



Simulierte Nervenzelle mit Fortsätzen und Synapsen

NEUROWISSENSCHAFT

# Hirn aus der Fabrik

Auf einem Supercomputer in der Schweiz wächst ein Geflecht aus künstlichen Nerven heran, das Zelle für Zelle einem lebendigen Gehirn nachgebildet wird. Die Forscher versprechen sich von ihrem einzigartigen Bauvorhaben erste Einblicke in das Rätsel, wie das Bewusstsein entsteht.

**H**übsch ist es anzusehen, wenn die Maschine erwacht: In milden Pastelltönen blinken die Hirnzellen auf dem Monitor. Elektrische Entladungen flackern durch den Dämmer des Nervendickichts. Das Hirn, soeben erst eingeschaltet, wirkt noch etwas verschlafen. Ein paar zarte Stromstöße auf die Synapsen, und schon ist es munter.

Ein solches Denkorgan hat es noch nicht gegeben. Es ist zusammengesetzt aus knapp 10 000 Computerchips, die sich ver-

halten wie echte Nervenzellen. Ein Teil der Großhirnrinde junger Ratten ist dafür penibel im Rechner nachgebaut worden, Zelle für Zelle, mitsamt des verzweigten Geästs der Leitungsfasern.

Die Simulation entstand an der Technischen Hochschule von Lausanne. 35 Forscher sind dort mit der Pflege des Kunsthirns beschäftigt. Es läuft auf einem der mächtigsten Superrechner der Welt; und der wird schon bald wieder zu klein sein.

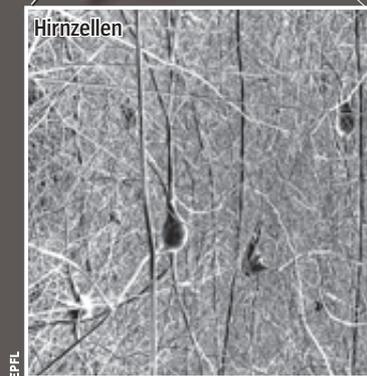
Das Ziel ist der Bau eines weit größeren Gehirns, am Ende so groß wie das des Menschen. Noch vor wenigen Jahren wäre ein solches Vorhaben verspottet worden. „Heute haben wir die Computer, die wir brauchen“, sagt der Biologe Henry Markram, 44, der Leiter des Projekts. „Und wir wissen genug, um anzufangen.“ Welche Mühsal die Gruppe auf sich lädt, ist ihm klar. „Aber wenn wir das Hirn nicht bauen“, sagt er, „werden wir nie begreifen, wie es funktioniert.“



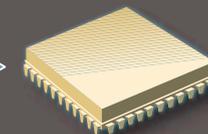
## Baustelle des Geistes

Wie der Supercomputer „Blue Brain“ ein Gehirn simuliert

Das Gehirn wird möglichst detailgetreu im Computer nachgebaut, angefangen mit 10 000 Nervenzellen der Großhirnrinde. Die Aktivitäten lebender Hirnzellen von Ratten dienten als Vorbild.



EPFL



Sämtliche Zellen mitsamt ihren vielfältigen Verzweigungen werden mit Schaltkreisen nachgebildet.



Derzeit ist in der Regel ein ganzer Prozessor nötig, um eine einzige Hirnzelle zu simulieren. Der Computer besteht bisher aus knapp 10 000 dieser Chips.

In der nächsten Ausbaustufe ab Anfang 2008 soll ein schnellerer Supercomputer ein ganzes Rattengehirn, bestehend aus 100 Millionen Zellen und 100 Milliarden Synapsen, simulieren.

DER SPIEGEL

In der Tat stürmt die Hirnforschung seit Jahren weltweit von Erfolg zu Erfolg, aber die großen Fragen sind einer Antwort so fern wie je: Wie entsteht das Bewusstsein im elektrischen Orchester der Zellen, die jede für sich besinnungslos vor sich hinfeuern? Wie kann es sein, dass im Zusammenspiel der Gene, Proteine und Botenstoffe ganz von selbst der Geistesfunke zündet?

Das Hirn von Lausanne, genannt „Blue Brain“, ist der bislang radikalste Versuch, dem Rätsel des Bewusstseins auf den Grund zu gehen. Die Idee dahinter ist verführerisch einfach: Wer sehen wolle, wie der Geist aus der Biologie entspringt, müsse diese Biologie eben nachbauen – und zwar mit eiserner Geduld – bis ins Detail, ja letzten Endes Molekül für Molekül.

