

**COPYRIGHT**

**Dieses Manuskript ist urheberrechtlich geschützt. Es darf ohne Genehmigung nicht verwertet werden. Insbesondere darf es nicht ganz oder teilweise oder in Auszügen abgeschrieben oder in sonstiger Weise vervielfältigt werden. Für Rundfunkzwecke darf das Manuskript nur mit Genehmigung von Deutschlandradio Kultur benutzt werden.**

# Neuromorphe Computer

## oder: Das Hirn in einer Box

von Maximilian Schönherr

Die Experten im Interview:

- Karlheinz Meier, Professor am Kirchhoff-Institut für Physik an der Universität Heidelberg, Koordinator des Human Brain-Projekts der EU zum Aufbau eines neuromorphen Computers. [http://cordis.europa.eu/fp7/ict/programme/fet/flagship/doc/conf-nov2011-05\\_en.pdf](http://cordis.europa.eu/fp7/ict/programme/fet/flagship/doc/conf-nov2011-05_en.pdf)
- Katrin Amunts, Professorin am Institut für Neurowissenschaften und Medizin / Strukturelle und funktionelle Organisation des Gehirns, Forschungszentrum Jülich. [http://www.fz-juelich.de/inm/inm-1/DE/Home/home\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/inm/inm-1/DE/Home/home_node.html)
- Kwabena Boahen, Associate Professor und Leiter des „Brains in Silicon“-Projekts an der Universität Stanford. <http://www.stanford.edu/group/brainsinsilicon/>

Sonstige Experten im O-Ton:

- Marvin Minsky, Pionier der Künstlichen Intelligenz-Bewegung
- Henry Markram, Hirnforscher im Blue Brain-Projekt

Ich bin mit spitzen Fingern an diese Sendung herangegangen, und das liegt daran, dass der Nachbau von Gehirnen in Computern eine lange Tradition mit vielen leeren Versprechungen hat. Es fing ganz nett an: Der englische Medizin-Nobelpreisträger Edgar Adrian begriff in den 1920er Jahren die Nervenzellen als Schalter für zwei Zustände; das klang schon fast digital. Der Mathematiker Alan Turing dachte zehn Jahre später darüber nach, ob Rechenmaschinen und Gehirne vielleicht den gleichen logischen Prinzipien folgten?

Soweit war das romantisch bis futuristisch. Richtig Biss aber bekam die Sache in den 1980er Jahren, als die Rechenleistung von Computern stark zunahm. Forscher wie der Amerikaner Marvin Minsky hielten es nur noch für eine Frage der Zeit, bis man nicht nur Denkprozesse, sondern Bewusstsein, Geist und Seele digital nachbauen, speichern und sogar an Folgegenerationen weitergeben kann. Regierungen versenkten Unmengen an Geldern in diesen Vorhaben. Minsky gab inzwischen einen Teil seiner Versprechungen einer „Künstlichen Intelligenz“ auf, aber er begreift noch heute das Gehirn als Maschine, wie in diesem Interview vor einigen Jahren in der BBC:

**Marvin Minsky, BBC Radio 3, 2004**

<http://www.bbc.co.uk/radio3/twentyminutes/pip/i4dhz/>

„Wenn Sie sich Neugeborene oder Tiere ansehen, am Anfang ihres Lebens kennen die Aktivitätszustände wie Hunger, Angst, Schmerz. Ich glaube, hier sind Teile einer Maschine am Werk. Das Erwachsenehirn ist eine fest verdrahtete Maschine aus 400 Teilen, und wenn man sie alle zusammen einschalten würde, gäbe es einen großen Stau.“

So einfach ist das also, 400 Hirnbereiche, fest verdrahtet, und wenn man nicht aufpasst, ein Stau. Über Demut gegenüber der Natur kann man streiten, die muss man nicht aufbringen, dem Gehirn ist es eh egal, was man darüber denkt (wenn man überhaupt übers Denken nachdenken kann). Aber Bewusstsein mit einer fest verdrahteten Maschine zu vergleichen, ist eine vielleicht typisch amerikanische, aber trotzdem unzulässige Vereinfachung, eine Irreführung der Öffentlichkeit.

