

## Neuron

(= Nervenzelle)

## Neurotransmitter

Chemische Stoffe, die von *Synapsen* ausgeschüttet werden, um Erregung von einem *Neuron* auf eine nachgeschaltete Nerven-, Muskel- oder Drüsenzelle zu übertragen. Bis jetzt sind über 100 solcher Überträgerstoffe identifiziert – und fast wöchentlich werden es mehr. Die Entdeckung und Erforschung des Zusammenwirkens der Neurotransmitter ist in den letzten Jahren zu einem „heißen“ Gebiet der Hirnforschung geworden.

## Peripheres Nervensystem

Der Teil des Nervensystems, der außerhalb von *Gehirn* und *Rückenmark* liegt.

## PET

Positronen-Emissions-Tomographie, neues *bildgebendes Verfahren* (siehe Grafik Seite 162).

## Pyramidenzelle

Nervenzelltyp in der *Großhirnrinde*; (siehe Bild Seite 161 u. und Grafik Seite 23).

## Riechkolben

Über der Nase liegende paarige Ausstülpung des *Großhirns*; die erste Verarbeitungsstation im *Gehirn* für Gerüche.

## Rückenmark

Der im Wirbelkanal liegende Teil des *Zentralnervensystems*; enthält sowohl *Graue Substanz* als auch Leitungsbahnen vom und zum *Gehirn*.

## Stammhirn

Stammesgeschichtlich älter Teil des *Gehirns*.

## Sternzelle

Nervenzelltyp der *Großhirnrinde* (siehe Bild Seite 161 u.).

## Synapse

Kontaktstelle, an der Erregung von einem Neuron auf eine nachgeschaltete Nerven-, Muskel- oder Drüsenzelle übertragen wird (siehe Grafik Seite 23 und Kasten Seite 56).

## Tektum

Teil des *Gehirns*

## Thalamus

Eine der mächtigsten Ansammlungen von *Kernen* im *Zentralnervensystem*; „filtert“ und „übersetzt“ im Zwischenhirn alle einlaufenden Sinneserregungen mit Ausnahme des Geruchs für die Verarbeitung in der *Großhirnrinde*. Der Thalamus gilt als das „Tor des Bewußtseins“.

## Vegetatives Nervensystem

Auch „autonomes Nervensystem“ genannt. Das ist jener Teil des Nervensystems, der Atmung, Kreislauf, Verdauung, Drüsentätigkeit, Pupillenreflexe und ähnliche „vegetative“ Funktionen reguliert.

## Weißer Substanz

Enthält vor allem *Axone* (siehe *Graue Substanz*).

## Zentralnervensystem

*Gehirn* und *Rückenmark*. Der Teil des Nervensystems, der außerhalb von *Gehirn* und *Rückenmark* liegt, wird als *Peripheres Nervensystem* bezeichnet.

## Zirbeldrüse (= Pinealorgan)

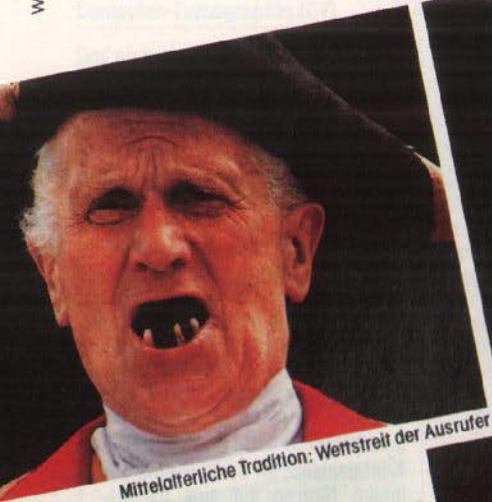
Kleine Ausstülpung am Hinterende des Zwischenhirns. Der Philosoph René Descartes (1596-1650) vermutete in ihr das Bindeglied zwischen Leib und Seele. Ihre Funktion beim Menschen liegt nach wie vor im dunkeln.

## Zwischenhirn

Teil des *Gehirns*

**Nervenzellfärbemethoden: Golgi- (links) und Nissl-Färbung**





Mittelalterliche Tradition: Wettstreit der Ausrufer



Erst Jetzt entdeckt: Mek-Papua auf Neuguinea



Zum Juwel veredelt: sechsjährige Milliarden-Tochter



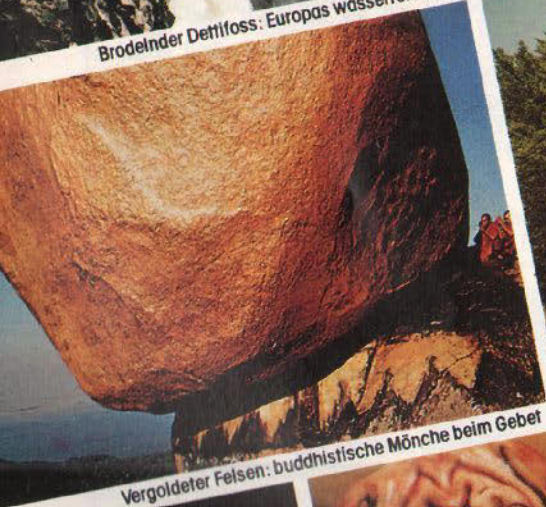
Brodelnder Dettifoss: Europas wasserreichster Fall



Der weiße Tod: 600.000 Tonnen Schnee jagen zu Tal



Feuerloch Mauna Ulu: Lavabrei fließt aus dem Krater



Vergoldeter Felsen: buddhistische Mönche beim Gebet



Stammbaum der Geschichte: 900jährige Bavaria-Buche



Gegen die Kälte zusammengeballt: Marienkäfer im Winter



Spanische Gestüte: wo Pferde noch als Pferde leben dürfen



Chinesische Shar-Peis: Sorgenfalten angezüchtet



See-Elefanten: Das Comeback der Kolosse

Welches Bild berührt Sie mehr als alle anderen? Lesen Sie auf Seite 121 was GEO-Leser als ihr Bild gewählt haben...



# Lernen Sie jetzt kennen, was hinter diesen Fotos steckt!

GEO - Das große Reportage-Magazin: Bilder, Texte, Eindrücke, die Sie nie mehr vergessen werden.  
Während GEO-Specials - als Sonderreihe von GEO - immer einem bestimmten Thema gewidmet sind, bietet Ihnen sieben große Reportagen, jede 20, 30 Seiten lang, in einer einzigen GEO-Ausgabe. Und: GEO erscheint jeden Monat neu. Mit der gleichen inhaltlichen und optischen Qualität, wie Sie sie in diesen GEO-Specials sehen, zeigen Ihnen in GEO die besten Fotografen, Reporter und Textautoren von internationalem Rang die Vielfalt unserer Erde. Wir geben Ihnen gern Gelegenheit, sich selbst ein Bild von dem journalistischen Leitsatz zu machen. »Besser als eine GEO-Reportage soll nur noch die Anwesenheit auf dem Stück Erde sein, von dem GEO berichtet.« Nutzen Sie unser Angebot!



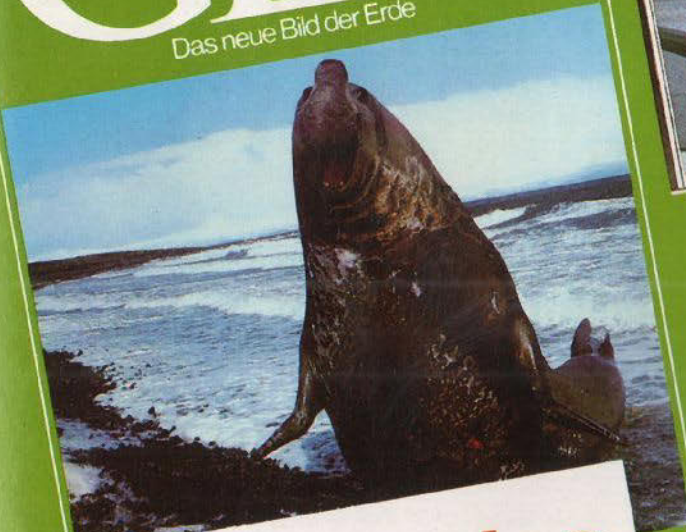
GEO berichtet über Wissenschaft und Technik, über Menschen und Kulturen, über Umwelt und Tiere.

## Angebot mit 3 Vorteilen für Sie

- Gratis zur Begrüßung eine aktuelle GEO-Ausgabe.
  - Gratis 4 außergewöhnliche GEO-Farbdrucke.
  - 20% Preis-Vorteil (= DM 2,- pro Heft gespart gegenüber Einzelpreis) durch eine persönliche Abonnement-Reservierung.
- Abruf-Karte auf Seite 121

# GEO

Das neue Bild der Erde



**Kostenlos**  
eine aktuelle Ausgabe  
als Probeheft

Bioare  
es bun  
Ferdin  
Proto

treibt  
pinen:  
zung:  
Land



# Enzyklopädie der

Naturwissenschaft ist eine formal strenge Methode, Neues über die Welt zu erfahren. Auch für Naturwissenschaftler ist Unbekanntes reizvoller als Bekanntes. GEO-Wissen fragte vier renommierte deutsche Hirnforscher:

**1** Welche offene Frage aus Ihrem Spezialgebiet würden Sie in den nächsten zehn Jahren am liebsten beantworten?

**2** Welche Grenzen der Erkenntnis und welche ethischen Grenzen sehen Sie für die Hirnforschung?

**3** Wie schätzen Sie die bundesdeutsche Hirnforschung im internationalen Vergleich ein?



**Prof. Dr. Alfred Gierer** ist Biophysiker und Direktor am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Er ist Autor des Buches »Die Physik, das Leben und die Seele« (1985).

