

VORBILD

GEHIRN

VORBILD GEHIRN

DIE ATOME DES DENKENS

KARLHEINZ MEIER

Neben dem Universum ist das Gehirn fraglos die größte Herausforderung für die Wissenschaft. Und wie beim Universum besteht die Aufgabe der Forscher auch beim Gehirn darin, das große äußere Erscheinungsbild mit der kleinen inneren Struktur zu verknüpfen. Doch was ist im Falle des Gehirns „das Kleine“? Offensichtlich ist es nicht möglich, ein Gehirn unter Zuhilfenahme eines Computers aus Quarks, Nukleonen, Atomen oder Molekülen zusammenzubasteln. Aber vielleicht lassen sich aus einzelnen Konstituenten neuromorphe Systeme zusammenfügen – Systeme, welche die Gestalt des Nervensystems nachbilden und ähnlich wie das menschliche Gehirn funktionieren. Eine Heidelberger Forschungsgruppe hat ein neuromorphes System entwickelt, das seinem biologischen Vorbild bereits recht nahekommt.

Schein und Sein

**Mein Kind, es sind allhier die Dinge,
Gleichwohl, ob große, ob geringe,
Im Wesentlichen so verpackt,
Dass man sie nicht wie Nüsse knackt.**

Wilhelm Busch

A

Auch für uns Wissenschaftler hält Wilhelm Busch eine Weisheit bereit: Dinge verbergen ihre wahre Natur, sie kann nicht einfach durch einen Nussknacker zutage befördert werden. Den Dingen auf den Grund zu gehen, also vom äußeren Schein zu den inneren Zusammenhängen zu gelangen, stellt sich als mühsam dar. Wissenschaftler jedweder Disziplin werden dies bestätigen.

Die physikalische Wissenschaft verfolgt zwei entgegengesetzte Wege, um dem Zusammenhang zwischen dem äußeren Schein und dem inneren Sein der Dinge auf die Spur zu kommen. Der „Nussknacker“ des Wilhelm Busch ist einer davon: Es ist der Weg der Auflösung oder der Analyse. Wer Dinge in ihre Bestandteile zerlegt, findet häufig Konstituenten von universellem Charakter. Rosen beispielsweise gibt es in vielen Formen und Farben – die in ihnen analytisch nachweisbaren Kohlenstoffatome sind alle gleich. Umgekehrt verläuft der Weg der Verknüpfung oder Synthese. Können wir eine Rose aus Atomen zusammensetzen? Das ist offensichtlich problematisch. Es gibt nicht nur sehr viele verschiedene Rosen, es gibt auch noch Nelken, Diamanten oder Mäuse, die aus den gleichen Konstituenten bestehen. Aus Einfachheit entsteht komplexe Vielfalt. Dieses Prinzip erfährt jedes Kind, wenn es aus nur wenigen Typen einfacher Legosteine ganze Welten gestaltet. Selbst beim Vorhandensein einschränkender Regeln ist die Anzahl der Möglichkeiten überwältigend.

Grundlegend zu verstehen, wie komplexe Strukturen aus mikroskopischen Konstituenten entstehen, ist ein aktuelles

Forschungsgebiet der Physik. Die größte Herausforderung für die Wissenschaft ist neben dem Universum das Gehirn. Wie beim Universum besteht die Aufgabe der Forschung darin, das Große mit dem Kleinen zu verknüpfen. Aber was ist im Falle des Gehirns „das Kleine“? Die mikroskopische Struktur aller Materie ist uns wohlbekannt. Können wir etwa ein Gehirn aus Quarks, Nukleonen, Atomen oder Molekülen unter Zuhilfenahme von Computern synthetisieren? Dies wird uns, davon bin ich fest überzeugt, auf absehbare Zeit nicht gelingen. So sinnlos die eben formulierte Herausforderung auch sein mag – sie führt uns auf eine wichtige Fährte. Auf welchen Skalen wollen wir das komplexe Gehirn denn eigentlich betrachten und vielleicht sogar verstehen?

Skalen als Schlüssel zum Verständnis?