Deswegen meine Skepsis gegenüber den neuen Forschungsprojekten, die jetzt, aus dem Boden schießen und alle – ich hielt es fast für dreist – das Gehirn nachbauen wollen und sich trauen, dafür auch noch Gelder zu beantragen.

Beim genaueren Hinsehen wurde es aber doch interessant. Zunächst einmal fiel auf, dass ein Computergroßkonzern, der sein Geld eigentlich nicht in esoterischen Vorhaben steckt, nämlich IBM, viel Geld in ein Projekt namens „Blue Brain“ steckt – sinngemäß Blaupause, also Kopie des Gehirns. Einer der Initiatoren von Blue Brain ist der Brite Henry Markram, hier bei einem Vortrag in Kalifornien:

**Henry Markram, TED-Konferenz 2009**

[http://www.ted.com/talks/henry\\_markram\\_supercomputing\\_the\\_brain\\_s\\_secrets.html](http://www.ted.com/talks/henry_markram_supercomputing_the_brain_s_secrets.html)

„Ich hoffe, ich konnte Sie zumindest ansatzweise überzeugen, dass es nicht unmöglich ist, das Gehirn im Computer nachzubauen. Wir schaffen das in den nächsten 10 Jahren.“

Wieder ein sehr großes Versprechen, das Hirn im Rechner in 10 Jahren nachzubauen. Aber Markram ist kein Informatik-Traumtänzer, sondern Hirnforscher; er guckt sich dauernd Hirne an

und scheint zu spüren, dass in dieser unendlichen Menge von immer gleichen, wenn auch nicht ganz gleichen Nervenzellen etwas Systematisches steckt, dem er auf die Schliche kommen will.

Henry Markram arbeitet in der Schweiz, an der Eidgenössischen Technische Hochschule Lausanne, und hat dort ein eigenes Institut, das „Brain Mind Institute“ heißt, Hirn/Geist. Klingt fast wie Minskys „Artificial Intelligence Institute“ am MIT in Boston.

IBM lagerte kürzlich einen Teil des Blue Brain-Projekts aus, handelte mit anderen Firmen einen Deal mit dem US-Militär aus, und dort finden nun mehr oder weniger im Geheimen Forschungen statt, die auch nicht weniger vorhaben, als das Gehirn in Elektronik abzubilden. Dieses Forschungsprogramm beim US-Militär DARPA heißt „Synapse“, so wie die Verbindungen zwischen den Nervenzellen.

Neben Blue Brain und Synapse gibt es noch ein Projekt mit demselben Ziel. Es heißt ganz einfach Menschliches Gehirn Projekt – „Human Brain Project“ und vereinigt 18 Forschergruppen aus 10 europäischen Ländern.

Eine der zentralen Figuren beim Human Brain Projekt ist der Karlheinz Meier, Professor am Kirchhoff-Institut für Physik an der Universität Heidelberg.

### **Karlheinz Meier**

Ich arbeite zusammen mit Henry Markram, der ein Neurowissenschaftler ist und an der EPFL Lausanne ein recht beachtliches Programm aufgezogen hat. Er ist zum einen messender Neurowissenschaftler, jemand, der tatsächlich Zellen in neuronalen Systemen ausmisst, der die Daten dann verwendet, um Simulationen zu machen, Simulationen auf sehr hochleistungsfähigen Rechnern, also einem *Blue Gene P* IBM Rechner, und er nimmt diese neuronalen Schaltkreise, um sie zu simulieren.

*Gucken Sie ihm über die Schulter?*

Ja, zum einen sehe ich die Messungen, die er da macht. Das sind im Prinzip mikroskopische und elektrische Messungen, die er an neuronalen Zellen vornimmt, also an Neuronen und Synapsen.