Mag das erste Kunsthirn auch noch vergleichsweise simpel ausfallen, so ist es doch schon ein nützliches Modell. Was immer die Hirnforscher künftig lernen über die Funktion des Denkkorgans – hier lässt es sich gleich einbauen und ausprobieren. Die Simulation gewinnt so stetig an Detail-

treue. Und sie hat einen entscheidenden Vorzug vor dem Original: Stets können die Forscher nach Belieben verfolgen, was sich in der Maschine gerade regt.

Und regt sich schon was?

Das neugeborene „Blue Brain“ überraschte seine Erbauer vom ersten Tag an mit Eigensinn. Kaum wurde es mit elektrischen Reizen gefüttert, zeigten sich am Bildschirm seltsame Muster im Wetterleuchten der Zellen, wie sie auch von wirklichen Denkvorgängen bekannt sind. Gruppen von Neuronen begannen spontan, sich aufeinander einzustimmen, bis sie in einem gemeinsamen Rhythmus feuerten. „Das ging ganz von selbst“, sagt Markram, „und auf Antrieb.“

10 000 künstliche Nervenzellen sind in Lausanne inzwischen zusammengeschaltet; im nächsten Jahr werden schon 100 Millionen angepeilt. Zufrieden sind die Forscher auch damit nicht. Die Pläne reichen derzeit bis 2015; um diese Zeit will sich Markram mit seinen Leuten schließlich, wenn sich das Unterfangen nicht doch als zu vermessen erweist, für das Hauptziel

rüsten: ein ganzes menschliches Gehirn als Computermodell, mit seinen 100 Milliarden Zellen der schiere Aberwitz.

Skeptiker fragen sich, was es nützt, akribisch Dinge nachzubauen, von deren Sinn und Funktion man noch wenig Ahnung hat. Tatsächlich wird auf absehbare Zeit niemand sagen können, was genau in den Schaltkreisen vorgeht – außer, dass es von außen ziemlich echt aussieht. Am ehesten wüssten es die Scharen von Ratten, die in diesem Supercomputer schattenhaft fortleben. Sie haben die Vorbilder für die künstlichen Neuronen beige-steuert.

Einige tausend Rattenschädel haben die Forscher um Markram über die Jahre geöffnet. Sie zerteilten die noch lebenden Gehirne der Tiere in Scheibchen, dann richteten sie feine Sonden auf die einzelnen Neuronen. Sie belauschten die Zellen beim Feuern, und sie fingen die Antworten ihrer Nachbarn im Gewebe ab.

Solange die Hirnscheiben durchhielten, wurden sie der Reihe nach mit elektrischen Impulsen aller Art traktiert. Es waren Reizmuster, wie sie früher vielleicht im Hirn

eintreffen mochten, wenn der Labornager einen Käse roch oder vor einem Schatten erschrak. Die Zellen erregten sich denn auch wie zu Lebzeiten der Ratte; unentwegt jagten sie elektrische Ladungen durchs Nervengeflecht. Und die Messgeräte zeichneten alle Signale auf, bis zu den letzten Seufzern der Präparate.

Am Ende hatten die Forscher beisammen, was sie brauchen: das ganze Repertoire des Verhaltens Hunderter Zelltypen in jeder Lebenslage, gespeichert in endlosen Tabellen. Der Bau der digitalen Doppelgänger konnte beginnen.

Seit 15 Jahren ist Henry Markram, geborener Südafrikaner, dem Zusammenspiel der Hirnzellen auf der Spur. Die Abhörtechnik lernte er im Heidelberger Labor des Mediziners Bert Sakmann. Dem war es gelungen, einzelne graue Zellen mit feinsten Glasröhrchen anzusaugen, um sie zur Preisgabe ihrer elektrischen Signale zu bewegen. 1991 bekam Sakmann dafür den Nobelpreis. Sein Schüler Markram entwickelte die Methode weiter, bis er in der Lage war, mehrere Zellen gleichzeitig zu überwachen – heute sind es bis zu zwölf. „Das war der Durchbruch“, sagt Markram. „Seitdem wir an die Kommunikation zwischen den Zellen herankommen, ist der Weg zum künstlichen Gehirn gebahnt.“