Eine Skala beschreibt die räumliche Ausdehnung der Konstituenten, also gewissermaßen die Größe der Legosteine. Die Wahl der Skala wird sicherlich von den Erwartungen abhängen, die wir an unsere Forschungen stellen. Wenn wir die Wirkung von Arzneimitteln verstehen möchten, werden wir um die molekulare Skala nicht herumkommen. Mich persönlich interessiert jedoch eine andere Frage: Wie geht das Gehirn mit Information um? Wie lernt es? Wie kann es Vorhersagen machen? Und schließlich: Wie kann man die gewonnenen Erkenntnisse verwenden, um neuartige Computer zu bauen, die Information ähnlich wie das Gehirn verarbeiten? Hierzu ist eine aufwendige molekulare Beschreibung möglicherweise gar nicht erforderlich. Dies ist zwar nur eine Vermutung, aber der Ansatzpunkt für die Forschung unserer Heidelberger Gruppe.

Was sind also die „Atome des Denkens“? Viele Wissenschaftler halten die Neurone, also spezielle Zellen des Hirngewebes, für die Konstituenten, mit denen zumindest einige Aspekte der Informationsverarbeitung im Gehirn beschrieben werden können. Neurone besitzen neben einem Zellkörper, dem Soma, baumartige Erweiterungen, die Dendriten und Axone, über die sie sich mit anderen Zellen zu einem Netzwerk verknüpfen. Besonders wichtig sind dabei die Kontakte zwischen den Zellen. In diesen Synapsen finden komplizierte biochemische Prozesse statt,

die den Transfer der elektrischen Aktivität von einer vorgeschalteten (präsynaptischen) Zelle zu ihrer nachgeschalteten (postsynaptischen) Nachbarin vollziehen.

Dieses vereinfachte Bild eines „neuronalen Netzwerks“ lässt sich in ein überaus erfolgreiches mathematisches Modell umwandeln, das „Perzeptron“. Die von den Dendriten integrierte Information aus dem Netzwerk wird als mathematische Summe formuliert, die synaptischen Kontakte sind Multiplikationen und das auslaufende Axon sendet als Resultat der Additionen und Multiplikation eine nicht-lineare Antwort des Neurons in das Netzwerk. Führt man diese Operationen in einem vielschichtigen Netzwerk durch, erhält man ein ANN, eines jener „artificialen neuronalen Netze“. Sie bilden heute eine wichtige konzeptionelle Basis der AI, der „artificialen Intelligenz“. Für konkrete Anwendungen in der Datenanalyse müssen die synaptischen Multiplikationen allerdings noch so eingestellt werden, dass sie das gewünschte Problem lösen. Dazu gibt es eine Reihe sehr gut entwickelter mathematischer Methoden, die unter dem Begriff „Lernen“ zusammengefasst werden. Häufig wird behauptet, ANNs hätten ganz und gar nichts mit dem Gehirn zu tun. Dies halte ich für falsch. Natürlich sind die verwendeten Prinzipien sehr einfach, jedoch ist der synthetisierende Ansatz klar von der Architektur biologischer Netzwerke inspiriert. Seine Pioniere wie der britische Mathematiker Alan Turing oder der ungarisch-amerikanische Mathematiker John von Neumann machten dies bereits in ihren frühen Publikationen sehr deutlich.

Wenn so wenig Gehirn bereits so beeindruckende Resultate liefert, was könnte dann noch mehr Detail bewirken? Welche Aspekte des Gehirns sind für die Prinzipien der Informationsverarbeitung wichtig, welche können wir für diesen Zweck vielleicht ignorieren? Es ist wenig überraschend, dass diese Frage bis heute schlussendlich unbeantwortet ist.

Die vernachlässigte Bedeutung der Zeit

Eine meiner Ansicht nach wesentliche Dimension, die in den traditionellen neuronalen Netzwerken ignoriert wird, ist die Zeit. Zeit spielt in biologischen Netzwerken und damit natürlich auch in unserer Wahrnehmung der Welt eine sehr wichtige Rolle. Wir haben bisher nur über räumliche Skalen gesprochen. Es gibt aber auch Skalen im zeitlichen Sektor. Moleküle zittern extrem schnell, man spricht hier über Femtosekunden, das sind 15 Stellen hinter dem Komma. Ich denke jedoch, dass auch hier die molekulare Skala für ein Verständnis der Informationsverarbeitung nicht so entscheidend ist. Entscheidend ist wohl, was auf der zellulären Ebene geschieht. Neurone kommunizieren nicht über statische Signale, sondern tauschen kurze elektrische Pulse aus, sogenannte Aktionspotentiale oder „Spikes“. Spikes haben eine typische Länge von Millisekunden, also Tausendstelsekunden. Dies hört sich schnell an, ist aber im Vergleich zu den digitalen



