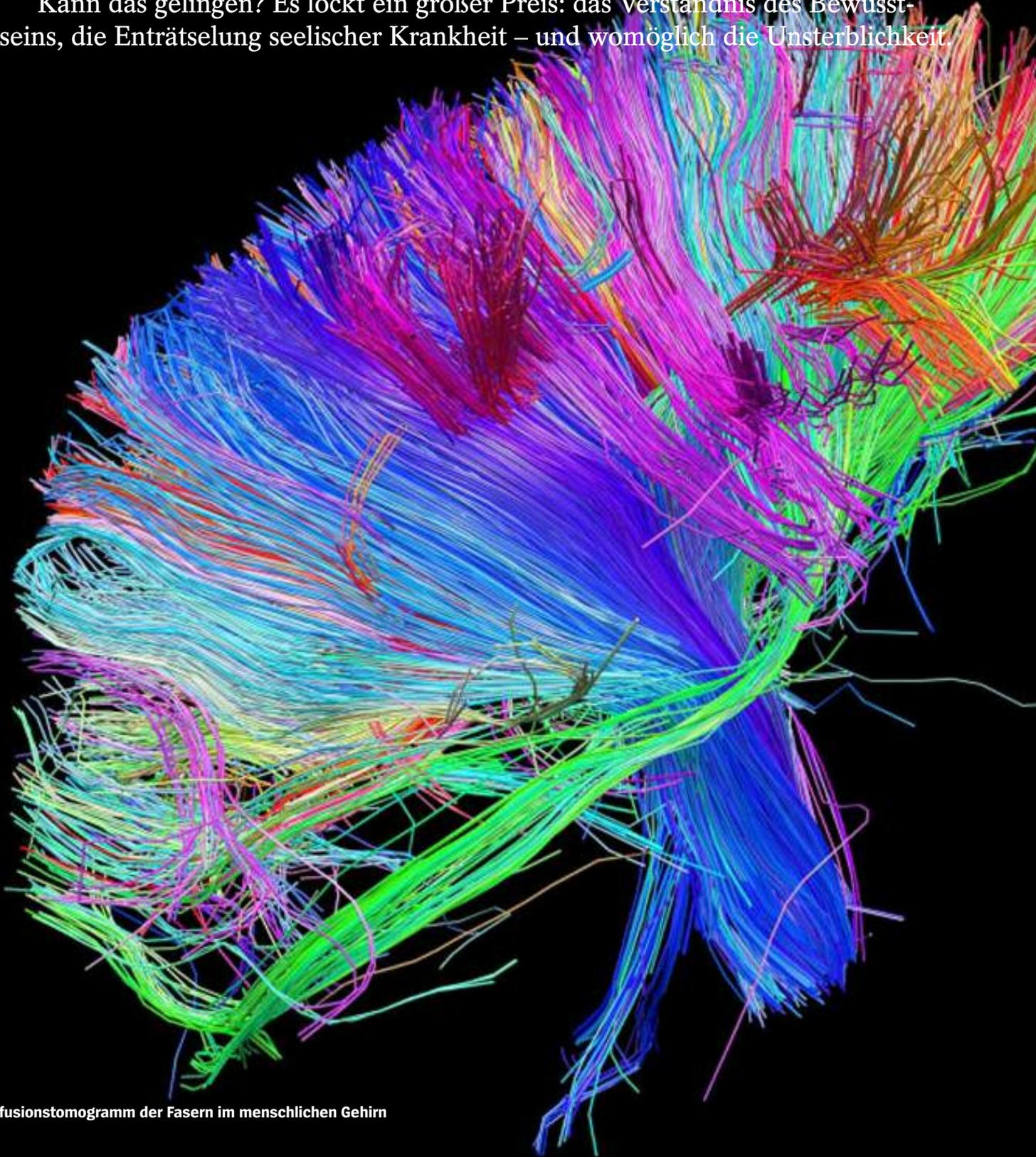


NEUROWISSENSCHAFTEN

# Im Flug durch das Gehirn

Hirnforscher wollen den Schaltplan aller 100 Milliarden Nervenzellen kartieren. Kann das gelingen? Es lockt ein großer Preis: das Verständnis des Bewusstseins, die Enträtselung seelischer Krankheit – und womöglich die Unsterblichkeit.



Diffusionstomogramm der Fasern im menschlichen Gehirn

Durch ein Gewirr grauer Fäden geht der rasende Flug. Nur im Augenwinkel sieht der Pilot, wie rechts und links unförmige, verästelte Gebilde vorübersausen. Sein Blick ist auf eine Art Tunnel gerichtet, der sich direkt vor dem Cockpit öffnet. Seine Mission: nie diesen Schlauch verlassen.

Es ist ein Flug durch nie zuvor erkundetes Gelände. Aus Simulationen rechts in Kino und Fernsehen mag sie geläufig sein, doch hier, am Münchner Max-Planck-Institut (MPI) für Neurobiologie, wird sie Wirklichkeit: die Reise durch Gehirnschicht. Denn jeder der Tunnel, die hier zu sehen sind, gehört zu einer realen Nervenzelle.

Die kleinen Schnürringe rechts und links, die der Kommunikation mit anderen Zellen dienen; die dicken Fettschichten, die einzelne Nervenfasern umschlingen; die Botenstoffbläschen, die, Staubwolken gleich, unvermittelt die Sicht nehmen können: alles echt, alles Abbild real existierendes Nervengewebes.