*Die leben?*

Nein, nein, das sind Präparate, die gewissermaßen in der Petrischale gemessen werden. Die Daten werden dann in Datenbanken eingespeist und verwendet, um diese Simulationen zu machen.

Karlheinz Meier geht in Markrams Labor zwar ein und aus, er ist scharf auf Markrams bioelektrische Messdaten, aber er macht dann etwas ganz anderes mit den Daten als Markram bei Blue Brain. Blue Brain nutzt Supercomputer-Technik, um Hirnfunktionen zu simulieren, Meier nicht.

### **Karlheinz Meier:**

Simulation bedeutet, dass man Gleichungen numerisch löst, dass man also beispielsweise Prozesse im Universum, die Art und Weise, wie Galaxien sich bewegen, dass man Gesetze der Natur verwendet – das Gravitationsgesetz und viele andere. Aber aufgrund der

Tatsache, dass es sehr viele Galaxien sind, kann man das ganze nicht analytisch lösen, sondern stellt Differentialgleichungen auf, die man zahlenmäßig löst.

Das kann man auch mit dem Nervensystem machen. So, wie es viele Galaxien gibt, gibt es auch viele Neurone und Synapsen im Gehirn. Die typischen Zahlen sind: 10 hoch 11, also eine 1 mit 11 Nullen für Neurone und etwa 10.000 Mal so viele synaptische Verbindungen. Das kann man nicht mehr analytisch lösen, aber man kann versuchen, diese Differentialgleichungen numerisch, also, indem man wirklich Zahl für Zahl vorgeht, sich überlegt, was passiert mit diesem System, wenn es sich mit der Zeit entwickelt, auf Computern zu lösen.

Das ist eine durchaus ehrenwerte und gute Methode. Sie hat das Problem, dass sie sehr zeitaufwendig ist. Also, selbst die kleinen Systeme, die Markram jetzt in Lausanne simuliert, da laufen die Simulationen etwa einen Faktor 100 langsamer als die Vorgänge in der Natur.

*Und kosten mehr Energie.*

Und kosten sehr viel Energie, das ist richtig. Also selbst dieser kleine Rechner, der dort verwendet wird, mit 8.000 Knoten, 8.000 Prozessoren, der hat eine Leistungsaufnahme von 100 Kilowatt. Ja, das ist schon deutlich mehr als, sagen wir mal, einige Einfamilienhäuser, die man haben muss, um zum Beispiel dieses System von 10.000 Neuronen – also ein relativ kleines System – zu simulieren.

Wir wollen nicht simulieren, sondern wir wollen elektronische Kopien von Zellen herstellen – was ein großer Unterschied ist.

## **O-Ton Brainscales-Labor Heidelberg**

So klingen einige Hunderttausend Hirnzell-Kopien. Vielmehr: ihre Lüfter, das, was die Elektronik kühlt, hier in Karlheinz Meiers Brainscales-Labor an der Universität Heidelberg. Die Maschine, die hier steht, ist kein Computer im klassischen Sinn; sie führt nämlich keine Berechnungen durch. Sie ist ein neuromorphes Gerät, Neuro = die Nerven, Morph = die Gestalt. Die Idee eines neuromorphen Computers, der völlig anders funktioniert als unser PC zuhause oder im Rechenzentrum, stammt von dem amerikanischen Informatiker Carver Mead aus den 1980er Jahren.

## **Karlheinz Meier:**

Also ein Neuron kann man sich in einem extrem vereinfachten Bild vorstellen als Kondensator im physikalischen Sinn. Da kann man Ladung einfüllen, und die bleibt dann auch drin, normalerweise, es sei denn, man gibt dem Kondensator eine Möglichkeit, sich zu entladen. Das sind so typische Vorgänge, die auch in einer Zellmembran vor sich gehen.