**1** Eines der wichtigsten Probleme der Biologie ist die Entstehung der räumlichen Ordnung des Organismus bei seiner Entwicklung aus der Eizelle; besonders interessant ist dabei die Entwicklung des Gehirns. Die wesentlichen Züge seiner räumlichen Organisation werden durch die Gene bestimmt. Nun haben Menschen und höhere Tiere viel mehr Nervenzellen – und noch viel mehr Nervenverbindungen – als Gene, und zwar schon bei der Geburt. Also muß es allgemeine Prinzipien geben, nach denen eine begrenzte Zahl von biochemischen Prozessen die Ordnung einer so großen Zahl von Nervenfasern festlegen kann, wie sie zum Beispiel bei der zielsicheren Verknüpfung – der „Projektion“ – der Netzhaut des Auges mit einem bestimmten Teilgebiet des Gehirns entsteht. Wir möchten dazu beitragen, entsprechende Regeln für die Verschaltung im Nervensystem zu finden.

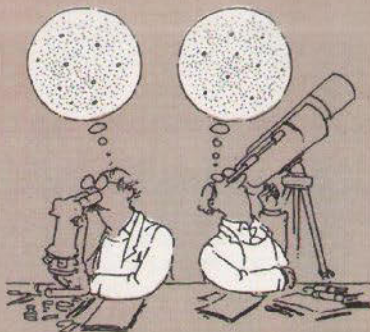
**2** Wir müssen nicht alles wissen. Forschungen, die gegen die Menschenwürde verstoßen, oder die sehr belastend für Tiere sind, wären durch Erkenntnisgewinn nicht zu rechtfertigen.

Philosophische Grenzen der Erkenntnis gibt es im Bereich der Hirnforschung in erster Linie bei den Fragen nach dem „Bewußtsein“ oder der „Seele“. Gute Gründe sprechen dafür, daß jede formal genau angebbare Leistung der Informationsverarbeitung auf physikalisch-chemische Prozesse im neuronalen Netzwerk zurückführbar ist. Aber es bleibt fraglich, ob alle Eigenschaften des Gehirns einer vollständigen formalen Beschreibung zugänglich sind.

Insbesondere das Wort „seelisch“ macht, vom wissenschaftlichen Standpunkt aus, begrifflich große Schwierigkeiten – eine befriedigend objektive Definition gibt es nicht. Deswegen fehlte es nie an Versuchen, die Leib-Seele-Beziehung als Scheinproblem abzutun. Damit würden wir aber die tiefste Grenzfrage der Wissenschaften nur verdrängen; begriffliche Akrobatik allein kann den Knoten zwar verschieben, aber nicht auflösen.



# Ignoranz



FRAGEN

Seelisches Erleben ist uns unmittelbar gegeben, ohne Kenntnis der zugleich ablaufenden physikalischen Gehirnprozesse. Sicher besteht eine enge Beziehung zwischen beidem; dennoch ist zu vermuten, daß eine vollständige Theorie des Leib-Seele-Zusammenhanges grundsätzlich nicht möglich ist. Aus der Gültigkeit der Physik im Gehirn folgt nämlich nicht, daß man den entsprechenden Zustand des Bewußtseins mit den Methoden der Physik ganz erschließen kann. Es gibt im Gegenteil gute Gründe dafür, daß eine vollständige „Dekodierung“ des Gehirnzustandes in bezug auf das Bewußtsein nicht möglich ist, jedenfalls nicht mit endlichen Mitteln: Auch ein Computer, der so groß wäre wie die Welt, müßte dafür unter Umständen länger rechnen, als die Welt besteht. Die endlichen Dimensionen des Kosmos sind ebenso Grundfakten der Natur wie zum Beispiel die endliche Lichtgeschwindigkeit – sie begründen prinzipiell unüberwindliche Grenzen der Erkenntnis.

Grenzen der Dekodierbarkeit der Leib-Seele-Beziehung mit endlichen Mitteln bedeuten, daß das Bewußtsein in einer physikalischen Beschreibung des Gehirns nicht aufgeht. Zwar gilt die Physik im Gehirn ebenso wie in einer Maschine; aber eine Maschine, die wir verstehen, könnte nicht alles wie ein Mensch – und eine Maschine, die alles könnte wie ein Mensch, würden wir nicht vollständig verstehen. Grenzen der Erkenntnis ergeben sich in der Regel dann, wenn Wissenschaft auf ihre eigenen Voraussetzungen angewandt wird – zum Beispiel die Logik auf die Logik (Gödels Grenzen der Entscheidbarkeit) oder die Messung auf die Messung (Heisenbergs Quanten-Unbestimmtheit). Entsprechendes gilt vermutlich

für das Bewußtsein: Es kann sich selbst nicht voll erfassen, und zwar auch nicht über den scheinbar so klugen Umweg der Analyse seiner physikalischen Voraussetzungen im menschlichen Gehirn. Bewußtsein erscheint eher als Voraussetzung jeder Wissenschaft denn als Gegenstand einer perfekten wissenschaftlichen Erklärung.

**3** Die bundesdeutsche Hirnforschung ist gut auf Teilgebieten; sie ist bei weitem nicht so breit angelegt wie die amerikanische. Ihr Niveau ist aber jenem in den meisten Industriestaaten vergleichbar, vielleicht sogar besser:



**Prof. Dr. Ernst Pöppel**  
ist Leiter des  
Instituts für medizinische Psychologie der Universität München. Der Psychologe und Physiologe ist Autor der Bücher  
»Lust und Schmerz« (1982) und  
»Die Grenzen des Bewußtseins« (1985)

**1** Der Weg zu neuem Wissen ist in der Hirnforschung nicht vorgezeichnet; es gibt keinen Katalog des Nicht-Wissens, der nacheinander abgearbeitet werden kann. Häufig müssen erst einmal die Bereiche des Nicht-Wissens entdeckt werden. Solche Bereiche finden sich manchmal, wenn wir Selbstverständlichkeiten des Lebens oder Erlebens in Frage stellen.

Mich fasziniert das Problem der „Identität“. Es ist bekannt, daß Informationen aus den verschiedenen Sinnessystemen an unterschiedlichen Stellen des Gehirns verarbeitet werden. Wie ist es dennoch möglich, jemanden – oder einen Gegenstand – sofort zu kennen, wenn man ihn nur

sieht, nur hört, nur riecht oder gar tastet, wenn also nur ein sinnlicher Teilaspekt verfügbar ist? Irgendwie oder irgendwo muß die Information aus den einzelnen Sinnessystemen wieder zusammenlaufen. Die Identität eines Menschen oder Gegenstandes ist für uns eine solche Selbstverständlichkeit, daß wir hier normalerweise keine verborgenen Probleme vermuten. Dies merken wir erst, wenn Störungen auftreten, wenn zum Beispiel manchem Geisteskranken die Identität dessen, was er wahrnimmt, nicht erhalten bleibt; ein Stuhl kann dann im nächsten Augenblick etwas ganz anderes sein.

Dramatisch ist der Verlust der eigenen Identität, wenn einem Geisteskranken zu einem Zeitpunkt die eine, später aber eine andere Identität gleichsam aufgezwungen wird. Dies alles weist auf aktive Hirnmechanismen hin, die dafür sorgen, sich selbst – oder etwas Wahrgenommenes – über die Zeit hinweg als „mit sich identisch“ im Bewußtsein zu halten. Aber wie diese Selbstverständlichkeit unseres Erlebens möglich gemacht wird, ist rätselhaft.

**2** Da das menschliche Gehirn Ergebnis einer Evolutionsgeschichte ist, müssen auch psychische Leistungen wie etwa das Denken durch Anpassungsprozesse an sich wandelnde Umwelten entstanden sein. Unsere Vorfahren mußten sich nicht irgendwelchen beliebigen, sondern ganz bestimmten selektiven Randbedingungen anpassen. Somit sind die Hirnleistungen auch nicht beliebig „mächtig“, son-



dern notwendigerweise selektiv, also eingeschränkt. Daraus folgt beispielsweise, daß Menschen vermutlich nicht intelligent genug sind, ihre eigenen Hirnleistungen letztendlich aufzuklären. Die evolutionäre Geschichte unseres Gehirns hat für uns heute eine praktische Konsequenz: Denkleistungen sind aufgrund der Maschinerie des Gehirns in emotionale Bewertungen eingebettet, wir können gar nicht emotionsfrei denken. Dies sollte man auch bei der Bewertung von sogenannten Expertenaussagen berücksichtigen.

Da wir mit unserem Erkenntnisapparat nicht alles erkennen können, unser Bewußtsein also Grenzen hat, ergibt sich von selbst die ethische Forderung nach wissenschaftlicher Bescheidenheit. Hirnforscher können von sich selbst nicht behaupten, einen besseren Zugang zur Weisheit als andere – etwa Künstler – zu haben, aber sie sind auch nicht benachteiligt.

**3** Die Hirnforschung in der Bundesrepublik ist sicher nicht schlechter als in anderen Ländern. Aber es gibt das Problem des Selbstbewußtseins. Oft schätzen wir wissenschaftliche Leistungen aus England oder den USA automatisch höher ein als unsere eigenen. Wir sollten nicht vergessen, daß auch wir den Maßstab für Qualität definieren. Und wir sollten uns abgewöhnen, nur Fragestellungen interessant zu finden, die im anglo-amerikanischen Bereich bereits etabliert sind.