Unterwegs erwarten die Forscher allerdings noch einige Lektionen in angewand-



**Hirnstrommessung im Labor:** *Wie viele Nervenzellen kann man abschalten?*

ter Bescheidenheit – das Denkkorgan ist nun einmal überwältigend komplex. Monate vergingen, bis die Kopie der ersten Hirnzelle fertig war zum Übersiedeln in den Computer. Millionen von Formeln stecken in dem digitalen Zellmodell; darunter geht es nicht, wenn naturidentisches Verhalten herauskommen soll. Entsprechend extrem ist der Bedarf an Rechenleistung: Derzeit ist in der Regel noch ein ganzer Prozessor nötig, um das Verhalten einer einzigen Zelle zu simulieren.

Das ist der Preis des kompromisslosen Realismus. Eine Nervenzelle ist schon allein in ihren Fähigkeiten, elektrische Signale zu verarbeiten, schier unergründlich. Auf ankommende Reize reagiert sie mittels winziger Poren, genannt Ionenkanäle, die zu Zehntausenden über ihre Oberfläche verteilt sind. Elektrisch geladene Teilchen schlüpfen durch diese Schleusen ein und aus. Im Orchester des Denkens spielt die Zelle mit, indem sie ihre Ionenkanäle öffnet oder schließt: So

läßt sie sich auf zum Feuern; so sendet sie über feine Fortsätze, genannt Axone, Signale aus zu den Nachbarn.

Auch im Computermodell sind deshalb die Ionenkanäle enthalten, sogar die Verteilung ist annähernd originalgetreu. „Alldings können wir mit dieser Genauigkeit unmöglich Millionen von Zellen in Handarbeit herstellen“, sagt Markram. Es fand sich ein Ausweg, eine gewisse Kühnheit vorausgesetzt: „Wir mussten das industrialisieren.“

Heute verfügt das „Blue Brain“-Projekt quasi über eine eigene Fabrik für künstliche Hirnmasse: Der Rechner klont die Nervenzellen fast vollautomatisch. Ganze Serien von Neuronen gleichen Typs kommen nacheinander von der Fertigungsstraße. Knapp 400 Sorten, unterschieden durch ihre Gestalt, ruhen inzwischen im Speicher, bereit – im Prinzip – für den Bau beliebig großer Denkwerkzeuge. Vor der Endabnahme werden die einzelnen Zellen jeweils noch zufallsgesteuert mit kleinen Eigentümlichkeiten im Verhalten ausgestattet, denn auch im wirklichen Hirn gleicht keine Zelle exakt der anderen.

Für Supercomputer ist das alles noch keine sonderliche Herausforderung. Die Schwerathletik beginnt, wenn es gilt, 10 000 Zellen verschiedener Gestalt naturgetreu miteinander zu verknüpfen. So entsteht ein 3-D-Puzzle von ausgesuchter Härte.

Denn jede Zelle hat wiederum etwa 10 000 Fortsätze, mit denen sie anderwärtig Anschluss sucht. Der Computer muss also sämtliche Zellen so lange im Raum drehen und wenden, bis ihre Leiterbahnen an insgesamt 100 Millionen Berührungspunkten passend verschaltet sind.

Das erste Teilstück der Simulation, so wie es jetzt in Betrieb ist, simuliert einen

---

## HIRNSIMULATIONEN MIT DEM SCHNELLSTEN SUPERCOMPUTER DER WELT.

winzigen Grundbaustein aus der Hirnrinde einer Ratte; Forscher sprechen von einer kortikalen Säule. Das ist ein dichtverstrüppter Zellverbund, etwa zwei Millimeter lang, einen halben Millimeter im Durchmesser. Aus solchen Zellsäulen setzt sich die Hirnrinde aller Säugetiere zusammen, die des Menschen eingeschlossen. Als die Evolution das Erfolgsmodell einmal erfunden hatte, sah sie offenbar keinen Grund mehr, daran noch groß etwas zu ändern.