Es gibt zwei Arten, das zu behandeln. Man kann es berechnen, oder man kann einfach einen Kondensator in die Hand nehmen und eine Schaltung daraus aufbauen, dann hat man auch ein Neuron. Das muss man nicht berechnen, sondern das ist wirklich ein physikalischer Kondensator, der sich entlädt.

Seit Carver Meads Idee vor 30 Jahren sind zwei Dinge passiert: Man hat viel mehr Daten aus dem Gehirn gewonnen, und: Die Elektronik ist schön klein geworden.

### **Karlheinz Meier:**

Wenn Sie wirklich das Konzept verfolgen wollen, ein Abbild – deswegen nennt man es auch neuromorph – neuronaler Systeme in einem synthetischen System zu realisieren, dann müssen Sie zur Mikroelektronik greifen, da sind die Kondensatoren kleiner. Das heißt, die Mikroelektronik bietet uns die Möglichkeit, solche Systeme nachzubauen. Die rechnen dann nicht mehr, sondern es sind physikalische Modelle, die sich einfach genau so verhalten wie die Natur.

Computer, wie wir sie gewohnt sind, brauchen, um zu funktionieren, Programme - Software. Das Betriebssystem ist ein solches Programm, der Webbrowser ein anderes. Ein Programm ist eine starre Abfolge von Befehlen, und selbst Roboter, die so tun, als könnten sie flexibel handeln, haben dieses scheinbar flexible Handeln fest einprogrammiert, sie funktionieren deterministisch, man kann exakt vorhersagen, welchen Fuß der Roboter zuerst heben wird, wenn er an der Treppenstufe anstößt, wenn man alle Randbedingungen kennt.

Man nennt einem Computer, der nach diesem außerordentlich erfolgreichen Bauprinzip arbeitet, nach dem österreich-ungarischen Mathematiker John von Neumann eine „von Neumann-Maschine“.

Von Neumann sprach von einem Speicher und einem Prozessor, die beide voneinander getrennt sind und verschiedene Aufgaben haben. Die Natur kennt weder Prozessoren, noch Speicher; wenn man dieses Bild unbedingt übertragen will, dann steckt in den Nervenverbindungen, den Synapsen, beides, sie rechnen und speichern sozusagen. Während die von-Neumann-Maschine, also z.B. unser Smartphone, nach einem zentralen Takt eine Vorgabe nach der anderen abarbeitet (und am Schluss vielleicht wieder von vorne anfängt), scheint unser Gehirn laufend neue Kombinationen aus Zeit, Raum, Objekten, Vorstellung zu erschaffen und zueinander in Beziehung zu setzen. Im strengen Hintereinander-Abarbeiten ist es ziemlich schlecht. Oft wissen wir ja nicht einmal, ob wir etwas am Dienstag oder am Mittwoch getan haben.

Unser Gehirn hat also auch kein Betriebssystem, man lädt kein Programm in den Hirnarbeitsspeicher, um sich an etwas zu erinnern oder um einen Ball zu kicken. Diese Möglichkeiten sind immer da, immer möglich, und wenn wir am Morgen wach werden, fährt nicht unser innerer Rechner hoch, und er lädt auch keine Software zum Tischdecken.

Die Struktur unseres Gehirns kennen wir relativ gut, die Funktionsweise fast gar nicht. Aber eins ist klar: Mit der von Neumannschen Maschine hat es nichts zu tun.

Neurone feuern, senden, wie sich entladende Kondensatoren, Aktionspotentiale aus, die Physiker sehen sie als Spikes oder als Peaks, als nadelscharfe Spitzen im elektrischen Spektrum der Hirnzelle, immer gleich hoch. Mit seinem neuromorphen Computer kann Karlheinz Meier Nervenzellen anregen, also Kondensatoren mit Ladung speisen, und die Maschine sagt dann voraus, wann die Zelle – der Kondensator – seine Spikes aussendet.