Zu den positiven Aspekten der bundesdeutschen Forschung zählt – im Gegensatz zu vielen anderen Ländern – die Möglichkeit, langfristig an wichtigen Fragen zu arbeiten, ohne sich jeweils am Modischen (oft mit Forschungsgeldern verbunden) orientieren zu müssen. Das ist gerade

für die Hirnforschung besonders günstig: So ist erstens die Bereitstellung einer Logistik in den Universitäten international gesehen nicht selbstverständlich. Und zweitens ermöglicht die Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft nationale Programme (Forschungsschwerpunkte), lokale Großprojekte (Sonderforschungsbereiche) oder an Institute gebundene Vorhaben, die nicht Jahr für Jahr finanziell auf der Kippe stehen. Eine längere Zeitperspektive zeichnet natürlich besonders die Arbeit der Wissenschaftler an den Max-Planck-Instituten aus. Manchmal könnten jedoch die günstigen Möglichkeiten noch besser genutzt werden.



**Prof. Dr. Wolf Singer**  
ist Neuropsychologe  
und Direktor am  
Max-Planck-Institut für  
Hirnforschung in Frankfurt  
am Main

**1** Die Hirnforschung hat während der letzten Jahrzehnte großartige Einblicke eröffnet in die strukturelle und funktionelle Organisation von Nervensystemen – es gibt kaum noch weiße Flecken auf den Hirnatlanten. Völlig unklar ist jedoch, wie die von den Sinnesorganen einlaufenden Erregungsmuster mit der Erinnerung an frühere Sinneseindrücke verglichen und dann als bereits bekannt klassifiziert oder als neue Erfahrungsinhalte im Gedächtnis gespeichert werden. Wir wissen lediglich, daß diese Prozesse nach vollkommen anderen Regeln ablaufen als in herkömmlichen Computern. Im Gehirn erfolgt die Analyse von Beziehungen zwischen einlaufenden Erregungsmustern gleichzeitig in vielen miteinander wechselwirkenden Zentren, wobei Verarbeitungs- und Speicherbereiche untrennbar miteinander verwoben sind. Offensichtlich bedarf es zur Koordination

all dieser Funktionen keiner übergeordneten Programmstruktur. Das Programm ist vielmehr in der Architektur der Nervenetze selbst realisiert und verändert sich entsprechend mit jedem Lernschritt.

Ich halte es für ein besonders erstrebenswertes Ziel, einige der Prinzipien aufzudecken, nach denen sich solche parallel strukturierten Nervenetze während der Entwicklung der Gehirne organisieren und wie in ihnen Wahrnehmungsinhalte kodiert und gespeichert werden. Erst wenn wir diese für Gehirne typischen Prozesse besser kennen, wird es uns möglich sein, gute und prüfbare Hypothesen, zum Beispiel über die Ursachen von psychischen Störungen, zu formulieren.

**2** Der naturwissenschaftlich reduktionistische Ansatz zur Erklärung von Hirnfunktionen stößt bei all jenen Hirnleistungen an eine natürliche Grenze, die erst durch das Wechselspiel mehrerer Hirne entstehen. Menschliche Gehirne können ihre jeweiligen Leistungen gegenseitig reflektieren, symbolisch in Form von Sprache repräsentieren und damit eine neue, tradierbare Wirklichkeit entstehen lassen. Konzepte wie Bewußtsein und Seele sowie ästhetische und ethische Kategorien verdanken zwar ihre Emergenz (ihre „Hervorbringung“) der Existenz menschlicher Gehirne; sie sind auch in einzelnen Gehirnen repräsentiert. Aber sie entziehen sich der neurobiologischen Analyse, weil sie vor allem die Folge des kulturgeschichtlichen Wechselspiels sehr vieler Gehirne – also sehr vieler Menschen – sind.



Die ethischen Normen und Grenzen in der Hirnforschung unterscheiden sich, so denke ich, nicht von denen in anderen Wissenschaftsbereichen. Die Achtung vor tierischem und menschlichem Leben zwingt zu Kompromissen, wenn es darum geht, die Mechanismen von Krankheiten aufzuklären. Ich sehe nicht, wie die Würde des Menschen verletzt werden könnte, wenn wir zu verstehen versuchen, nach welchen Gesetzen unser Gehirn funktioniert – das Organ, durch dessen Leistungen der Mensch sich am meisten von allen anderen Lebewesen unterscheidet. Erkenntnis verleiht Macht und erweitert Handlungsspielräume. Sie darf deshalb nur zunehmen, wenn auch das Bewußtsein um die Verpflichtung zu mehr Verantwortung mitwächst. Daß die Ergebnisse der Hirnforschung mehr zur Manipulation von Menschen mißbraucht werden können als die anderer Disziplinen, halte ich für wenig wahrscheinlich. Pädagogische, demagogische und pharmakologische Methoden zur Beeinflussung von Hirnfunktionen – und damit von menschlichen Verhaltensweisen – hatte die Menschheit schon lange erfunden, bevor es der Hirnforschung gelungen war, die Mechanismen für diese Beeinflussbarkeit aufzudecken.

**3** Nach den entsetzlichen Verlusten der Nazi-Zeit nimmt die deutsche Hirnforschung heute im internationalen Vergleich wieder den Rang ein, der etwa der Bevölkerungszahl und der Prosperität der Bundesrepublik entspricht. Unsere größten Stärken liegen in der hohen Motivation begabter Nachwuchswissenschaftler und in unserem relativen Reichtum. Unsere größten Schwächen liegen in der restriktiven und unflexiblen Personalpolitik unserer Wissenschaftsförderungsinstitutionen: Es gibt derzeit kaum Entwicklungsmöglichkeiten für den hochbegabten jungen wissenschaftlichen Nachwuchs. Wir müssen fürchten, daß viele junge Wissenschaftler ihre einzige Chance im Auswandern sehen werden.



**Prof. Dr. med. Joachim R. Wolff**  
ist Leiter der  
Abteilung Klinische  
Anatomie und  
Entwicklungsneurobiologie  
des Fachbereichs Medizin  
der Universität  
Göttingen

**1** Das menschliche Gehirn enthält rund hundert Milliarden Nervenzellen, von denen jede 100 bis 10 000 funktionelle Kontakte (Synapsen) zu anderen Nervenzellen unterhält. Nach heutigem Verständnis bilden diese Kontakte die Grundlage für Informationsflüsse von den Sinnesorganen zum Gehirn, innerhalb des Gehirns und von dort zu den Wirkungsorganen (Drüsen und Muskeln), die das Verhalten des Organismus und Organfunktionen regulieren. Eines der zentralen Probleme der Hirnforschung ist die Frage, wie sich dieses komplizierte Netzwerk durch Lernen verändert.

Lernen scheint in einer lange andauernden oder gar dauerhaften Veränderung dieser Konditionierungskontakte zu bestehen. Bestimmte Verbindungen zwischen Nervenzellen sind also selbst im erwachsenen Gehirn veränderbar. Bei der Entwicklung, Erhaltung und funktionellen Anpassung (Lernen) des Nervensystems stellen sich deshalb zwei Kernfragen, auf die wir Antwort suchen:

Erstens: Nach welchen lokalen Regeln – keine Nervenzelle „kennt“ mehr als ihre direkten Kommunikationspartner! – werden funktionelle Kontakte zwischen den Nervenzellen aufgenommen, verstärkt, erhalten, abgeschwächt oder abgebaut?

Zweitens: Jede Nervenzelle steht in einem spezifischen funktionellen Gesamtzusammenhang – sie kann zum Beispiel Glied in einem Netzwerk sein, das visuelle Reize verarbeitet oder den Atemrhythmus reguliert. Aber wie nimmt dieser Gesamtzusammenhang Einfluß auf die direkten Kontaktbeziehungen zwischen den Nervenzellen oder deren Veränderungen?