PROF. DR. KARLHEINZ MEIER ist seit 1992 Professor für Experimentalphysik an der Universität Heidelberg, an der er gemeinsam mit Siegfried Hunklinger 1999 das Kirchhoff-Institut für Physik gründete. Mehr als 30 Jahre arbeitete er auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik an einer Vielzahl von Experimenten am DESY in Hamburg und am CERN in Genf. Vor rund 15 Jahren wandte er sich einem neuen Arbeitsgebiet zu: Heute erforscht er, wie Prinzipien der Informationsverarbeitung vom Gehirn auf neuartige Computerarchitekturen übertragen werden können. In Rahmen dieser Arbeiten initiierte und leitete er die europäischen Forschungsprojekte FACETS und BrainScaleS. Gemeinsam mit dem Neurowissenschaftler Henry Markram und dem Mediziner Richard Frackowiak initiierte er das Human Brain Project, in dem er seit 2013 als Leiter der Abteilung für Neuromorphes Computing und im Direktorium tätig ist.

Kontakt: meierk@kip.uni-heidelberg.de

Pulsen in einem Computer extrem langsam. Dort reden wir über Gigahertz-Frequenzen, also Pulslängen von Nanosekunden, eine Million Mal schneller als im Gehirn.

Warum ist dann das langsame Gehirn trotzdem in vielerlei Hinsicht so viel besser und manchmal sogar schneller als unsere leistungsfähigsten Computer? Klassische ANNs auf traditionellen Computern benötigen zum Lernen riesige Referenzdatensätze, während ein kleines Kind unter Umständen aus einem einzigen Bild lernt, was ein Dinosaurier ist. Warum ist das so?

Die Antwort verbirgt sich nicht zuletzt hinter den Zeitskalen. Die wohl wichtigste Eigenschaft des Gehirns ist seine Plastizität, also die kontinuierliche Adaption an neue Situationen und Anforderungen. Plastische Prozesse des Lernens und der Entwicklung der Netzwerkarchitektur finden gleichzeitig auf Zeitskalen von Millisekunden bis Jahren statt. Was wir in Jahren kontinuierlich dazulernen, können wir in Millisekunden nutzen. Ich bin der Überzeugung, dass der nächste Schritt in der Entwicklung von Computern nach dem Vorbild des Gehirns eine effiziente technische Umsetzung dieses kontinuierlichen Lernprozesses sein muss.

Aber da gibt es ein Problem. Zwischen Millisekunden und Jahren liegt ein Faktor von 10^{11} , also eine Multiplikation mit 100.000.000.000. Wenn wir nun einen Computer bauen könnten, der genauso schnell wie das Gehirn funktioniert, würden diese Prozesse immer noch genauso lang dauern wie im richtigen Leben – mindestens also Tage, vielleicht gar Monate oder Jahre. Es kommt aber noch viel schlimmer: Computersimulationen von großen neuronalen Netzwerken aus feuernden Neuronen auf unseren besten Hochleistungsrechnern laufen typisch eintausend mal langsamer als das biologische Vorbild. Da werden aus einem biologischen Tag drei Jahre auf dem Computer, und auf die Simulation eines biologischen Jahres müssten wir bis in das nächste Jahrtausend warten.

Nun könnte man sagen, warten wir doch einfach ab, bis die Computer schneller werden. Das hat in den vergangenen 40 bis 50 Jahren immer funktioniert. Die Fertigung von Mikroprozessoren folgte dem legendären „Moore'schen Gesetz“, mit dem nicht nur immer mehr Transistoren auf einem Mikrochip untergebracht wurden. Auch die Rechengeschwindigkeit hat sich auf atemberaubende Weise beschleunigt. Ein tausendfacher Zuwachs sollte da kein Problem sein. In wenigen Jahren produziert die Halbleiterindustrie, was wir brauchen. Leider ist dies nicht der Fall. Das scheinbar immerwährende exponentielle Wachstum der Fähigkeiten von Mikroprozessoren geht seit einigen Jahren in die Sättigung. Der Grund dafür ist, dass einzelne Transistoren bereits heute so klein sind wie einige Hundert Atome und die Fertigung verlässlicher traditioneller

Systeme immer aufwendiger und teurer wird. Die Zeiten des Mooreschen Gesetzes gehen also ihrem Ende entgegen, und viele Forschungsgruppen suchen nach neuen Lösungen für das herannahende Post-Mooresche Zeitalter. Sie fokussieren ihre Arbeit auf neuartige Architekturen zur Informationsverarbeitung, die nicht auf der Verfügbarkeit immer kleinerer und dennoch zuverlässiger Transistoren beruhen.