Der MPI-Forscher und Mediziner Moritz Helmstädter hat ein winziges Würfelchen Gehirnschicht, kaum größer als

ein Zuckerkorn, in einige tausend hauchfeine Scheiben zerschnitten, jede von ihnen mit dem Elektronenmikroskop fotografiert und anschließend am Computer wieder zusammengesetzt. Jetzt kann er nach Herzenslust spazieren fliegen durch den Stoff, aus dem die Wünsche, Hoffnungen und Träume sind.

Denn es sind Zellen wie diese, in denen sich Neugier oder Begierde regt. Es ist elektrisches Geflicker in einem solchen enggeknüpften Neuronennetz, das uns trauern oder kichern lässt, das unsere Arme und Finger lenkt, das Liebesnächte erinnert und Mathe-Formeln knackt.

Das spezielle Nervengewebe allerdings, durch das Hirnforscher Helmstädter manövriert, ist nicht fürs Rechnen zuständig und auch nicht für romantische Gefühle. Hier werden Signale verarbeitet, die ein Mäuseschnurrhaar sendet – für Helmstädter ein ideales Studienobjekt, das Rückschlüsse auf den Menschen erlaubt.

Mäuse sind nachtaktive Tiere, Schnurrhaare für sie ein wichtiges Sinnesorgan. Unentwegt tasten sie damit ihr Umfeld ab. Jedes der 32 hochsensiblen Schnurrhaare meldet Berührungen aller Art an einen Klumpen aus rund 4000 Nervenzellen in Schicht 4 der Großhirnrinde.

Einen dieser Klumpen hat Helmstädter aus dem Hirngewebe einer Maus herausgeschnitten. Das Geflecht der feinverästelten Neuronen, so vermutet der Hirnforscher, birgt das Geheimnis, wie sich die Vibration eines Haars in den Eindruck von Form, Bewegung oder Konsistenz eines Gegenstands verwandeln kann.

Wie aber sollte Helmstädter herausfinden, welches der vielen Ästchen sich wohin windet? Insgesamt 40 Meter Nervenfasern galt es zu erfassen, verknäult in einem Hirnklümpchen von nur einem halben Millimeter Kantenlänge.

Bald war klar: Ein Computer kann das bisher nicht. Er irrt zu oft, zu leicht wechselt er zwei nah beieinanderliegende Nervenfasern. In Zweifelsfällen kann allein ein Mensch, durch sorgfältigen Abgleich der einzelnen Hirnschnitt-Fotos, den Weg durch das Labyrinth der Nervenzellen finden.

Doch welch unermessliches Arbeitspensum bedeutet das! „Die Erkundung würde ungefähr 200 000 Stunden dauern“, sagt Helmstädter, „so viel arbeitet ein Mensch im ganzen Leben nicht.“

Unmöglich also, eine solche Titanenaufgabe zu vollbringen? Helmstädter wollte sich damit nicht zufriedengeben – und fand einen Ort, an dem er eine ganze Armada menschlicher Hilfskräfte zu rekrutieren hofft: das Internet.

Zusammen mit Spiele-Designern und Informatikstudenten hat Helmstädter „Brainflight“ erdacht, ein Computerspiel, das jedermann Gelegenheit geben soll, sich auf die Reise ins Gehirn zu ma-



HUMANCONNECTOMEPROJECT.ORG

## Das Universum im Kopf

Verfahren zur 3-D-Kartierung des Gehirns

Das menschliche Hirn beinhaltet rund

**100 Milliarden Nervenzellen.**

Die Zahl der Nervenverbindungen liegt nochmal

**1000fach höher.**

Aneinandergereiht ergäben sie ein „Kabel“ von

**5 Millionen Kilometer Länge.**

### Serielle Block-Elektronenmikroskopie

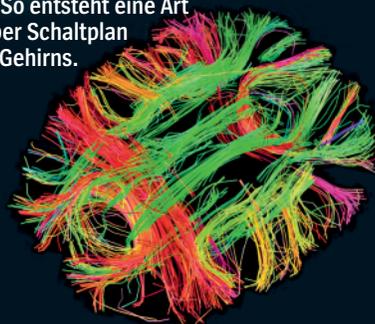
Hirngewebe wird in hauchdünne Scheiben zerteilt und jedes von ihnen hochauflösend gescannt. Der Rechner konstruiert daraus ein dreidimensionales Abbild des neuronalen Netzes.



WOLFGANG STECHE/VISSUM

### Diffusionstomografie

Ein spezielles Magnetresonanzverfahren macht den Verlauf von Nervenfasern sichtbar. So entsteht eine Art grober Schaltplan des Gehirns.



DER SPIEGEL

chen. Vom simulierten Cockpit eines Flugzeugs aus steuert der Spieler durch Scheiben echten Hirngewebes. Und wer am erfolgreichsten den Nervensträngen folgt, der bekommt die meisten Punkte.

Im März soll „Brainflight“ online gehen. Wenn sich dann genügend Spieler auf die Jagd durchs Hirn begeben, kann das Abbild des Mäuseschnurrhirns binnen Wochen fertig sein.



Moritz Helmstädter zählt zu einem Trupp Rebellen, die sich vorgenommen haben, die Hirnforschung gründlich umzukrempeln. Ihr Credo: Das Fach stecke in einer Sackgasse. Nur mit einem radikal neuen Ansatz werde sich ein Ausweg finden.