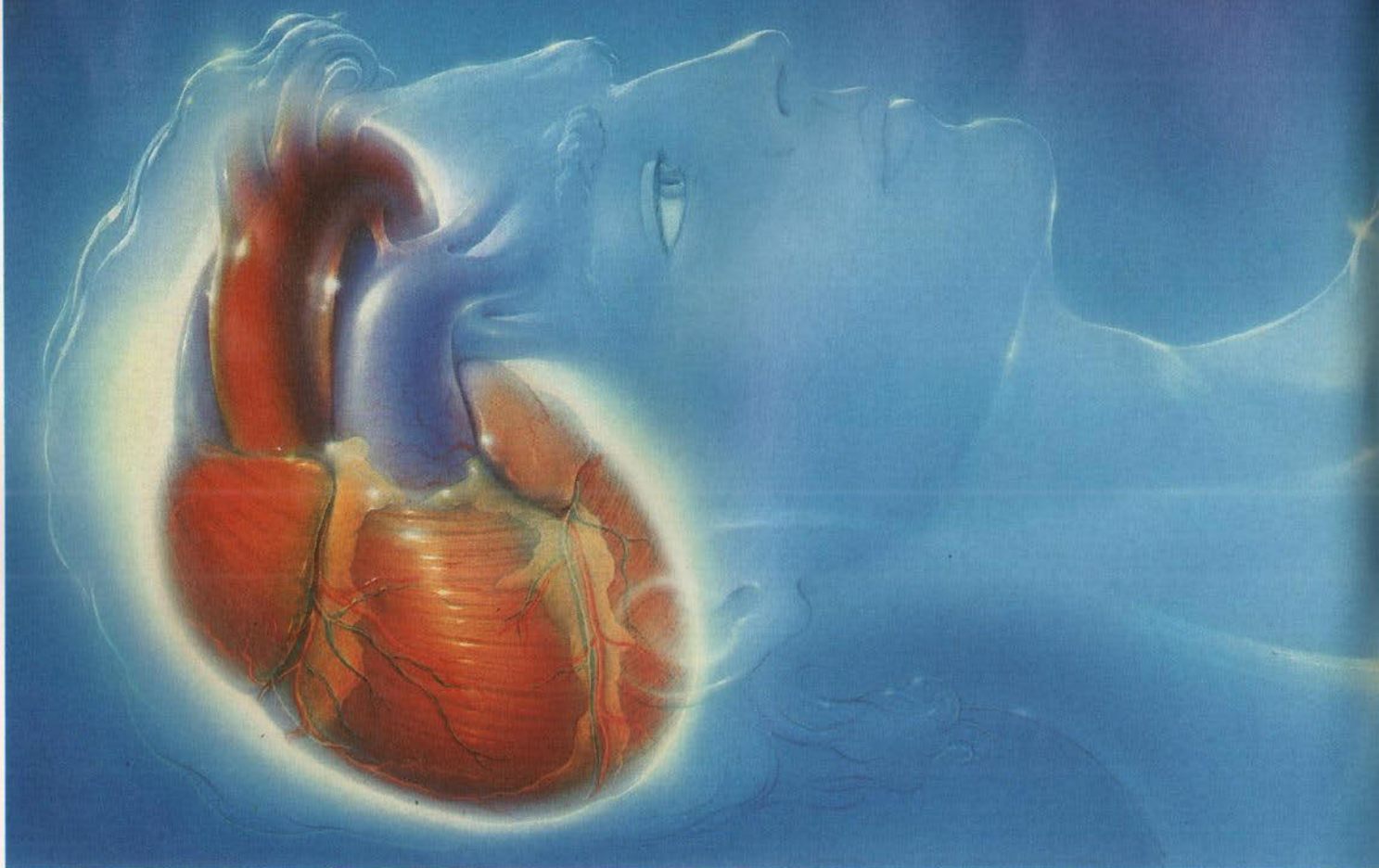
**2** Im letzten Jahrzehnt ist deutlich geworden, daß nicht nur Drogen wie Alkohol, sondern auch eine Reihe von Hormonen und Arzneimitteln in die Bildung und Erhaltung von Nervenzellkontakten eingreifen. Dies macht die Erforschung der beteiligten Mechanismen um so dringender. Auf der anderen Seite sind die Grenzen der neurobiologischen Forschung sichtbar. So wie individual- und sozialpsychologische Analysen immer nur Teilaspekte eines aktuellen oder historischen Prozesses erfassen können, so sind der analytischen Erforschung komplexer Hirnfunktionsabläufe – also etwa psychischer Zustände – mit den heute verfügbaren Techniken immer noch enge Grenzen gesetzt.

**3** Um so mehr erscheint es notwendig, durch die spezielle Förderung der Ausbildung von jungen Wissenschaftlern und von Forschungsschwerpunkten in Deutschland die Entwicklung andersartiger wissenschaftlicher Methoden voranzutreiben. Dazu müssen auch die Anwendungsmöglichkeiten neuartiger Methoden ausgelotet werden – zum Beispiel spannungsabhängige Farbstoffe und die PET-Technik. Insbesondere bei den Medizinern kommt es nun darauf an, die bürokratische Reglementierung der Ausbildungsabläufe für wissenschaftlich motivierte Studenten flexibler zu gestalten. Notwendig ist zudem ein intensiverer Austausch von jungen Wissenschaftlern nicht nur mit dem Ausland, sondern auch zwischen deutschen Laboratorien.



**Das Denkorgan  
entdeckt sich selbst – in  
zweieinhalb Jahrtausenden  
Gehirnforschung**

# **Vom denkenden Herzen**





# zum fühlenden Hirn

Nichts ist selbstverständlich an unserem Wissen über das Gehirn – auch nicht die Erkenntnis, daß wir mit dem Hirn und nicht mit dem Herzen denken und fühlen: Sie mußte in der Antike mühsam erarbeitet werden. Noch im Mittelalter wurde die uralte Vorstellung – wie in dem Stich von Albrecht Dürer – weitergegeben, daß die Seele in drei hintereinander liegenden Hirnkammern säße. Und erst Anfang dieses Jahrhunderts waren die Anatomie des Gehirns, die Bedeutung der Hirnrinde und die Funktion der Nervenzellen immerhin in Umrissen bekannt





**G**ehirn: In der Bibel kommt das Wort nicht vor. Propheten wie gemeines Volk dachten und fühlten mit den Nieren, den Därmen und, selbstredend, mit dem Herzen. Die alten Griechen nannten den rötlich-weißen Pudding, der von den Helden homerischer Gesänge im Kampfgetümmel verspritzt wurde, ziemlich ratlos „Enkephalos“ – „das, was im Kopfe ist“. Odysseus nutzte nicht etwa sein Enkephalos, nein, er tüftelte seine Listen im Herzen und Zwerchfell aus.

Offenbar liegt uns Menschen die Empfindung näher, unsere Träume und Ideen, unser Ärger und unsere Lebenslust entstünden in den geschäftig und gefühlig rumpelnden Eingeweiden. Erst durch Beobachten und diszipliniertes Nachdenken, also durch Wissenschaft, entdeckte das menschliche Gehirn, daß aus ihm selbst kommt, was den Menschen zum Menschen macht: Die unauffällige Schädelfüllung ist in

Wirklichkeit der Ort des Fühlens und Denkens.

Einem Griechen namens Alkmäon, einem Zeitgenossen des Pythagoras, dämmerte im sechsten Jahrhundert vor Christus die erste – und wichtigste – Erkenntnis der Hirnforschung: daß unsere Gefühle nicht dort entstehen, wo wir sie spüren. Ein Jahrhundert darauf verkündete Hippokrates, ein anderer großer Arzt: „Nicht mit dem Herzen, sondern mit dem Gehirn denken wir.“ Mehr Anhänger fand freilich etwas später Aristoteles, der unbeirrt lehrte, das Herz sei es, das fühle und denke, das Gehirn aber diene lediglich zur Kühlung des heißen Herzens.

Diese Vorstellung hätte eigentlich Aristoteles kaum überleben dürfen. Denn schon kurz nach seinem Tod, um 300 vor Christus, kamen Ärzte und Gelehrte an der Akademie der hellenistischen Metropole Alexandrien zu ersten wirklich fundierten Erkenntnissen über das Gehirn.

Diese antiken Wissenschaftler brachen gleich mehrere Tabus: Herophilus und Erasistratos, die medizinischen Stars der alexandrinischen Akademie, begingen das Sakrileg, Leichen

zu sezieren. Es wurde sogar gekunkelt, sie experimentierten an zum Tode verurteilten Menschen. Wie sonst hätten sie zum Beispiel herausfinden können, daß ein Mensch nicht mehr sehen kann, wenn seine Nervenbahnen zwischen Augen und Hirn durchtrennt sind?

Herophilus und Erasistratos entwickelten als erste die Vorstellung eines zusammenhängenden „Nervensystems“ mit dem Gehirn als Zentrum des Denkens und als Sitz der Seele. Ihre Vorstellung, wie das Leben und der Geist funktionieren, formulierten sie in ihrer „Pneuma-Theorie“: Die eingeatmete Luft werde im Herzen gereinigt und verwandle sich dadurch ins „animalische Pneuma“, eine „feinstoffliche Luft“, die das Leben in Gang halte. Ein Teil dieses Pneuma gelange durch die – hohl gedachte – aufsteigende Aorta vom Herzen ins Gehirn. Dort werde es abermals veredelt zum „psychischen Pneuma“, dem Stoff des Geistes. Dieser ströme in den Hohlräumen des Gehirns und in den röhrenartig gedachten Nerven.

Die alexandrinischen Gelehrten unterschieden auch schon „sensorische“ und „mo-

## Antike: Experimente brachen das Tabu



Erst Claudius Galenus etablierte im zweiten Jahrhundert nach Christus endgültig die Lehre vom Gehirn als Sitz des Denkens und Fühlens. Der berühmteste Arzt des römischen Altertums sezerte Tierleichen, um auch den anatomischen Bau des Menschen kennenzulernen



Im Mittelalter stand – trotz riskanter Kopfoperationen – die experimentelle Medizin still



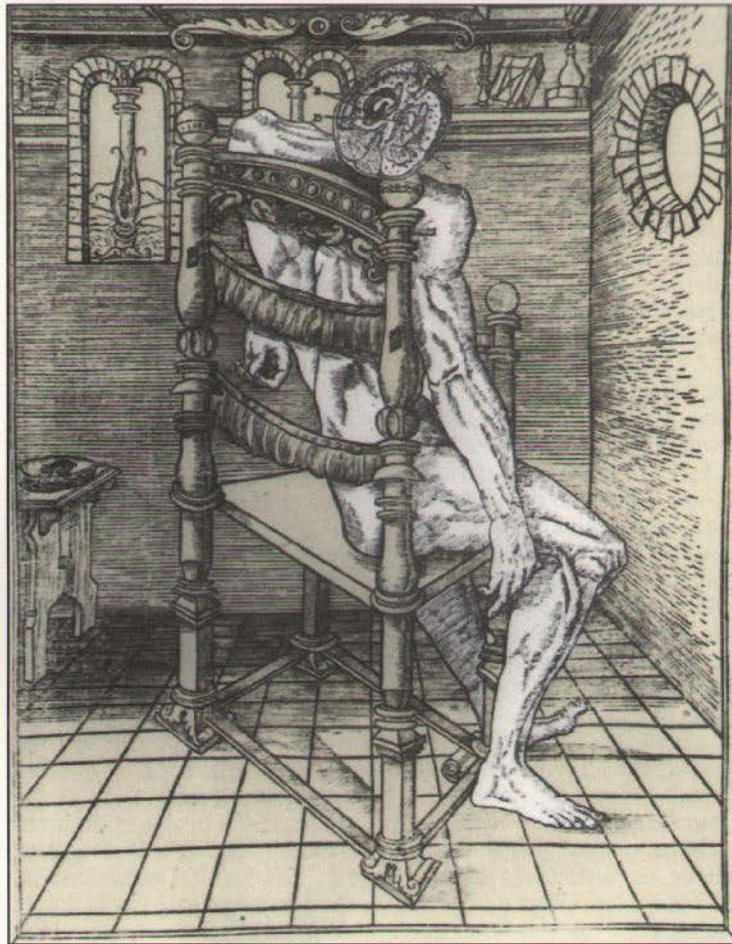


torische“ Nerven: Die sensorischen Nerven sollten Sinnesindrücke zum Gehirn leiten, die motorischen den Willen der Seele den Muskeln mitteilen. Erasistratos stellte sich die Seele – was immer er mit diesem Begriff meinte – als im Kleinhirn und in den Hirnhäuten sitzend vor. Herophilos wich in diesem Punkt von seinem Partner ab: Er sah den Sitz der Seele in jenen Hohlräumen – den „Ventrikeln“ – des Gehirns, die er entdeckt hat. Schläuchen ähnlich sollten von diesen Ventrikeln die wichtigsten Nerven abzweigen.