Allen neuen „More-than-Moore“-Ansätzen gemeinsam ist die Abkehr von der „von-Neumann-Architektur“, die seit den 1950er-Jahren die konzeptionelle Basis für alle Computer vom Großrechner zum Smartphone darstellt. Ein möglicher Ansatz für „More-than-Moore“-Computer sind sogenannte „neuromorphe Systeme“, also Systeme, die der Gestalt (gr. μορφή) des Nervensystems nachgebildet sind. Ein anderer Ansatz sind Quantencomputer.

Neuartige Architekturen der Informationsverarbeitung

Unsere Heidelberger Arbeitsgruppe hat ein Konzept für neuromorphe Systeme entwickelt und realisiert, das sowohl den Konstituenten als auch dem Netzwerk des biologischen Vorbildes besonders nahekommt. Darüber hinaus legt es den Schwerpunkt erstmals auf die verschiedenen Zeitskalen und das damit verbundene Lernen. Es handelt sich um einen neuen Weg vom mikroskopischen Sein zum äußeren Schein, vom Kleinen zum Großen, vom Einfachen zum Komplexen. Die wichtigste Eigenschaft gleich vorweg: Es handelt sich nicht um einen Computer. Ein Computer rechnet, das sagt uns schon seine Etymologie. Unser Heidelberger System ist hingegen ein physikalisches Modell, sozusagen ein Analogon der biologischen Realität unter Verwendung mikroelektronischer Transistoren. Es deshalb als Analogrechner zu bezeichnen, wäre allerdings falsch.

Wie bereits dargestellt, erfolgt die elektrische Kommunikation zwischen Neuronen mit stereotypen Pulsen, den Aktionspotentialen. Dies erinnert ein wenig an digitale Systeme, in denen zwischen „1“ und „0“ oder „an“ und „aus“ unterschieden wird. Es gibt aber einen entscheidenden Unterschied: Im Gegensatz zu Computern ist die Zeit im Gehirn nicht getaktet. Sie fließt kontinuierlich, so wie es die physikalischen Gesetze vorgeben. Woher weiß unser Gehirn dann, wie schnell es laufen soll? Dies ist das Resultat physikalischer Vorgänge auf mikroskopischer Ebene: die Durchlässigkeit von Zellwänden für Ionen, die elektrische Speicherkapazität einer Zelle oder die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektrischer Anregungen im Netzwerk. Die zugrunde liegende Physik bestimmt also die Geschwindigkeit unseres Denkens.

Mit dieser Erkenntnis lässt sich nun eine spannende Überlegung anstellen. Können wir die elektrischen Prozesse der Biologie direkt auf elektronische Schaltungen übertragen, ohne den Umweg über mathematische Formeln zu gehen? Und: Ist nicht die Durchlässigkeit von elektronischen

Transistoren viel größer als die von biologischen Zellwänden? Ist nicht die elektrische Kapazität eines modernen Transistors viel kleiner als die einer Zelle? Alle diese Fragen lassen sich eindeutig mit „Ja“ beantworten. Die Konsequenz: Wir können ein Modell neuronaler Schaltkreise bauen, in dem die entsprechenden physikalischen Prozesse schneller ablaufen als in der Biologie.

Eine weltweit einzigartige Forschungseinrichtung

Unser Heidelberger „BrainScaleS“-System realisiert den gerade beschriebenen Ansatz. Auf einem fingernagelgroßen Siliziumchip befinden sich etwa 500 Neurone und 100.000 Synapsen. Alle charakteristischen Zeitkonstanten des Systems sind 10.000 Mal schneller als in der Biologie. Prozesse des Lernens und der Selbstorganisation laufen also 10.000 Mal schneller ab als im Vorbild des Modellsystems. Aus einem Tag werden zehn Sekunden,