Zwar boomen die Neurowissenschaften wie kaum eine andere Disziplin. Die Bilanz aber fällt in zweierlei Hinsicht ernüchternd aus: Zum einen bleibt die philosophische Frage, die aller Hirnforschung zugrunde liegt, weiterhin ungelöst. Spätestens seit René Descartes seinen berühmten Lehrsatz „Ich denke, also bin ich“ formulierte, arbeiten sich Forscher daran ab, das Verhältnis von Geist und Körper zu verstehen. Und doch vermag bis heute niemand zu erklären, wieso einem Klumpen aus anderthalb Kilogramm Eiweiß und Fett ein immaterielles Fluidum entströmen kann: die Gedanken. Anders ausgedrückt: Unklar bleibt, wie aus Materie Geist entsteht.

Zum anderen hat das Heer der Hirnforscher auch in praktischer Hinsicht erschreckend wenig Handfestes vorzuweisen. Gleichgültig ob Autismus, Schizophrenie, Hyperaktivität oder Depression – bei keinem dieser weitverbreiteten Leiden vermögen sie die Ursachen zu benennen. Was im Hirn der Kranken falsch läuft, wissen die Forscher nicht.

Helmstädter und seine Mitstreiter glauben, einen Grund für das doppelte Versagen ihrer Zunft zu kennen: Bei all ihrem Eifer hätten die Forscher bisher die wesentliche Eigenschaft des Gehirns schlicht übersehen: dass es nämlich ein komplex verdrahtetes Netzwerk ist.

In der Tat wissen die Forscher über die Verschaltung der 100 Milliarden Zellen im Kopf fast nichts. Zwar haben sie einzelne Neuronen ausgiebig studiert. Sie haben untersucht, wann sich welche molekularen Kanäle in der Zellmembran öffnen, welcher Botenstoff an welcher Art von Synapse ausgeschüttet wird und wie elektrische Signale die Nervenfasern hinabschießen.

Doch daraus allein wird sich kein Verständnis geistiger Prozesse ableiten lassen. „Aus ein paar vereinzelt Bäumen können sie nicht auf die Gesamtheit des Waldes schließen“, konstatiert der Hirnforscher Sebastian Seung vom Massachusetts Institute of Technology (MIT).



WOLFGANG STEICHE / VISUM / DER SPIEGEL

Mediziner Helmstädter

„Die Erkundung von einem Klümpchen Hirnmasse würde 200 000 Stunden dauern – so viel arbeitet ein Mensch im ganzen Leben nicht.“

„Eine einzelne Zelle wird niemals fähig zu verständigem Handeln sein“, erklärt er. Erst indem sie miteinander verschaltet werden, gehe aus bloßen elektrischen Impulsen ein Geist, eine Persönlichkeit, ein denkendes, empfindendes Ich hervor.

„Connectome“ lautet das Schlagwort. Es bezeichnet die Gesamtheit aller Verdrahtungen im Gehirn. „Die gilt es zu kartieren“, erklärt der Heidelberger Forscher Winfried Denk, der seinen Kollegen Helmstädter in der Kunst der Hirnvermessung ausgebildet hat.

Denk skizziert damit ein Vorhaben abenteuerlicher Dimension: Bisher haben die Forscher erst das Connectome eines einzigen Organismus vollständig erfasst: von *Caenorhabditis elegans*, einem etwa einen Millimeter langen Fadenwurm. Zelle für Zelle hat das Team um den britischen Nobelpreisträger Sydney Brenner alle 302 Neuronen dieses Tiers vermessend. Zwölf Jahre dauerte die Tüftelei.

Um wie viel schwieriger wird es erst sein, dieselbe Aufgabe im Fall des *Homo sapiens* zu bewältigen! Gut fünf Millionen Kilometer misst die Gesamtlänge aller Nervenärmchen unter der menschlichen Schädeldecke. Wie soll es da gelingen, jedes einzelne von ihnen durch das neuronale Labyrinth zu verfolgen?

Auf zwei verschiedenen Wegen packen die Forscher jetzt dieses ehrgeizige Ziel an. Zum einen hat die US-Regierung vor zwei Jahren 40 Millionen Dollar für das „Human Connectome Project“ bereitgestellt. Ziel ist es, mit Hilfe moderner To-

mografen einen Atlas des zentralen Nervensystems zu erstellen, eine Art groben Schaltplan des menschlichen Denkgorgans.