Doch Jahrhunderte lang überschattete die Vorstellung des Aristoteles vom denkenden Herzen die Pneuma-Theorie. Erst der griechisch-römische Arzt Claudius Galenus nahm im zweiten Jahrhundert nach Christus die alexandrinische Vorstellung wieder auf, erweiterte sie und verhalf ihr endlich zum Durchbruch. Galen, der sich nach Hippokrates für den größten Arzt aller Zeiten hielt, stützte sich auf Erfahrungen mit verletzten Gladiatoren und seziierten Tieren. Er wußte, daß eine Hirnhälfte die andere teilweise ersetzen kann. Und er vermochte aus Lähmungen und der Empfindungslosigkeit einzelner Körperteile den Sitz von Verletzungen im Rückenmark zu rekonstruieren.

Nach Galen gab es in der Tat mehr als tausend Jahre lang praktisch keine experimentelle Medizin. Die Heilkundigen des Mittelalters kupferten die Lehren des „unfehlbaren“ Arztes Galen ab – oder was sie dafür hielten. So verkam etwa die auf Herophilos zurückgehende Vorstellung von der Seele, die in den Hohlräumen des Hirnes haust, im Laufe der Zeit zu kindlichen Schemazeichnungen: drei hintereinander liegende Bläschen im Kopf als Sitz der Seele.

Selbst Leonardo da Vinci zeichnete noch um 1490 die drei Bläschen in seine ersten anatomischen Skizzen ein. Doch spritzte er Wachs in die Ventrikel eines Rindergehirns und erhielt auf diese Weise einen



Der Zeichenstil des Anatomen Andreas Vesalius bestimmte die Richtung für die neue, präzise Darstellung des seziierten Körpers: der Mensch in vertrauter Umgebung, die anatomischen Details darbietend – wie in dieser Zeichnung aus dem Jahr 1546



## Renaissance: Der Körper wurde Studienobjekt

anatomisch exakten Abguß, der nur einen Schluß zuließ: Das alte Schema war falsch.

Erneut das Sezier-Tabu brechend, ersetzten die Pioniere der Anatomie in der Renaissance die primitiven Organ-schema-Bildchen des Hochmittelalters durch meisterliche Zeichnungen sezierter Leichen. Nichts signalisiert den Anbruch einer neuen Zeit besser als das Jahr 1543: Kopernikus veröffentlicht sein revolutionäres Hauptwerk „Über die Umläufe der Himmelskörper“, Vesalius publiziert sein epochales Anatomie-Lehrbuch „De humani corporis fabrica“ („Über den Bau des menschlichen Körpers“).

Andreas Vesalius, geboren in Brüssel, Professor in Padua, Leibarzt Karls V., bestimmte den Stil, in dem der seziierte

menschliche Körper dargestellt wurde. Bei ihm stehen Skelette anmutig auf Stand- und Spielbein, neigen Leichen ihr Haupt, um dem Betrachter das kunstvoll aufpräparierte Gehirn zu zeigen. „Hier“, so suggerieren die Meisterwerke des Vesalius und seiner Kollegen, „wird der Mensch gezeigt, wie er funktioniert.“

Wie aber funktioniert der Mensch? Etwa wie eine Maschine? Ein Jahrhundert später wagte der französische Philosoph René Descartes, ketzerische Gedanken aufzuschreiben. Doch aus Furcht vor der Kirche hielt er die Schrift „Über den Menschen“ zurück. Sie erschien erst zwölf Jahre nach seinem Tod.

Descartes' Werk, 1662 publiziert, enthält in der Tat revolutionäre Gedanken: Es definiert



Albrecht von Haller bewies im 18. Jahrhundert: Ohne Nerven können wir nichts empfinden





Der Arzt und Hirnforscher Franz Joseph Gall glaubte zu Beginn des 19. Jahrhunderts, den Charakter eines Menschen an den Ausbeulungen des Schädels ablesen zu können

Leib und Seele als getrennte Komponenten des Menschen. Der menschliche Körper ist – wie der tierische – eine komplexe, bis ins Detail verständliche Maschine und somit naturwissenschaftlicher und medizinischer Neugierde zugänglich. Im Unterschied zu den Tieren, die quasi vollautomatisch funktionieren, ist, so argumentiert Descartes, der Mensch jedoch beseelt.

Durch die Nervenröhren und Hirnhöhlräume von Tieren wie Menschen sah der Philosoph den „Lebensgeist“, den „Spiritus animalis“, strömen. Dieser werde in der Zirbeldrüse, einem kleinen Organ an der Basis eines Hirnventrikels, „automatisch“ in die richtigen Nervenröhren gelenkt. So lenke der Anblick einer Maus automatisch den nötigen „Spiritus animalis“ in die Sprungmuskeln der Katze.

Auch der menschliche Körper sei zunächst ein solcher Automat: Wer stolpert und fällt, strecke zum Beispiel die Hände schützend vor, „ohne daß der Geist es verhindern könnte“. Doch habe Gott dem Menschen eine unsterbliche Seele gegeben, die in der Zirbeldrüse sitze. Diese Sorge dafür, daß wir – wenn auch mit etwas Mühe – gegen unsere tierische Maschinennatur handeln können: der Mensch als Halbautomat, bedient von der Seele.

So sehr sich die Anatomen auch abmühten, die Details des Körpers herauszupräparieren – es gelang ihnen kein letztlich überzeugendes Bild der Nerventätigkeit. Daran änderte sich auch nichts, als der Holländer Antoni van Leeuwenhoek 1677 sein von ihm konstruiertes Mikroskop erstmals auf Nerven richtete. Er sah, daß die Nerven Bündel „unbeschreiblich feiner“ Röhrchen sind. Doch die Betrachtung der Form allein erklärt offensichtlich nicht, wie Mensch und Tier funktionieren.

Wer mehr erfahren wollte, mußte in lebende Tiere hineinschauen, Organe in Aktion beobachten, mußte gezielt verletzen und reizen. So lautete die

Antwort des Albrecht von Haller auf die Frage, was nun zu tun sei. Haller war, Mitte des 18. Jahrhunderts, Ordinarius für Physiologie, Anatomie und Chirurgie in Göttingen, nebenbei auch ein bedeutender Dichter. Mit seinen sorgfältig geplanten und durchgeführten Tierversuchen stellte er die Neurophysiologie, die Lehre von der Arbeitsweise des Nervensystems, auf ein stabiles wissenschaftliches Fundament.

Haller bewies an den freigelegten Organen lebender Versuchstiere, daß die Kreaturen keine Schmerzen empfinden, wenn die Nerven zwischen dem malträtierten Körperteil und dem Gehirn durchschnitten sind. Ist diese Verbindung gekappt, kann der Experimentator ein Organ schneiden, stechen und ätzen – das Tier gibt keinen Laut von sich.

Die Brutalität seiner Tierversuche begründete Haller mit deren „Nutzen für das Menschengeschlecht“ – ein Argument, das Forschern früherer Zeiten, denen Wissenschaft noch als eine Art intellektueller Gottesdienst galt, wohl kaum eingefallen wäre. Mit dem Hinweis auf die „Nützlichkeit“

konnte der Schmerz, den ein Forscher im Namen der Wissenschaft zufügen durfte, im Prinzip unendlich groß werden.

Kritik aus den Reihen seiner Kollegen bekam Haller freilich weniger der gepeinigten Versuchstiere wegen zu hören. Es war das analytische Experiment, das manche Zeitgenossen noch keineswegs als Methode der Naturbefragung anerkannten. Was die Natur auf solche Folter hin gestehe, so argumentierten die Kritiker, sei ganz willkürlich und verberge eher ihr wahres Wesen.