**„Wenn so wenig
Gehirn
bereits so beeindruckende
Resultate liefert,
was könnte
dann noch mehr
Detail
bewirken?“**

BrainScaleS und Human Brain Project

Das neuartige Computersystem BrainScaleS startete im März 2016 am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg. Der unter Leitung von Prof. Dr. Karlheinz Meier entstandene neuromorphe Computer wurde im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Human Brain Project (HBP) aufgebaut, dessen Ziel es ist, Funktionsprinzipien des menschlichen Gehirns nachzubilden und mithilfe fundamental neuer Computerarchitekturen zu simulieren. Neuromorphe Computer übertragen Architekturen und Prinzipien der neuronalen Informationsverarbeitung im Gehirn auf Siliziumchips.

Das BrainScaleS-System ist ein direktes physikalisches Abbild des biologischen Vorbildes, dessen Zellen, Verbindungen und Kommunikation durch analoge und digitale Schaltungen unter Verwendung moderner Mikroelektronik realisiert werden. Es besteht aus 20 Siliziumwafern mit insgesamt vier Millionen Neuronen und einer Milliarde synaptischer Verbindungen. Lern- und Entwicklungsprozesse können mit einem tausendfachen Beschleunigungsfaktor nachgeahmt werden, sodass die Simulation eines Tages auf 100 Sekunden komprimiert wird.

Parallel zum Start des Heidelberger BrainScaleS-Systems wurde an der Universität Manchester (Großbritannien) ein komplementäres System von vergleichbarer Größe mit dem Namen SpiNNaker in Betrieb genommen. Zusammen bilden die beiden Systeme die „Neuromorphic Computing Plattform“ des Human Brain Project. Die europäischen Entwicklungen basieren auf den Projekten FACETS und BrainScaleS, die von 2005 bis 2015 im Rahmen des Programms „Future Emerging Technologies“ (FET) von der Europäischen Kommission gefördert wurden, sowie auf dem britischen Projekt SpiNNaker.

MODELLED ON THE BRAIN

THE ATOMS OF THOUGHT

KARLHEINZ MEIER

The emergence of structure and function from fundamental constituents is a topical field of research in modern physics. The brain and the universe are just two examples of this challenge, albeit very sophisticated ones. Biology tells us that the brain is a network of complex neural cells connected mostly by biochemical synapses. This static picture of the brain as a network is the model for the concept of artificial neural networks (ANNs), a key component of artificial intelligence. The missing variable in this approach is time. Time is a key aspect of all dynamic learning and development processes in the brain. The timescales involved range from milliseconds to years, spanning 11 orders of magnitude. This is a formidable challenge for synthesising approaches on supercomputers: The processes in simulations of large scale spiking neural networks are 1000 times slower than in biological networks. The rapid evolution of computer performance driven by Moore's law is coming to an end; future conventional supercomputers are not likely to enable further progress. Consequently, scientists have begun to investigate novel "More-than-Moore" approaches. Neuromorphic computers are just one example of neural architectures being transferred to electronic chips.

Our Heidelberg group has developed a new approach to neuromorphic computing that approximates biological cell and network properties. Rather than computing the relevant parameters based on mathematical abstraction, we create a direct physical model on a silicon substrate. The most important advantage of this system is its ability to scale down all relevant timescales by a factor of 10,000 – a year of biological development is thereby compressed to a mere 3,000 seconds. The system currently installed on the Heidelberg Science Campus features 20 silicon wafer modules with a total of 4 million neurons and 1 billion synapses. Ongoing experiments focus on all aspects of configuration and learning. Examples include reverse engineered biological circuits such as those found in insects or birds and theoretically driven concepts like stochastic learning and inference. ●

PROF. DR KARLHEINZ MEIER has held the Chair of Experimental Physics at Heidelberg University since 1992; in 1999, he co-founded the University's Kirchhoff Institute for Physics with his colleague Siegfried Hunklinger. For more than 30 years, Prof. Meier worked in particle physics, conducting numerous experiments at DESY in Hamburg and CERN in Geneva. Approximately 15 years ago, he turned to a new field of research: Today, he investigates how the principles of information processing might be transferred from the human brain to new computer architectures. In the context of this work, he initiated and directed the European research projects FACETS and BrainScaleS. He is a member of the Directorate of the Human Brain Project, which he launched in 2013 together with neuroscientist Henry Markram and physician Richard Frackowiak, and heads the project's Department of Neuromorphic Computing.