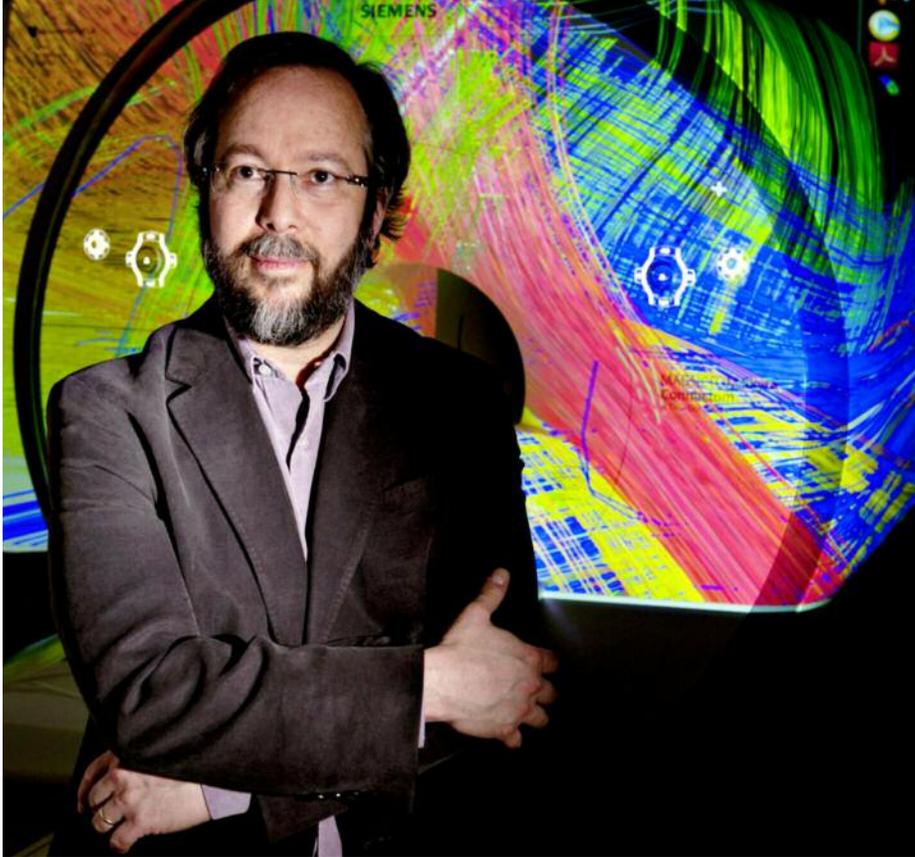
Allerdings wird es so nur möglich sein, die langreichweitigen Nervenbahnen zu kartieren, die quer durchs Gehirn laufen. Um einzelne Zellen zu sehen, ist das Auflösungsvermögen selbst der besten Tomografen viel zu gering.

Deshalb gehen Helmstädter, Denk und Seung noch einen Schritt weiter: Mit Hilfe des Elektronenmikroskops wollen sie die Verdrahtung jeder einzelnen Zelle vermessen.

Es ist ein aberwitziger Plan. Doch sind sich die Hirnvermesser sicher, dass die Mühe lohnt: Wenn erst das Connectome entschlüsselt sei, werde es auch gelingen, das Rätsel des Bewusstseins zu knacken und Krankheiten wie der Schizophrenie auf die Spur zu kommen.



„Sehen Sie da, ist das nicht faszinierend?“, fragt Van Wedeen und zeigt auf das knallbunte Bild auf seinem Monitor: Lianengleich umschlingen giftgrüne Stränge ein violette Faserbündel, karminrote, gelbe und hellblaue Bahnen durchdringen einander. „Da, der Hippocampus“, sagt Wedeen und ist, atemlos, quirlig, ohne Pause, schon beim nächsten Bild: „Hier sieht man die Netzwerkstruktur besonders gut“, erklärt er. „Wie das Straßennetz von Manhattan, nur eben dreidimensional.“



Mathematiker Wedeen

„Da dachten die Leute immer, die Nervenbahnen seien verknäult wie gekochte Spaghetti. Und stattdessen jetzt das hier!“

Zack, schon erscheint das nächste Tomografenbild, nicht weniger prachtvoll als die anderen, und wieder zeigt es verschlungene und doch regelhaft verflochtene Nervenfasern. Aber Wedeen begnügt sich inzwischen schon nicht mehr mit der bloßen Beschreibung. Er ist längst bei den Gesetzen der Evolution angekommen und bei denen der Hirnreifung im Embryo. Für ihn hat all das etwas mit diesen Bildern zu tun.

Ohne Unterlass sprudeln die Ideen, die Theorien, die Spekulationen aus Wedeen hervor. Als Mathematiker hat er seine Karriere begonnen. Doch hier, in der Hirnforschung am Martinos Center for Biomedical Imaging in Boston, hat er seine Bestimmung gefunden.

Mit Kernspin- und Positronenemissionstomografen, mit Magnetstimulation und Elektroenzephalografen durchleuchten die Forscher hier menschliche Gehirne. Sie schieben Mäuse und Ratten in mächtige Röhren, um deren Nervenewebe detailgenau zu erkunden. Sie halten Probanden an, zu lesen und zu singen, zu lachen und zu horchen, zu rechnen und zu beten, und währenddessen verfolgen sie, was sich in ihrem Hirn tut.

Den wohl erstaunlichsten der Tomografen aber betreibt Wedeen. Das Gerät steht im Nebengebäude des Martinos Center, einer langgestreckten Baracke, in der einst, als das Gelände noch Teil der Bostoner Marinewerft war, die Taumacher Flachs zu Seilen flochten.

In einer Kammer steht hier, fast raumfüllend von mächtigen Magneten eingefasst, ein sogenannter Diffusionstomograf. Wie ein gewöhnlicher Kernspintomograf fängt er die Signale von im Magnetfeld taumelnden Atomen auf. Doch mehr noch: Er registriert auch, in welche Richtung sich diese Atome bewegen. Und da Moleküle im Gehirn meist entlang der Nervenfasern fließen, gelingt es, diese sichtbar zu machen. „Es ist, wie wenn Sie Tinte auf ein Tischtuch kippen“, erklärt Wedeen. „Die breitet sich auch entlang der Fäden aus.“

Wedeen gelang es, das Verfahren so weit zu verfeinern, dass er auch sich kreuzende Bündel voneinander unterscheiden kann – der Weg war geebnet für eine völlig neue Form der Hirnerkundung. Wedeen dringt vor auf ein Terrain, das wissenschaftlich noch weitgehend Neuland ist: die „weiße Substanz“.