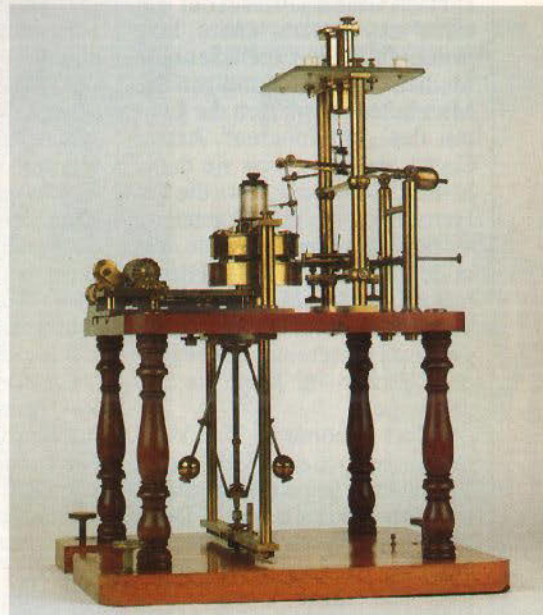
### Der Schädel verrät, was unter ihm passiert

Solche Kritik mußte Franz Joseph Gall nicht befürchten, obwohl er nicht Tieren, sondern dem Menschen sehr nahe rückte. Im Jahr 1812 zog er im Triumphzug durch Europas Hauptstädte und erzählte den Bürgern, wie sie den Charakter ihrer Nächsten ohne lange Gespräche erkennen könnten. Gall hatte herausgefunden, daß die zuvor wenig beachtete Hirnrinde ein Zentrum der Hirnaktivität ist und daß dieses

## Den Geist aus der Physik erklären



Hermann Helmholtz, einer der Pioniere der Neurophysiologie, fand mit seinem »Myographion« genannten Apparat im Jahre 1850 heraus, wie schnell Nerven ihre Signale leiten





Zentrum an verschiedenen Stellen verschieden dick ist.

In seiner Begeisterung, endlich den harten Stoff einer wissenschaftlichen Psychologie gefunden zu haben, lokalisierte er 26 verschiedene „Seelenvermögen“, darunter „Kindesliebe“, „Hoffnung“, „Ordnungssinn“ und „Wohlwollen“ nebeneinander auf der Hirnrinde. Die Botschaft: Wo die Hirnrinde auffällig dick und das entsprechende „Seelenvermögen“ folglich besonders ausgeprägt sei, wölbe sich der Schädel, so daß der Charakter des Menschen direkt an dessen Schädelform ablesbar sei.

Was in der Hirnrinde geschieht, deren Verletzung oder Reizung so eindeutige „seelische“ Reaktionen und Störungen provoziert, kann Gall nicht sagen. Er und seine Kollegen wissen nur, daß die graue Rinde anscheinend weniger Fasern enthält als die darunterliegende „weiße Substanz“ des Gehirns.

Auch Johannes Peter Müller, Professor in Berlin, glaubte an die besondere Bedeutung der Hirnrinde. Müller, 1801 geboren, der wohl größte Anatom und Physiologe seiner Zeit, bewies, daß Reflexe nur über Rückenmark und Gehirn vermittelt werden können. Er erforschte das vegetative Nervensystem. Er sammelte Argumente für und gegen die Elektrizität als Prinzip der Signalübertragung in Nerven, konnte jedoch diese Frage nicht entscheidend beantworten.

Seine Entdeckung, daß Sehnerven stets nur Lichtempfindungen vermitteln können, ob sie nun geschlagen, beleuchtet oder elektrisch gereizt werden, und Hörnerven immer nur Hörempfindungen, machte Müller berühmt: „Licht, Dunkel, Farbe, Ton, Wärme, Kälte, die verschiedenen Gerüche und der Geschmack, mit einem Worte, alles, was uns die fünf Sinne an allgemeinen Eindrücken bieten, sind nicht die Wahrheiten der äußeren Dinge, sondern die Qualitäten unserer Sinne.“

Mehr noch als Müller selbst dringen seine Schüler mit ihren

Präzisionsapparaten in die Feinstruktur des Gehirns und der Nerven vor. Nachdem in den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts entdeckt worden war, daß auch das Nervengewebe aus Zellen besteht, erkannte der Züricher Arzt und Müller-Schüler Rudolf Albert Koelliker im Jahr 1844, daß die Ner-

## Als die Nerven sichtbar wurden



Die Nobelpreisträger und Erzrivalen Camillo Golgi (ganz oben) und Santiago Ramón y Cajal (darunter) enthüllten um die letzte Jahrhundertwende in meisterlichen Zeichnungen die mikroskopische Struktur des Nervengewebes – wie in diesem halbschematischen Bild von Golgi: Es zeigt einen Ausschnitt aus dem »Riechkolben« des Hunde-Gehirns

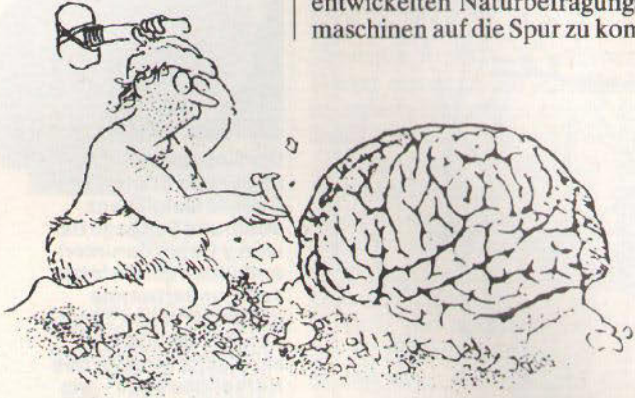
venfasern lange Fortsätze der Nervenzellen sind. Um die gleiche Zeit entdeckte ein weiterer Müller-Schüler, Hermann Helmholtz, daß auch die Nervenfasern der Insekten an Zellkörpern hängen.

Helmholtz schwor mit seinen Freunden Emil Du Bois-Reymond und Ernst Brücke – auch



sie Müller-Schüler – einen „Reduktionisten-Eid“: Die drei gelobten sich feierlich, das Leben nur aus der Physik zu erklären – gegen die Annahme einer speziellen Lebenskraft, aber auch gegen ihren Lehrer Müller, der sich immerhin noch vorstellen konnte, daß die Natur Entwicklungsziele verfolge. Ein „physikalischer Geist“ nahm Einzug in die Biologie.

Die neuen Physiologen waren bestens ausgebildet, der Physik des Lebens mit oft selbst entwickelten Naturbefragungsmaschinen auf die Spur zu kom-



men. Zu ihrem Arsenal zählten Apparate, die auf einer berußten Trommel Kurven aufzeichneten, zählten Batterien und Galvanometer und bis in den Millisekundenbereich hinein präzise Uhren.

Hermann Helmholtz war im Jahr 1850, mit 28 Jahren, kaum Professor in Königsberg geworden, als er sich auch schon daran machte, die Geschwindigkeit der Übertragung von Nervenreizen zu bestimmen. Sein Lehrer Müller hatte diese für unmeßbar gehalten. Helmholtz aber bewältigte die „unlösbar“ Aufgabe in einem raffinierten Experiment: Er reizte den Ischiasnerv eines Frosches an zwei auseinanderliegenden Stellen genau gleichzeitig. Bei unmeßbar schneller Reizübertragung hätte der mit diesem Nerv verbundene Sprungmuskel des Tieres nur einmal zucken dürfen. Doch der zuckte zweimal kurz hintereinander, und Helmholtz berechnete die durchschnittliche Nervenleitgeschwindigkeit mit 20 bis 40 Meter in der Sekunde.

Der zweite im Bund, Emil Du Bois-Reymond, machte dem „Spiritus animalis“ endgültig den Garaus, indem er bewies, daß Nervensignale elektrisch sind. Er entwickelte Methoden, mit denen er den zeitlichen Verlauf des Nervensignals sichtbar machen konnte und begründete damit die Elektrophysiologie.

Ein weiterer Müller-Schüler, Carl Ludwig, zeigte mit Hilfe von Mini-Manometern und einer ausgeklügelten Nervenreiztechnik, daß es sogenannte „sekretorische“ Nerven gibt, die aktiv Stoffe in Drüsen hinein abgeben. Damit legte er das Zündkabel für die gut hundert Jahre später erfolgende Explosion der Neurobiochemie. Ludwig schaffte es auch, besonders feine Schnitte im Stammhirn zu „setzen“, wie seine Zunft sagte. Er erforschte die daraus resultierenden Störungen und bewies, daß es im Stammhirn ein Zentrum gibt, das den Blutkreislauf reguliert. Er ahnte das „Regelkreis-Konzept“ voraus, das ein Jahrhundert später grundlegende Bedeutung für das Verständnis des Nervensystems erlangen sollte.

### Farbe enthüllt das neuronale Netzwerk des Gehirns

Unterdes entwickelten die Mikro-Anatomen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ihr Rüstzeug für den Vorstoß ins Reich des Nervengewebes. Dazu zählten Gewebefixierung und -härtung, verfeinerte Einbettungs- und Schneidemethoden, vor allem aber: Färbetechniken. Nach intensiven mikroskopischen Studien wurden die Zellen des Rückenmarks ebenso beschrieben wie die ihrer Form wegen so genannten Pyramidenzellen der Großhirnrinde und deren Schichtung.

Aber noch konnte niemand sagen, ob das Nervensystem ein zusammenhängendes Netz ohne Untereinheiten bildet oder aus einzelnen, voneinander abgegrenzten Zellen besteht – ein Problem, das die Forscher in zwei feindliche Lager spaltete.

Anführer der „Reticulisten“, die an ein zusammenhängendes Nervenetz glaubten, war der italienische Neurologe Camillo Golgi. Er hatte eine Färbemethode entwickelt, die einzelne Nervenzellen bis in ihre letzten Verästelungen färben konnte. Sein größter Konkurrent war der Spanier Santiago Ramón y Cajal, der wie die anderen „Neuronisten“ glaubte, daß das Nervensystem aus vielen einzelnen Zellen bestehe.

Ausgerechnet Golgis Färbemethode erlaubte Ramón y Cajal, seine Überlegungen plausibel zu machen: Mit ihrer Hilfe beschrieb er so gut wie alle Nervenzelltypen, die innerhalb des Netzwerks zu finden sind. Mehr noch: Der Spanier zeigte auch, daß Nervenzellen zwei verschiedenartige Fortsätze haben: Die „Dendriten“ nehmen Erregungen auf und leiten sie zum Zellkörper. Dort werden die hereinkommenden Signale zu einem Ausgangssignal verarbeitet, das über das lange, dünne „Axon“ an andere Nervenzellen oder Empfangsstellen außerhalb des Nervensystems, vor allem an Muskeln, gesendet wird.