Contact: meierk@
kip.uni-heidelberg.de

“Can we transfer the electrical processes of biology directly to electronic circuits?”

aus einem Jahr 3.000 Sekunden. Dieser neue Ansatz liefert uns also ein einzigartiges Werkzeug zum Studium und zur Anwendung von Lern- und Entwicklungsprozessen auf vielen unterschiedlichen Zeitskalen.

Allerdings sind 500 Neurone recht wenig verglichen mit den fast 100 Milliarden im menschlichen Gehirn. Lässt sich unser Ansatz skalieren? Können wir sehr viele Chips zu beliebig großen Systemen kombinieren? Im Prinzip ist dies möglich. Im Sinne der bereits eingangs erwähnten Legosteine lassen sich grundsätzlich beliebig große Systeme aufbauen.

Natürlich sieht die Realität nicht ganz so einfach aus. Eine große Herausforderung sind die extremen Anforderungen an die Kommunikation in einem beschleunigten System. Wir haben aus diesem Grunde für unser BrainScaleS-System ein neues technologisches Konzept realisiert, in dem die Integration von mehr als 400 neuromorphen Chips auf einer Siliziumscheibe, einem sogenannten Wafer, durchgeführt wird. Da die Chips auf solchen Wafers produziert werden, sollte dies eigentlich einfach sein. Es hat uns allerdings mehr als zehn Jahre gekostet, diese Technologie gemeinsam mit dem „Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration“ (IZM) in Berlin umzusetzen und insgesamt zwanzig Wafer-Module in einem Container auf dem Hinterhof des Kirchhoff-Instituts für Physik im Heidelberger Neuenheimer Feld zu installieren. Insgesamt stehen den Forschern in diesem System heute vier Millionen elektronische Neurone und eine Milliarde Synapsen zur Verfügung.

Können Mikrochips lernen?

Was kann das BrainScaleS-System? Im Zentrum der derzeitigen Forschungsarbeiten stehen naturgemäß die Konfiguration des Systems und das Lernen. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt: neuronale Schaltungen, die auf rekonstruierten biologischen Vorbildern beruhen, und solche, die aus mathematischen, theoretischen Ansätzen entstehen. Konkrete Beispiele unserer Arbeit sind das auf dem Geruchssinn basierende System von Insekten, die Schalllokalisierung bei Eulen oder die experimentelle Realisierung zufallsgesteuerter, stochastischer Lern- und Entscheidungsprozesse. In allen Experimenten spielt das Lernen eine entscheidende Rolle. Es erfolgt zum Teil intern auf den neuromorphen Chips oder wird extern über einen konventionellen Computer gesteuert, der mit dem neuromorphen System eine Hybridarchitektur bildet.

Das Heidelberger BrainScaleS-System ist eine weltweit einzigartige Forschungseinrichtung. Von der Größe vergleichbare, aber konzeptionell grundverschiedene Ansätze werden noch an der Universität Manchester (Großbritannien), der Stanford University (USA) und vom IBM-Forschungslaboratorium in Almaden (USA) verfolgt. Wenn es sich bei diesen Arbeiten auch vorwiegend um Grundlagenforschung handelt, stehen Anwendungen direkt vor

„Können wir die elektrischen Prozesse der Biologie direkt auf elektronische Schaltungen übertragen?“

der Tür. Die Nachfolgenerationen der erwähnten ANNs werden mit Sicherheit viele der biologischen Prinzipien beinhalten und zukünftige AI-Systeme selbstlernend, energieeffizient und kompakt machen, also dem biologischen Vorbild Gehirn viel näher kommen.

Wohin geht der Weg für unsere Heidelberger Gruppe? Mit dem gerade erfolgten Baubeginn für das neue „European Institute for Neuromorphic Computing“ (EINC) auf dem Campus Neuenheimer Feld und einer festen Verankerung unserer Forschung im Europäischen Projekt „Human Brain Project“ (HBP) haben wir sehr konkrete Planungen und erste Prototypen für die nächste Generation des BrainScaleS-Systems. Weiter verbesserte Möglichkeiten des Lernens sowie komplexere Neuronenmodelle wurden bereits gemeinsam mit Neurowissenschaftlern im HBP entwickelt und finden derzeit ihren Eingang in die elektronischen Schaltungen – dazu wird es vielleicht später mehr zu berichten geben. ●