In sechs Schichten, insgesamt zwei bis vier Millimeter dick, umschließen die sprichwörtlichen grauen Zellen sämtliche Wölbungen und Furchen des Großhirns. Weitgehend strukturlos dagegen erscheint die weiße Masse darunter: Hier verlaufen die Fasern, welche die verschiedenen Hirnregionen miteinander verbinden. Hier tauschen die Sinnesorgane ihre Informationen aus, hier werden Erinnerungen, Wahrnehmungen, Gefühle und Pläne miteinander vernetzt. Hier sitzt, mit anderen Worten, die Schaltzentrale des Bewusstseins.

Als Flaggschiff des „Human Connectome Project“ produziert Wedeens Maschine nun dutzendweise bunte Bilder,

wie sie nie zuvor zu sehen waren. In knalligen Farben zeigen sie sich kreuzende und umschlingende Bahnen: gleichsam den Kabelbaum im Maschinenraum des menschlichen Neurocomputers.

In der ganzen Natur, meint Wedeen, gebe es nichts, mit dem sich diese Strukturen vergleichen lassen. Netz? Matrix? Maschenwerk? Schon mit der Bezeichnung tat er sich schwer. Wedeen googelte alle Begriffe, die ihm in den Sinn kamen. Am Ende entschied er sich für „grid“, zu Deutsch: „Gitter“. Hier wiesen die Fundstellen der Suchmaschine am ehesten Ähnlichkeiten mit den Hirnaufnahmen seines Tomografen auf.

Gerade erst hat die Auswertung begonnen, Wedeen jedoch ist viel zu ungeduldig, als dass er nicht schon seine Deutungen parat hätte. Vor allem die regelmäßige Gitterstruktur begeistert ihn: „Da dachten die Leute immer, die Nervenbahnen seien verknäult wie gekochte Spaghetti. Und stattdessen jetzt das hier!“, sagt er und zoomt in einen Knotenpunkt des Neuronetzes hinein: „Alles brav in rechten Winkeln angeordnet.“

Eigentlich sei das auch gar nicht so erstaunlich, meint Wedeen. „Stellen Sie sich vor: Rund 100 Milliarden Nervenzellen sind in unserem Kopf verschaltet, und jede davon bildet 1000 Synapsen. Wie soll das gehen, gesteuert von nur ein paar tausend Genen?“ Das könne doch nur klappen, wenn alles nach einfachen Regeln vor sich geht.

In der jetzt offenbaren Gitterstruktur sieht Wedeen nichts anderes als eine Art neuronales Koordinatensystem: „Die Natur macht es genau wie wir mit unseren Längen- und Breitengraden“, sagt er. Vorne–hinten; oben–unten; rechts–links: Das Gitter gibt seiner Überzeugung nach die drei Körperachsen vor, und das vermutlich schon seit vielen Jahrmillionen. Am liebsten würde er jetzt die neuronale Gitterstruktur von Lurch, Maus, Affe und Mensch vergleichen, um so die großen Entwicklungsschritte der Evolution nachzuvollziehen.

Auch sonst mangelt es Wedeen nicht an Plänen: Zum Beispiel würde er gern Frühchen in den Tomografen schieben, erste Gespräche mit örtlichen Neonatologen hat er schon geführt. „Die Babys könnten während der Untersuchung ganz friedlich schlafen“, sagt er.

Vielleicht ließen sich auf den Hirnscans ja frühzeitig Verschaltungsprobleme im Hirn diagnostizieren, meint Wedeen. Vor allem aber könnte er studieren, wie das Nervengitter im Laufe der embryonalen Entwicklung erst entsteht.

Oder Leichen: Zu gern würde Wedeen auch ihrer habhaft werden. Schon hat er sich auf die Suche nach Hirnspendern gemacht. Ihre Zustimmung vorausgesetzt, könnte er ihr Hirngewebe kurz nach dem Tod fixieren und sie dann

durchleuchten. Anders als bei Lebenden, würden Tote die Scan-Prozedur auch tagelang über sich ergehen lassen. Die so entstehenden Hirnbilder hätten deshalb bis zu zehnmal mehr Details.



Auch Winfried Denk kennt die bunten Tomografenbilder von Van Wedeen. „Sehr interessant“ finde er sie, sagt er, aber es klingt durchaus zögerlich. „Kein Zweifel, Van sieht da etwas. Das Problem ist nur: Er weiß nicht, was.“

Denk fehlt Wedeens Überschwänglichkeit. Spekulationen sind ihm suspekt, er wägt seine Worte ab, hält sich an das, was sicher ist. Deshalb fragt er sich, was auf Wedeens bunten Bildern eigentlich zu sehen ist.

Genau weiß das bisher niemand. Einzelne Nervenzellen jedenfalls, so viel ist sicher, sind es nicht. Um die Verästelungen der Neuronen erkennen zu können, müsste das Bild etwa um den Faktor 100 000 schärfer sein.

Gut möglich, dass Wedeens Methode geeignet ist, den Datenfernverkehr im Hirn besser zu verstehen, meint Denk. Die eigentliche Rechenarbeit aber vollziehe sich im Geplauder dichtbenachbarter Zellen. Und deren Geflecht lasse sich nur auf Aufnahmen höchster Genauigkeit erkennen – an solchen Bildern arbeitet Hirnforscher Denk.