### **Karlheinz Meier:**

Und jetzt muss man sich überlegen: Wo steckt eigentlich die Information in diesem Netzwerk, wenn nicht in der Pulshöhe der Spikes? Nach allem, was man heute weiß, steckt sie vor allem in zwei Dingen: In der Adresse, das heißt, wo ist der Spike eigentlich hergekommen? Aber auch: zu welcher Zeit? Die Zeit ist offensichtlich ein ganz ganz wichtiger Parameter.

Durch verfeinerte Messmethoden hat die Hirnforschung in den letzten Jahren über diese Zeitabläufe fast sensationelle Erkenntnisse gewonnen, die sich für den neuromorphen Computer geradezu wunderbar eignen und wo sich herkömmliche Rechner sehr schwer tun. Dazu gehört, dass bei der Vermittlung von Impulsen im Gehirn Kausalitäten geprüft werden, also Fragen nach dem Zusammenhang: Woher kommt dieser Impuls? Wann wurde er wohin geschickt? Macht das Eintreffen hier Sinn? Wenn dieser Impuls Sinn macht, wenn er kausal ist...

### **Karlheinz Meier:**

... dann wird die Wichtigkeit der Synapse, das Gewicht, wie man sagt, etwas hochgeschoben. Wenn es einen a-kausalen Zusammenhang gibt, dann wird die Synapse quasi bestraft, und das Gewicht geht wieder nach unten.

*Seit wann weiß man das?*

Das weiß man etwa seit den 1970er Jahren, auch Markram hat selbst sehr stark daran gearbeitet. Die Funktion, was man alles im Netzwerk damit machen kann, beginnt man aber jetzt erst zu verstehen. Es ist offensichtlich ein Prozess, der zum Lernen in solchen Netzwerken, wie man sagt: zum nicht überwachten Lernen beiträgt.

Das heißt, ich stelle mir vor, wenn wir Eigenschaften aus der Biologie übernehmen, seien sie auch nicht komplett, dann ergeben sich immer interessante Eigenschaften, was die Leistung der Rechner angeht.

Das heißt, man baut die neuromorphen Maschinen nach Bedarf um. Wenn die Neurologen säulenartige Anordnungen von Neuronen feststellen, ordnet man eben Kondensatoren in der Mikroelektronik entsprechend in einer Linie um.

Und was der neuromorphe Computer dabei quasi mit links erledigt, ist für den klassischen Supercomputer ein großes Problem: die Zeit.

### **Karlheinz Meier:**

Da müssen Sie die Zeit quasi in lauter kleine Häppchen aufteilen, in kleine Zeitschritte, die klein genug sind, damit all die Dinge genau genug berechnen können. Und das ist einer der Gründe dafür, dass diese sehr komplexen Netzwerke, die viele Verbindungen haben, auf den Computern sehr langsam laufen. Die laufen nicht einmal so schnell wie die Biologie, sondern langsamer als die Biologie, also typisch um einen Faktor 100 langsamer.

Jetzt stellen Sie sich vor, Sie wollen einen Lernprozess untersuchen. Lernprozesse im wirklichen Leben brauchen Stunden, Tage oder Monate; dann brauchen Sie 100 Tage, um einen Tag zu simulieren. Wenn Sie dieses Experiment wiederholen, hundert Mal, was Sie ja vielleicht tun müssen, weil Sie nicht genau wissen, wie die Parameter des Netzwerks

sind, dann brauchen Sie 10.000 Tage, um dieses Experiment zu machen. Sie sehen, das wird einfach irgendwann unpraktisch.

Die elektronischen Systeme, die wir bauen, haben ganz interessante Eigenschaften. Beispielsweise haben die Kondensatoren kleine Werte, kleine Speicherfähigkeit. Woran liegt das? Der Grund ist ein ganz simpler, es liegt einfach daran, dass sie so klein sind. Wenn Sie Mikroelektronik verwenden, dann sind die Kondensatoren klein. Und das heißt, die typischen Zeitkonstanten, mit denen Kondensatoren aufgeladen werden und sich wieder entladen, sind extrem kurz.