Die kortikalen Säulen sind Allzweckwerkzeuge, für scharfes Sehen, feines Gehör und höheres Rasonieren gleichermaßen geeignet. „Wir sehen darin eine Art Miniaturgehirn“, sagt Markram. „Schon mit nur einer solchen Säule im Kopf könnten wir durchaus Umwelteindrücke verar-

beiten, wenn auch nur sehr verschwommen.“

Im Kunsthirn von Lausanne fehlt den Zellen noch das chemische Innenleben. Sie simulieren den Reichtum des elektrischen Signalverkehrs, nicht aber die molekularen Maschinen, die ihn hervorbringen: In ihrem Innern gibt es keine Proteine, die sich in der echten Zelle zum Beispiel zu Ionenkanälen zusammensetzen. Und schon gar nicht gibt es die Gene, die angeschaltet werden, um diese Proteine herzustellen.

„Die Moleküle bauen wir später ein“, sagt Projektmanager Felix Schürmann. „In den nächsten Monaten sind wir vor allem mit der Feinabstimmung des Modells beschäftigt, das wir schon haben.“ Immer wieder testen die Forscher ihre Schaltkreise, und sie gleichen deren Verhalten ab mit den Ergebnissen der Rattenexperimente. Erst wenn keine nennenswerten Unterschiede mehr auftreten, ist die Simulation bereit für die nächste Ausbaustufe.

Ab Anfang nächsten Jahres steht das komplette Gehirn einer Ratte auf dem Plan. Schon dafür reicht der jetzige Rechner nicht mehr aus. Die Forscher benötigen dann einen neuen Supercomputer, den schnellsten der Welt. Und damit ist es nicht lange getan: Hurtig soll es bald hinaufgehen auf der Leiter der Lebensformen. „Wir



DANIEL RHIS / PINKSI

**Hirnforscher Markram, simulierte Neuronen:** *Überwältigend komplexes Denkorgan*

bauen ein Katzenhirn, ein Primatenhirn, und am Ende steht der Mensch“, sagt Markram, als wäre daran nicht mehr vernünftig zu zweifeln. Und jedes Mal wird wohl ein Supercomputer der jeweils neuesten Generation fällig werden.

Für die Maschinerie des „Blue Brain“-Projekts war von Anfang an der Computergigant IBM zuständig. Die Firma bringt sich schon länger als Lieferant für wissenschaftliches Großrechnen in Stellung. Es lockt die Aussicht auf einen machtvoll anschwellenden Markt. Die Hirnsimulation in Lausanne ist da eine willkommene Gelegenheit, Erfahrungen beim Bewältigen furchterregender Anforderungen zu sammeln.

Die Forscher der „Blue Brain“-Gruppe tüfteln bereits mit IBM-Fachleuten an den Plänen für den schier unvorstellbar schnellen Rechner, der sich einst am Menschenhirn versuchen soll. Mit heutiger Technik wäre das ein absurdes Unterfangen. Der Computer, auf dem eine solche Simulation laufen könnte, wäre ein Monstrum von der Ausdehnung mehrerer Fußballfelder. „Und wir hätten eine Stromrechnung von drei Milliarden Dollar im Jahr“, sagt Markram. Wenn er allerdings den rasanten Leistungszuwachs in der Chiptechnik einkalkuliert, sieht die Sache schon anders aus: „Im Jahr 2015 wären wir bei einem Energieverbrauch angelangt, den wir uns durchaus leisten können.“

Die Frage ist nur: Lohnt sich der ganze Aufwand? „Die Hälfte der Fachkollegen dürfte unser Projekt für sinnlos halten“, meint Markram. „Sie sagen, das Gehirn sei viel zu komplex, als dass ein Nachbau gelingen könnte.“ In der Tat gibt es fast unendlich viele Möglichkeiten, auch nur ein paar Millionen Hirnzellen miteinander zu verschalten – wie sollte sich jemals entscheiden lassen, welche Variante ein Be-

wusstsein hervorbringen kann und welche nicht? „Das ist ein fundamentaler Irrtum“, sagt Markram. „Die theoretische Zahl interessiert uns gar nicht. Die Evolution hat ja eine biologische Lösung gefunden.“

Und dieser Lösung, so glauben die Forscher in Lausanne, gilt es Zug um Zug näher zu kommen: Je mehr Detailwissen über die Hirnbiologie in die Simulation eingeht, desto einfacher wird die verbleibende Arbeit. Denn all die theoretisch möglichen, biologisch aber unsinnigen Hirnvarianten fallen der Reihe nach weg; übrig bleiben die guten, die womöglich zur Herausbildung des Denkens fähig sind.