„Alles, was Sie hier sehen, schrumpft in einem Tomografen auf einen Punkt“, sagt er. Er steht im Treppenhaus des Heidelberger Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung. Treppenabsatz und Wände sind mit Elektronenmikroskopaufnahmen tapeziert, die hier am Institut entstanden sind: ein staubkornkleines Stückchen Retina, aufgebläht zur Größe eines Kleiderschranks.

Zu erkennen sind drei Schichten Nervenzellen aus der Netzhaut, zwischen ihnen unübersichtliches Drahtgeknäuel. Fünf verschiedene Neuronentypen, von den Experten in bis zu 70 Untersorten eingeteilt, bilden hier eine Art neuronalen Computerchip.

Spezialisiert auf die Bildverarbeitung, hat dieser winzige Neurocomputer die Aufgabe, Lichtreize auf Farbe, Helligkeit, Kontrast, Kontur oder Bewegung hin zu analysieren. Erst die aufbereiteten Daten werden dann über den Sehnerv ans Gehirn geschickt.

Für Hirnforscher ist das Neuronennetzwerk in der Retina ein geradezu idealer Untersuchungsgegenstand: Es bildet eine weitgehend abgeschlossene Einheit; es lässt sich vergleichsweise einfach präparieren; und bei Bedarf kann es im Labor sogar einige Zeit lang funktionsfähig am Leben erhalten werden.

Denk steigt hinab in den Keller des Heidelberger Instituts, er will zeigen, wo

die Bilder im Treppenhaus entstanden sind. Etwas schlurfend weist er den Weg, das eine Bein zieht er dabei nach. „Es entbehrt nicht einer gewissen Ironie, dass es ausgerechnet mich erwischt hat“, erklärt er. Vor fünf Jahren musste sich der Hirnforscher von den Ärzten sagen lassen, dass etwas in seinem eigenen Gehirn nicht stimmte: Parkinson.

Als er die Diagnose hörte, wusste Denk: Die fortschreitende Schüttellähmung, unter der er litt, würde sich zwar medikamentös hinauszögern lassen, aufhalten aber lässt sie sich nicht. Am eigenen Leib erfuhr der Forscher, wie hilflos Medizin und Wissenschaft oft sind, wenn das Hirn von Krankheit befallen ist.

Damals, erzählt er, habe er überlegt, ob er sich fortan der Erforschung dieses Leidens widmen sollte. Doch die Vorstellung, von den Kollegen als Patient behandelt zu werden, schreckte ihn. „Vor allem aber wollte ich meine Talente dort einsetzen, wo ich den größtmöglichen Nutzen erreichen kann.“

Seine Stärke sieht Denk in seiner Fähigkeit, neue wissenschaftliche Methoden zu entwickeln, die er als gelernter Physiker ausstüftelt. Stolz präsentiert er ein Gerät, das in der Fachwelt als „Heidelberger Hobel“ bekannt ist. Gerade erst hat Denk den mit einer Million Dollar dotierten Kavli-Preis dafür erhalten.

Ein Messer aus Diamant hobelt dabei 30 Nanometer dünne Schichten von einem Gewebestück. Nach jedem Schnitt tastet ein Elektronenmikroskop die Probe ab.

Schicht für Schicht entsteht so ein 3-D-Bild des Nervengewebes.

Inzwischen ist es Denk und seinem Team auch gelungen, ein ganzes Mäusehirn chemisch zu fixieren, ohne dass das Netzwerk der Nervenzellen dabei Schaden nimmt. Eine erste Etappe auf dem Weg zu dem Ziel, ein gesamtes Gehirn zu kartieren, ist damit geschafft.

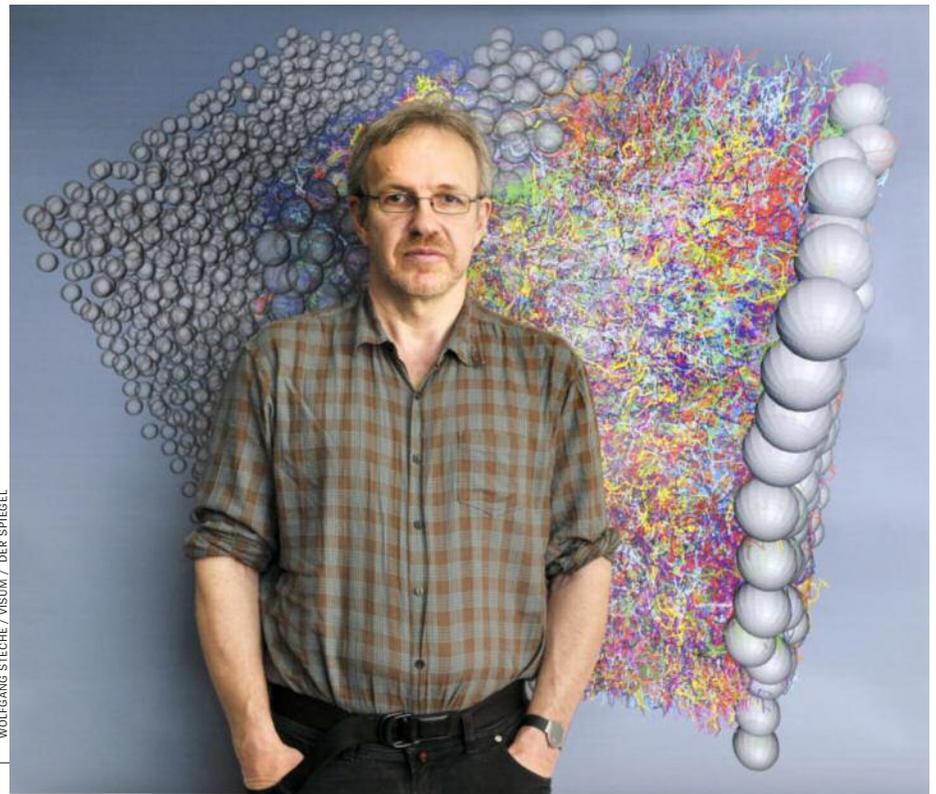
Noch allerdings gibt es weitere Hindernisse. So würde ein herkömmliches Elektronenmikroskop rund ein Jahrhundert brauchen, um all die vielen Gewebeschnitte abzutasten. Ein Hochleistungsgerät von Zeiss soll hier künftig Abhilfe schaffen: 60 Elektronenstrahlen kommen darin gleichzeitig zum Einsatz. Die Zeit, um ein Mäusehirn zu scannen, ließe sich damit auf rund ein Jahr verkürzen.