*Kürzer als in der Natur?*

Kürzer als in der Natur. Jetzt kann man fragen, ist das eigentlich ein Problem? Nein, es ist kein Problem, wenn man dafür sorgt, dass alle Zeitkonstanten in dem ganzen System auch um genau diesen Faktor verkürzt sind. Zeitraffer.

Und das ist ein ganz wichtiger Aspekt, weil die Frage ja ist, wer bestimmt eigentlich, wie schnell so ein neuronales System läuft? Wenn man noch mal zu konventionellen Computern zurückkehrt, dort ist es im Wesentlichen so etwas wie die Taktfrequenz. Sie können im Prinzip ein Programm schneller laufen lassen, indem Sie einfach die Taktung erhöhen. In Ihrem Gehirn können Sie das nicht tun. Da gibt es keinen Quarz, der die Taktfrequenz festlegt, sondern die Geschwindigkeit wird durch die Eigenschaften der Komponenten bestimmt, der Neurone, der Synapsen und der Verbindungen dazwischen.

Aber lassen Sie mich noch einmal zurückkommen auf die charakteristischen Zeiten. Die Systeme, die wir im Moment bauen, haben einen Zeitrafferfaktor von 10.000, 10 hoch 4. Das heißt, ein Tag dauert bei uns nicht 100 Tage, auch nicht einen Tag, sondern 10 Sekunden. Das heißt, Sie können die Dynamik des Systems, das Lernverhalten 10.000-mal gerafft anschauen. Wenn Sie also einen Tag simulieren – oder hier sollte man besser sagen „emulieren“ – wollen, dann müssen Sie nur 10 Sekunden warten, und auch 100-mal können Sie dieses Experiment problemlos wiederholen.

Das heißt, die Nutzbarkeit dieser beschleunigten Operation solcher neuromorphen Systeme ist im wesentlichen da, um zeitabhängige Effekte anzuschauen, also Lern-, Entwicklungs- und unter Umständen sogar Evolutionsprozesse, die man auf diese Art und Weise synthetisch beobachten kann.

Lernen, wie das Gehirn lernt, wie flexibel es reagiert, wie es sich entwickelt. In diesem Licht betrachtet macht das Human Brain Projekt Sinn, auch das, was das US-Militär jetzt unter dem Namen Synapse erforscht:

#### **Zitat DARPA:**

„Synapse ist ein Forschungsprogramm zur Entwicklung einer elektronischen neuromorphen Maschinentechologie, die die Auflösung von biologischen Systemen hat. Einfacher ausgedrückt, ist es der Versuch, einen neuen Computertypus zu bauen, der in seiner Form und Funktion dem Gehirn von Säugetieren ähnelt. Solche künstlichen Gehirne würde man in Robotern einsetzen, deren Intelligenz auf dem Niveau von Mäusen, Katzen und letztendlich Menschen wären.“

Fassen wir zusammen: Die alte KI-Forschung der „Künstlichen Intelligenz“ ist tot.

Mit den Methoden des Supercomputing kann man die Unmengen an Daten, die die Hirnforschung zurzeit abwirft, simulieren, aber es gibt Probleme mit den Modellen, also der Software, und mit der Dauer dieser Simulationen. Sie dauern viel zu lang.

Der neuromorphe Ansatz, ganz andere Computer zu bauen, statt mit Software mit Kondensatoren zu arbeiten, die 1:1 Nervenzellen und Synapsen darstellen, scheint für die Hirnforschung viel versprechend zu sein, es sieht aus, als seien neuromorphe Maschinen dem Gehirn zumindest architektonisch näher, ähnlicher. Das Human Brain Projekt der EU beinhaltet beide Ansätze.