Ramón y Cajal postulierte sogar winzige Schaltstellen dort, wo jeweils zwei Nervenzellen einander berühren und wo die Erregungen übertragen werden. Er nannte sie „Synapsen“. Golgi konnte sich das nun überhaupt nicht vorstellen. Dennoch kam es für beide Streithähne nach zermürbenden Wortgefechten zum Happy-End: 1906 nahmen sie gemeinsam den Nobelpreis für Physiologie und Medizin entgegen.

Damit war eine Basis über Wesen und Wirken des Gehirns geschaffen. Legionen von Forschern haben seither darauf neue Lehrgebäude errichtet. Immer neue Spezialgebiete sind entstanden, unter denen es nicht selten Verständigungsschwierigkeiten gibt und die doch alle ein gemeinsames Ziel haben: Erkenntnisse über das Menschlichste am Menschen zu gewinnen, über sein Gehirn. □





René Magritte: »Reproduction Interdit«

**»Ob die Kopie  
wirklich du bist, dafür muß  
der Beweis noch erbracht werden.«  
»Die Kopie wird behaupten,  
daß sie du ist«**

Stanislaw Lem



## ÜBERSICHTEN

**Floyd E. Bloom, Arlyne Lazerson und Laura Hofstadter:** »Brain, Mind and Behavior«, New York 1985 – üppig illustrierte Einführung in die Hirnforschung, bisher leider nur in englischer Sprache erschienen.

**Jean-Pierre Changeux:** »Der neuronale Mensch«, Reinbek bei Hamburg 1984 – eine neurobiologische Erklärung von Wille und Vorstellung, Handeln und Denken; provozierend einseitig formuliert.

**Robert Ornstein und Richard F. Thompson:** »Unser Gehirn: das lebendige Labyrinth«, Reinbek bei Hamburg 1986 – eine unterhaltsam präsentierte Einführung in die Architektur des Gehirns. Was als gemächlicher Rundgang beginnt, gerät schließlich zu einer rasanten Odyssee durch ein verwirrendes Wunderland: Der menschliche Geist erforscht sich selbst.

**Spektrum der Wissenschaft: »Gehirn und Nervensystem«**, Heidelberg 1986 – ein anspruchsvoller und immer noch aktueller Überblick über Grundlagen und Stand der Neurowissenschaft, bereits in siebter Auflage erschienen.

## ENTWICKLUNG

**Bernhard Hassenstein:** »Verhaltensbiologie des Kindes«, München 1980 – stellt detailliert dar, wie sich kindliche Bedürfnisse und Fähigkeiten biologisch bedingen.

**Ashley Montagu:** »Zum Kind reifen«, Stuttgart 1984 – eine Betrachtung menschlicher Verhaltensmuster unter dem Blickwinkel der »Neotomie«, dem teils lebenslangen Beibehalten kindlicher Entwicklungsmerkmale.

## SCHMERZ

**Ernst Pöppel:** »Lust und Schmerz«, Berlin 1982.

**Robert F. Schmidt und Albrecht Struppler:** »Der Schmerz – Ursachen, Diagnose, Therapie«, München 1983 – 16 Fallbeschreibungen über das Phänomen Schmerz, seine Ursachen und geeignete Therapien.

**Manfred Zimmermann und Hermann Otto Handwerker (Hrsg.): »Schmerz – Konzepte und ärztliches Handeln«**, Berlin, Heidelberg 1984 – ein Lehrbuch.

## HORMONE

**Lawrence Crapo:** »Hormone – Die chemischen Boten des Körpers«, Heidelberg 1986.

## SEHEN UND WAHRNEHMUNG

**Irvin Rock:** »Wahrnehmung – Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen« Heidelberg 1985.

**Robert Sekuler und Randolph Blake:** »Perception«, New York 1985.

**Spektrum der Wissenschaft: »Wahrnehmung und visuelles System«**, Heidelberg 1986.

## SCHIZOPHRENIE

**Silvano Arieti:** »Schizophrenie – Ursachen, Verlauf, Therapie, Hilfen für Betroffene«, München Zürich 1985.

**Heinz Katschnig (Hrsg.): »Die andere Seite der Schizophrenie«**, München, Wien 1984 – acht Autoren schildern Ursachen und Verlauf der Schizophrenie; zusammen mit Patienten und deren Angehörigen präsentieren sie Leitlinien für das Leben mit der Krankheit.

## ALZHEIMER

**Nancy L. Mace und Peter V. Rabins:** »Der 36-Stunden-Tag«, Bern, Stuttgart 1986 – informiert umfassend über die Alzheimer'sche Krankheit und andere Hirnleistungsstörungen. Anhang über Hilfsdienste, Kosten und Pflegeheime in Deutschland.

## SCHLAF UND TRAUM

**Alexander Borbely:** »Das Geheimnis des Schlafs«, Stuttgart 1984.

**Dieter E. Zimmer:** »Wenn wir schlafen und träumen«, München 1984.

## DENKEN

**Alan Baddeley:** »So denkt der Mensch. Unser Gedächtnis und wie es funktioniert«, München 1986.

**Margaret Donaldson:** »Wie Kinder denken«, Bern, Stuttgart, Wien 1982.

**Douglas R. Hofstadter:** »Gödel, Escher, Bach«, Stuttgart 1985 – das Kultbuch über die Fallstricke des Denkens.

**Jean Piaget:** »Das Weltbild des Kindes«, Frankfurt, Berlin, Wien 1980 – eine anregende Analyse der kindlichen Weltansicht.

**Ernst Pöppel:** »Grenzen des Bewusstseins«, Stuttgart 1985.

**Max Wertheimer:** »Produktives Denken«, Frankfurt 1964 – die klassische Einführung in die gestaltpsychologische Theorie des Denkens.

**Dieter E. Zimmer:** »So kommt der Mensch zur Sprache. Über Spracherwerb, Sprachentstehung, Sprache und Denken«, Zürich 1986.

## PHILOSOPHIE/LEIB-SEELE-PROBLEM

**Hans Flohr:** »Gehirn und Bewußtsein«, in: Jahrbuch der Wittheit zu Bremen, Band 28, 1984 – eine kurze, leicht lesbare Einführung in die Leib-Seele-Problematik.

**Alfred Gierer:** »Die Physik, das Leben und die Seele«, München 1985.

**Hartwig Kuhlbeck:** »Gehirn, Bewußtsein und Wirklichkeit«, Darmstadt 1986 – eine neurobiologische Begründung von Philosophie, Wissenschaft und Kultur.

**Karl R. Popper und John C. Eccles:** »Das Ich und sein Gehirn«, München 1982.

**Patricia Smith Churchland:** »Neurophilosophy«, Cambridge (Mass.), London 1986 – soll Neurowissenschaftler in die Philosophie und Philosophen in die Neurowissenschaft einführen; ein Vermittlungsversuch in englischer Sprache.

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

Titel: Rainer Bald und Holgeom GmbH

Seite 3: Manfred Mahn. o.

Seite 4: Erwin Ehret

Seite 5: Heiner Müller-Elsner

Seite 6: Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin, Universität Hamburg; l. o.; Phil Schermeister; l. m.; Wolfgang Volz/Bilderberg; l. u.; Jost Vielmetter/Friedrich-Miescher-Laboratorium der Max-Planck-Gesellschaft; r. o.; Guido Mangold; r. m. und r. u. (kleines Bild); Kurt Scholz/Zefa; r. u. (großes Bild)

Seite 7: Lennart Nilsson; o.; Jean-Léo Dugas; m. o.; Institut für Theorie und Geschichte der Medizin in Münster; u.

**DER KOSMOS IM KOPF**  
Michael Lange/Visum: 8/9; Wolfgang Volz/Bilderberg: 10/11, 24 (5); Rockefeller University: 11 o. l. und r.; Thomas Mayer: 12/13, 16/17, 24 (1); Guido Mangold: 14/15; P. Hendricks: 18 (1); Henning Christoph: 18 (6); Milan Horacek/Bilderberg: 18 (1); Klaus Bossemeyer/Bilderberg: 18 (1); Thomas Höpker/Anne Hamann: 18 (4); Anthony Suaw/Black Star: 18 (1); Susan Johns/Rapho/Photo Researchers: 18 (1); Bob Krist/Black Star: 18 (2); David Walters/Miami Herald/Black Star: 18 (1); Richard Hutschings: 18 (1); Katalin Arkell/Network: 18 (1); Hiroyuki Matsumoto/Black Star: 18 (1); Andrej Reiser/Bilderberg: 18 (1); Sebastian Hartz: 18 (1); Mieke Maas/Image Bank: 18 (1); Lynn Johnson/Black Star: 18 (1); NASA: 19; Institut für Theorie und Geschichte der Medizin, Münster: 20 o.; Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin, Universität Hamburg: 20 u.; Luise Gubbi/Liaison Agency: 24 (1); Martin Rogers/Focus: 24 (1); Jürgen Nef: 24 (1); Dan McCoy/Rainbow: 24 (1); Matt Herron/Black Star: 25; Christopher Springman: 26; Dan McCoy/Black Star: 27; H.-J. Ellerbrock + G. Schaff/Bilderberg: 28/29