Mehr Schwierigkeiten dürfte ein anderes Problem bereiten: Das 3-D-Elektronenmikroskop liefert kaum zu bewältigende Datenmengen. Zehn Kubikmillimeter Hirnmasse entspricht einem Petabyte, so lautet die Faustregel. Eine einfache Überschlagsrechnung offenbart, um welche gespenstischen Größenordnungen es hier geht: Um ein Mäusehirn vollständig abzubilden, bedarf es etwa so viel Speicherplatz, wie ihn das gesamte Deutsche Klimarechenzentrum hat. Die Datenmasse, die bei der Totalerfassung eines Menschenhirns anfallen würde, übersteigt sogar diejenige des gesamten jährlichen Internetverkehrs.

Denk jedoch schrecken diese Zahlen wenig. Er ist stolz darauf, eine Entwick-

#### Physiker Denk

„Alles, was Sie hier sehen, schrumpft in der Aufnahme eines Tomografen auf einen Punkt.“



lung angestoßen zu haben, selbst wenn sie erst seine Nachfolger vollenden mögen. Er ist überzeugt davon, dass sich der Aufwand lohnt – schon weil die Kenntnis des Connectomes auch medizinisch von enormem Nutzen sein werde.

Bisher gibt es nur Hypothesen darüber, was die Seele von Depressiven eintrübt, was schizophrene Patienten Stimmen hören lässt und was andere in der Einsamkeit des Autismus gefangen hält. Denk aber geht davon aus, dass es sich bei all diesen Leiden um Defekte der neuronalen Verdrahtung handelt.



Wenn Winfried Denk der Handwerker des neuen Forschungsfelds der Connectomik ist, dann ist Sebastian Seung sein Philosoph. „Wenn man Ihnen mein Gehirn einpflanzen würde“, sagt er, den Blick herausfordernd auf sein Gegenüber gerichtet, „was, glauben Sie, käme dabei heraus: Sie mit meinem Hirn oder ich mit Ihrem Körper?“ Der Neuroinformatiker liebt solch kühne Gedankenspiele.

Seungs Büro am MIT allerdings lässt keinen Science-Fiction-Fan erwarten. Ein Kollege hat sein Fahrrad hier abgestellt. Hinter einem durchgesessenen Sofa wölbt sich Blech: das Hardtop seines alten Mercedes Cabrio, erklärt Seung, zu Hause habe er keinen Stellplatz dafür.

Unter dieser Blechhaube sitzt der Forscher und sinniert über die Simulation von Bewusstsein im Computer; er redet

von einer Zukunft, in der es möglich sein werde, Persönlichkeiten samt all ihrer Erinnerungen auf den Rechner herunterzuladen. Er spricht von Kryonik, von Transhumanismus und von Unsterblichkeit.

Wie Denk ist auch Seung Physiker, und vielleicht stammt daher sein Interesse am Grundsätzlichen. In die Hirnforschung, sagt er, sei er eher hineingschliddert. Es habe damit begonnen, dass er neuronale Netze studierte. Das war Mode damals, in den achtziger Jahren. Die Idee bestand darin, Computer nach dem Vorbild von Nervenzellen zu programmieren.

Bald aber merkte Seung, dass die Hirnforscher erschreckend wenig über dieses Vorbild wussten. Wie sollte er neuronale Netze simulieren, wenn er keine Ahnung hatte, wie diese funktionieren?

Viele Fragen, meint Seung, werden sich erst mit Hilfe des Connectomes beantworten lassen: Wie schnell, zum Beispiel, lassen sich Hirnzellen neu verkabeln? Werden während jedes Gesprächs, jedes Erlebnisses, jedes Films und jeder gelesenen Buchseite neue Verbindungen geknüpft – und falls nicht, wie sonst könnte die Erinnerung gespeichert werden?

Oder: Was, wenn es tatsächlich gelingt, sämtliche Schaltkreise im Kopf exakt ab- und irgendwann auch im Computer nachzubilden? Würde dieses digitale Konstrukt dann eigenes Bewusstsein erlan-

gen? Würde es denken, erinnern und fühlen können? Mit anderen Worten: Lässt sich so eine Art Kopie des menschlichen Geistes herstellen?