Das ist eine gewagte Wette auf die Zukunft. Der „Blue Brain“-Gruppe mangelt

### IRGENDWANN KÖNNEN DIE FORSCHER IN DER GROSSHIRNRINDE HERUMFLIEGEN.

es weder an Mitteln noch an Pionierstolz. Im Rang vergleichen die Forscher ihr Vorhaben durchaus mit dem Genom-Projekt. So wie dieses die genetische Mitgift des Menschen entschlüsselt hat, steht in Lausanne nun, wie sie meinen, die biologische Grundausstattung seines Denkvermögens auf dem Plan.

Ins Hirnmodell fließt, wenn alles gutgeht, nicht nur die Forschung vor Ort ein. Zwar arbeiten allein am Brain Mind Institute, dem Markram als Co-Direktor vorsteht, rund 125 Köpfe. Doch ist der Einzugsbereich im Idealfall die ganze Welt: „Wir haben in den Neurowissenschaften inzwischen rund 35 000 Veröffentlichungen im Jahr“, sagt Markram. „Kein Forscher kennt auch nur ein Prozent davon. Ohne ein Modell, in dem das verstreute Wissen wieder zusammengeführt wird, kommen wir überhaupt nicht mehr weiter.“

Wenn das „Blue Brain“ einmal verlässlich in Gang ist, sind Fachkollegen von überallher eingeladen, neue Erkenntnisse und Theorien daran zu erproben. Zum Projektlabor gehört auch eine Art Hirnkino, wo sich auf großer Leinwand die Simulation in vollem Lauf betrachten lässt. Dort können die Forscher einzelne Zellverbände herausfiltern und zusehen, wie Kaskaden von Erregungsmustern, stürzenden Dominosteinen gleich, durchs Gewebe wallen. Sie können in der Großhirnrinde herumfliegen oder in Zeitlupe beäugen, wie Millionen von Ionenkanälen sich ordnungsgemäß öffnen und schließen.

Der Hauptzweck des Kunsthirns aber soll sein, dass es Experimente neuen Typs möglich macht. Zum Beispiel: Was passiert, wenn man bestimmte Zelltypen beschädigt, von denen noch niemand weiß, wofür sie überhaupt gut sind? Oder: Wie viele Zellen kann man abschalten, bis das Verhalten der Überlebenden ringsum wunderbarlich wird oder gar der ganze Schaltkreis zusammenbricht? Ähnliches geschieht bekanntlich in den Gehirnen von Epileptikern oder Alzheimer-Patienten. Von außen ließ sich bislang nur ein schemenhaftes Bild der Vorgänge in ihrem Kopf gewinnen. Im virtuellen Schädel der Simulation dagegen fliegen die Forscher einfach zu den Krisengebieten.

Solche Studien sind nur denkbar in einem Modell, das die Biologie exakt widerspiegelt. Die sogenannten neuronalen Netze dagegen, an denen andere Forscher seit Jahrzehnten tüfteln, sind ganz anderer Natur. Da geht es zwar auch um Computerprogramme, die sich so ähnlich verhalten wie ein Gehirn; aber wie sie das zuwege bringen, ist ziemlich egal. Wer nach diesem Prinzip eine Kuh bauen wollte, wäre zufrieden mit einem Milchautomaten, der Muh macht und ab und zu einen Fladen fallen lässt. „Damit verstehen Sie die Biologie nicht“, sagt Markram.

In Lausanne geht es um die wirkliche Kuh. „Unser oberstes Gebot ist: Wir dürfen niemals tricksen, nur damit das richtige Ergebnis herauskommt“, sagt Projektleiter Schürmann. „Läuft in der Simulation etwas verkehrt, haben wir nur eine Möglichkeit, sie auszubessern, indem wir neues biologisches Wissen einbauen.“

Eines Tages werden die Forscher ihrem Kunsthirn vielleicht sogar ein Türchen zum wahren Leben öffnen. Technisch ist das kein Problem: „Wir können einfach einen Roboter an das Hirnmodell anschließen“, sagt Markram. „Dann sehen wir, wie es auf reale Umgebungen reagiert.“ Freigang wird aber erst gewährt, wenn „Blue Brain“ sich im Laborbetrieb ohne Tadel zeigt. Bis dahin ist der Input nicht übermäßig unterhaltsam: immer nur Standardreize aus dem Experimentierhandbuch.

MANFRED DWORSCHAK