Beide Ansätze haben einen Defekt. Wenn man der Analogie erliegt, dass Nervenzelle = elektrisch = Kondensator = Mikroelektronik ist, übersieht man nämlich, dass das Gehirn eben keine rein elektrische Fabrik ist, sondern auch, vielleicht sogar vor allem, eine chemische. Wenn elektrische Impulse vom Auge bis ins Sehzentrum im hinteren Hirnbereich funken (übrigens im Verhältnis zu Computern ziemlich langsam), passieren laufend biochemische Prozesse – in der Nervenbahn, in den Synapsen, in den Neuronen. Zellen stehen miteinander elektrisch und chemisch in Verbindung. Ein elektrisches Eingangssignal, ein Spike, der bei einer Zelle auftrifft, entscheidet nicht allein darüber, was die Zelle damit tut, ob daraus wieder ein elektrisches Signal wird, das die Zelle aussendet. Die chemischen Abläufe in der Zellmembran können das verhindern, oder verstärken.

Die Chemie spielt in den Computernachbauten, welcher Art auch immer, keine Rolle. Ist das korrekt?

#### **Kwabena Boahen:**

Der Übergang zwischen dem Ausgang eines Neurons und dem Eingang eines anderen Neurons heißt Synapse.

... erklärt dazu Kwabena Boahen, Bioinformatiker an der Universität Stanford in Kalifornien.

#### **Kwabena Boahen:**

Und tatsächlich wird, wenn der Impuls das Ende des Output-Kanals erreicht, eine Chemikalie freigesetzt. Der Input des nächsten Neurons spürt diese Substanz und wandelt dieses Signal in Elektrizität um. Es ist also ein chemischer Botenstoff beteiligt. Aber wir halten den in unserem Computermodell nicht für so wichtig, wir tun einfach so, als gäbe es die Chemie nicht. Wenn das Gehirn sowieso immer von elektrisch zu chemisch und zurück zu elektrisch geht, können wir uns fürs erste auf die elektrischen Signale konzentrieren.

Kwabena Boahen. Er entwickelt jetzt übrigens Nervenprothesen. Mit seinem neuromorphen Chip nimmt er die Signale aus dem Gehirn auf, die eigentlich dazu da sind, den fehlenden Arm zu steuern. Der Chip wandelt sie in Impulse um, die den künstlichen Arm bewegen.

#### **Kwabena Boahen:**

Bisherige Ansätze arbeiten mit klassischer Computertechnik, die viel zu viel Energie für ihre Berechnungen benötigen. Wir werden mit unserem neuromorphen Chip dasselbe tun, bloß mit minimaler Energie. Man wird ihn samt Batterie implantieren können.

In den letzten Wochen haben Hirnforscher phantastische Bilder veröffentlicht, die das Innere des Gehirns durchsetzt mit feinsten Fasern zeigen. Es sind die Verbindungen zwischen den Neuronen, und sie sind so fein, dass man neue Techniken der Visualisierung benötigte, um sie überhaupt sichtbar zu machen. Entscheidend beteiligt an der Entstehung dieser Bilder ist Katrin Amunts, eine der führenden deutschen Hirnforscherinnen. Sie leitet das Institut für strukturelle und funktionelle Organisation des Gehirns am Forschungszentrum Jülich.

### **Katrin Amunts:**

Das Gehirn besteht aus ganz vielen Arealen, vielleicht 200, wir wissen es heute noch nicht so genau, und jedes dieser Areale hat eine bestimmte Funktion zu verfolgen, die wir für die meisten Areale auch noch gar nicht so präzise und genau sagen können. Das heißt, das erste, um überhaupt Hirnfunktionen zu verstehen, ist, dass man diese räumliche Zuordnung erreicht.

Dazu kommt eine zeitliche Zuordnung: Das Gehirn ist ja kein Rechner, der sich nicht verändert, sondern das Gehirn ist ja eine Struktur, die sich zeitlebens, aber auch in Schwankungen von Tag und Nacht oder noch kürzer verändert, plastisch anpasst, sich aber auch bei Erkrankungen in Funktion und Bauweise verändert.