Über all diese Fragen hat Sebastian Seung ein Buch geschrieben, eine Art Manifest seiner noch jungen Fachdisziplin\*. Seine zentrale These: In der Gesamtheit aller neuronalen Verknüpfungen ist das Geheimnis der menschlichen Individualität verborgen. Alle Erinnerungen und Empfindungen, alle Ängste, Sehnsüchte und Eigenheiten eines Menschen sind hier versteckt. „Du bist dein Connectome“: So lautet die kurze Formel, auf die Seung sein Credo bringt.

Bisher allerdings steht das Forschungsfeld noch ganz am Anfang. Die Retina etwa, die Denk untersucht, ist für Seung nur ein erstes interessantes Untersuchungsobjekt. Das Netzwerk der Nervenzellen sei dort vergleichsweise geordnet, ihre Verschaltung gehorche festen, vermutlich weitgehend genetisch bestimmten Regeln.

„Die Unterschiede zur Großhirnrinde sieht man schon auf den ersten Blick“, sagt Seung. Hier sei das Gewirr der Biodrähte viel chaotischer. Hier, folgert Seung, formen Erfahrungen das Drahtgeflecht. Gerade in der scheinbaren Unordnung spiegele sich die Vielfalt der Erinnerungen, der Empfindungen und Erlebnisse wider.

Dereinst, hofft Seung, werde es den Forschern gelingen zu lesen, was im neuronalen Kabelnäuel verborgen ist. Jedes Kindheitserlebnis werde sich im Geflecht der Neuronen aufstöbern lassen.

Seung glaubt, dass die Zeit kommen werde, in der jedes Schulkind weiß, was das Connectome ist: „Es wird unser Denken über das Wesen des Menschen bestimmen“, prophezeit er.

Schon in zehn Jahren, glaubt Seung, könne das Mäuse-Connectome fertig sein. Und bis dahin werde die Technik reif sein, auch den Homo sapiens anzugehen.

Wenn dann aber erst der Schaltplan des Denkens offen zutage liegt, werde es möglich sein, ihn auch auf den Computer herunterzuladen – gleichsam als Sicherungskopie für die Ewigkeit.

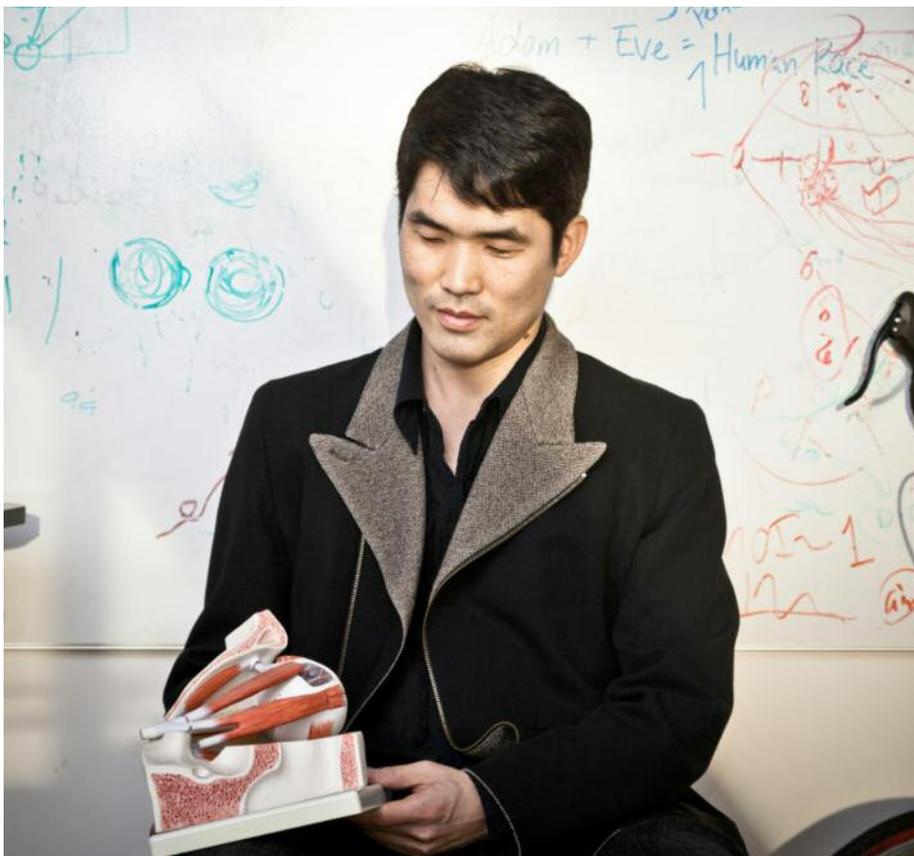
Einer seiner Kollegen, erzählt Seung, habe sich einzig und allein aus diesem Grunde dem Feld verschrieben: „Einige forschen, um das Wissen zu vermehren. Andere, weil sie einen Nobelpreis gewinnen wollen. Aber er hat das ehrgeizigste aller denkbaren Ziele: Er will die Unsterblichkeit erlangen.“

Erst künftige Generationen, meint Seung, würden in vollem Umfang begreifen, welch eine wissenschaftliche Revolution sich da gerade vollzieht: „Die Entschlüsselung des Connectomes wird einen Wendepunkt in der Menschheitsgeschichte darstellen.“

\* Sebastian Seung: „Connectome“. Houghton Mifflin, Boston; 384 Seiten; 26,99 Euro.

#### Neuroinformatiker Seung

„Wenn man Ihnen mein Gehirn einpflanzen würde, was käme wohl heraus: Sie mit meinem Hirn oder ich mit Ihrem Körper?“



RAINER HOSCH