## AUF DEN SPUREN

**DER AXONE**  
Thomas Mayer: 34, 36 u.; 40; Lennart Nilsson: 34/35; Jost Vielmetter/Friedrich-Miescher-Laboratorium der Max-Planck-Gesellschaft: 36 o.; Thomas Mayer/MPI Astrophysik/Garching: 36/37; H. Reinhard/Bruce Coleman Ltd.: 38 o.; Kim Taylor/Bruce Coleman Ltd.: 38 m. o.; Rod Williams/Bruce Coleman Ltd.: 38 m. l.; 39 m.; Werner Lay/Bruce Coleman Ltd.: 38 u.; Warbeck/Mauritius: 39 o.; Helmut Albrecht/Bruce Coleman Ltd.: 39 u.; Peter Menzel: 42, 45; Wolfgang Volz/Bilderberg: 43; Enrico Ferrell/Focus: 47

**SCHMERZ**  
Dr. Wolfgang Larbig/Psychologisches Institut/Universität Tübingen: 48/49; Sammy Minkoff: 50/51; Or Kraipit/Sipa-Press: 52/53; Lynn Goldsmith: 53 (4); Rayavidi: 54 o.; Gamma: 55 o. und r.; James Nachtwey/Magnum: 55 u.; Walter Kioos Hoechst AG: 57 u.; Dan McCoy/Black Star: 58, 60/61; Bill Stanton/Magnum: 59 o.; Dieter Ludwig/Sipa: 59 u.; Heiner Müller-Elsner: 61; Manfred Mahn: 62

**DIE MACHT DER MOLEKÜLE**  
International Museum of Photography at George Eastman House: 64; Thomas Mayer: 66; Ullstein Bilderdienst: 67; Wolfgang Volz/Bilderberg: 68; P. Hendricks: 68/69; Bongarts: 71 o. l. und r.; Sven Simon: 71 o. r.; Horst Müller: 71 m. r.; Anselm Spring: 72; Michael Friedel: 73 l.

**WER SEINEN AUGEN TRAUT**  
Adel Lorenz, Messner, Müller: 74/75, 78; Wolfgang Volz/Bilderberg: 76, 77, 81, 84; Martin Rogers/Focus: 82; Enrico Ferrell/Focus: 83; Livingston: 85 o. l.; Hubel: 85 o. r.; Lynn Johnson/Black Star: 85 u.; Rainer Bald: 86; Thomas Mayer: 87; Prof. Ivo Kohler: 88

**WENN DAS ICH ZERBRUCHT**  
Weinberger/Berman/National Institute of Mental Health/ Bethesda: 90; Rainer Bald: 91; Thomas Mayer: 92/93, 93 o.

MPI für neurologische Fgschung, Köln: 93 u.; H.-J. Ellerbrock + G. Schaff/Bilderberg: 94-95

## WENN DAS GEHIRN

**ZERFÄLLT**  
MPI für neurologische Forschung, Köln: 98; Rainer Bald: 99; Wolfgang Volz/Bilderberg: 100/101; Bisson/Sigma: 103 (1); Max Scheler/Stern: 103 (1); Robert Lebeck/Stern: 103 (1); Sigma: 103 (1); Action Press: 103 (3); Andrej Reiser/Bilderberg: 103 (2); dpa: 103 (2); Photo Selection: 103 (1); Lafont/Sigma/Pandis: 103 (1)

## WENN DAS GROSSHIRN

**SCHWEIGT**  
Rainer Bald: 105; Guido Mangold: 106-111

## DIE ENTAUBERTE NACHT

Dan McCoy/Black Star: 114/115; Peter Menzel: 118; Michael K. Nichols/Magnum: 119; Jürgen Nef: 120; Hodler/Colorphoto Hinz/Alschwi-Basel: 123; Anselm Spring: 124 (2), 125 (1); Horst Munz/Anne Hamann: 124 (1); NASA: 124 (1); Hans-J. Burkard/Bilderberg: 124 (1); Krämer/Stern/Voller Ernst: 125 (1); Thomas Höpker/Anne Hamann: 124 (2), 125 (3); Michael Lange/Visum: 125 (2); Michael Wolf/Visum: 125 (1); Gerd Ludwig/Visum: 125 (1); N. Kolmikov/Voller Ernst: 125 (1); Rudi Meisel/Visum: 125 (1); Dr. R. Clark, M. Goff/Science Photo Library/Photo Researchers: 126

## IN DEN GESPINSTEN

**DES GEISTES**  
Wolfgang Volz/Bilderberg: 128-137 alle Fotos außer 131 u.; Rockefeller University: 131 u.

## WIE SPIEGELT SICH DIE

**WELT IM KOPF?**  
Heiner Müller-Elsner: 138; Eberhard Grames: 139; Lucien Aigner/Ana, Paris: 142 o.; D. Hudson: 142 u.; James Nachtwey/Magnum: 143; Hans-J. Burkard/Bilderberg: 143 o.; Pressebildagentur Werk: 143 m. und u.; Wolfgang Volz/Bilderberg: 144

## STICHWORTE

P. Hendricks: 150; AP: 150/151; Hiroyuki Matsumoto/Black Star: 152/153; Alain Mingan/Gamma: 153; Thomas Mayer: 154/155; Margret Bourke-White/Life Magazine © 1946 Time Inc.: 154; Ernst Haas/Studio, Inc.: 156/157; AP: 157 u.; Kurt Scholz/Zefa: 158/159; Guido Mangold: 158

## GLOSSAR

Wolfgang Volz/Bilderberg: 160-163; MPI für neurologische Forschung: 162

## ENZYKLOPÄDIE DER

**IGNORANZ**  
Thomas Mayer: 166, 167; Wolfgang Volz/Bilderberg: 169

## VOM DENKEN DEN HERZEN

**ZUM FÜHLENDEN HIRN**  
Institut für Theorie und Geschichte der Medizin, Münster: 171-173, 174 o. und l. u.; 175; Detlef Odenhausen: 174 r. u.; Cosmopress, Genf: 177

## ZEICHNUNGEN/

**ILLUSTRATIONEN**  
Vladimir Rencin: 3, 176; Carl W. Röhrig: 7, 116/117, 170/171; Wissenschaftliche Illustration/Jörg Kühn: 21-23, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 50 o., 51 u. und r., 56 r., 65, 81; Uwe Brandt: 31; Gisbert Lange: 46 o., 57 o., 75, 78, 79, 114/115, 140, 160, 161 o.; M. C. Escher/Cordon Art: 46 u., 80; Sally Balch: aus: Brain, Mind and Behavior/W. H. Freeman: 56 l.; Mirko Ilie/Discover Magazine: 70; Günther Hauf: 141; Jan Sawka: 138, 147; aus: Günther Palm »Neural Assemblies«, Springer-Verlag, Heidelberg/New York: 161 u.; Holger Everling: 162; GEO-Grafik: 163; Camillo Golgi, G. Fischer, Jena 1894: 175

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.

© GEO 1987, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge:

Einem Teil der Auflage liegen Prospekte für das Neue Gymnasium Zürich bei.



# In den Werkstätten der Zukunft



Vorstoß ins Unsichtbare: Nobelpreisträger Gerd Binnig und Heinrich Rohrer

## Deutschland-deine Forscher

H. GÜNTHEROTH/P. SANDMEYER  
Wege in die Zukunft - zwischen  
Hoffnung und Horror



Horst Güntheroth/Peter Sandmeyer  
**Deutschland, deine Forscher**  
Wege in die Zukunft - zwischen  
Hoffnung und Horror.  
208 Seiten mit 60 Abbildungen,  
Format 16,8 x 24 cm,  
Paperback, DM 29,80

Deutsche Forschung sei wieder Spitze, erklärte der Wissenschafts-Minister, nachdem das Nobel-Komitee zwei deutsche Physiker zu Preisträgern gekürt hatte. Aber vielen fällt es schwer, seine technologische Zuversicht zu teilen: Was geschieht in den Labors? Woran wird gearbeitet? Oder gibt es gar Grund zur Furcht vor der naturwissenschaftlichen Forschung? Am Beispiel von sechs Wissenschaftlern werden diese Fragen beantwortet. **Dazu bringt das Buch eine Übersicht über die Arbeitsplätze in den naturwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen der Bundesrepublik.**

## Abruf-Coupon

**Ja**, schicken Sie mir bitte:  
**Deutschland, deine Forscher**  
DM 29,80, Best.-Nr. Z 7960  
(Alle Preise inkl. MwSt. und Porto)  
Ich kann das Buch ohne Begründung und auf Ihre Kosten innerhalb von 10 Tagen zurückschicken, wenn es Ihren Ausführungen nicht entspricht und ich nicht zufrieden bin. **Ich bezahle erst, wenn ich Ihre Rechnung erhalten habe.** Bei Bestellungen aus dem Ausland nur gegen Vorauszahlung per Scheck zuzüglich DM 3,-

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum/Unterschrift 81 150

(Bei Minderjährigen Unterschrift des Erziehungsberechtigten)

Heute noch absenden an:  
STERN-Buch Versand-Service, Postfach 600,  
7107 Neckarsulm. Telefonische Buchbestel-  
lung Tag und Nacht, sonn- und feiertags:  
071 32/75 90. Oder über Btx \* 34 5004 #



**stern  
buch**

In jeder guten Buchhandlung erhältlich.



APOLLINARIS THE QUEEN OF TABLE WATERS ▲

*Apollinaris*  
The Queen of Table Waters

*Apollinaris*

HES MINERALWASSER ENTEISENT UND  
NER QUELLKOHLENSÄURE VERSETZT

ung entsprechend den Ergebnissen der amtlich aner-  
se vom 19.3.1985 des Instituts Fresenius, Taunusstein.

RIS BRUNNEN ACTIEN-GESELLSCHAFT

AD NEUENAUH-AHRWEILER

AUS DIESER QUELLE TRINKT DIE WELT.