*Die Informatiker lieben Sätze, wie Sie sie gerade gesagt haben: Wir vermuten 200 Regionen oder ein paar mehr oder weniger. Die nehmen sich jetzt, sagen wir mal, die Region 177. Was können sie denn da simulieren, und kann man überhaupt Region 177 isoliert betrachten? Kann man damit überhaupt etwas anfangen, sie ist ja, denke ich mal, total vernetzt?*

Ja klar ist die Vernetzung wichtig. Aber das Gehirn ist eben kein Netzwerk, was aus völlig uniform aufgebauten Knoten besteht, sondern es besteht aus spezialisierten Knoten, die eben auch eine ganz spezifische Verbindung aufweisen. Und wir sehen, dass sich diese verschiedenen Areale – 200 oder vielleicht mehr oder weniger – eben nicht nur in der zellulären Verteilung, in dem Muster, wie die Zellen angeordnet sind, der Architektur unterscheiden, sondern sie unterscheiden sich eben auch in ihrer molekularen Organisation, in ihrer Funktion, in ihrer Konnektivität, also in ganz ganz vielen Fragestellungen.

Katrin Amunts bittet mich, neben ihr Platz zu nehmen und führt mich an ihrem Computer auf eine Art Spaziergang durch das Gehirn, und innerhalb dieser wenigen Minuten wird mir klar, dass aus dem Traum der Informatiker, mit neuen oder alten Rechnertypen, mit Supercomputern oder neuromorphen Maschinen das Gehirn irgendwie in den Griff zu bekommen, nichts wird. Auch in zehn Jahren nicht.

Wer sich das Hirn als weiße und graue Masse vorstellt, oder als rein elektrisches Ding, sollte diesen Blick ins Innere wagen, betrachten, wie komplex und dicht und unterschiedlich diese Strukturen sind, wie fein diese Millionen an Fasern verlaufen. Eine Leber oder ein Schulterblatt sehen dagegen ausgesprochen homogen, aufgeräumt, schlicht aus.

### **Katrin Amunts**

Wir haben vor 10 Jahren gut rechnen können mit ganz normalen PCs. Damit waren für uns keine großen zeitlichen Beschränkungen verbunden. Wenn wir zum Beispiel Gehirne transformiert haben, war es in meinem Bereich nicht so wichtig, ob dieses Gehirn in zwei Tagen oder in vier Stunden transformiert werden konnte. Das ist nicht der große Unterschied.

Inzwischen sind die Datenmengen so riesig geworden, und die Anforderung an Arbeitsspeicher, an Verarbeitungsgeschwindigkeit so immens, dass diese Dinge nicht ausreichend sind, wenn man sie nur in seinem Institut an seinem kleinen Rechner macht.

Wenn wir mit 1,6 Mikrometern mal 100 Mikrometern in der Tiefe ein Gehirn bezüglich der Faserbahnen analysieren, dann bekommen wir eben mal 500 Terabyte Daten für ein einziges Gehirn. Und wir wollen natürlich mehr Gehirne untersuchen, wir brauchen Informationen über die Variabilität, und Sie können sich vorstellen, dass damit jeder Haus- und Hofrechner überlastet ist und wir dann doch Supercomputer brauchen.

Und das können sie vielleicht am besten, die Supercomputer: In großen Datenmengen Strukturen erkennen und in hochauflösenden Bildern schön darstellen.

Karlheinz Meier, der Heidelberger Physiker, fragt sich, wo liegt in diesen 10 hoch 11 vernetzten Hirnzellen eigentlich die Information? Vielleicht liegt sie nirgendwo. Vielleicht ist „Information“ und also auch Informatik einfach etwas, was mit unserem Gehirn nichts zu tun hat.