

Relations-Stunt. Seine Hauptangriffspunkte waren: Man arbeite mit extrem vereinfachten Modelle von Neuronen und Synapsen, fernab jeglicher biologischer Realitäten. Zudem hätte die Arbeit nicht den in der Wissenschaftswelt üblichen Begutachtungsprozess (peer review) durchlaufen.

Schon im Jahre 2007, als Dharmendra Mhoda proklamierte, Simulationen im Mäusehirnmaßstab durchgeführt zu haben, brach Markram seine neurowissenschaftliche Kooperation mit IBM ab. Er bewertete diese Inanspruchnahme Mhodas als unethisch und einen Betrug an der Öffentlichkeit. Nun, dem Autor gegenüber räumte Markram bei einem Treffen ein, mit dem Bruch mit IBM überzogen zu haben. Offenbar führten die Differenzen mit vielen HBP-Wissenschaftlern dazu, dass man im März 2015 neue Führungsstrukturen bei dem Human Brain Project einführte und Markram entmachtete.

Heute leitet er nur noch einen von zwölf Teilbereichen, die Verantwortung wurde verteilt, die Zielsetzung überarbeitet. Immerhin präsentierte Markram im Oktober 2015 am EPFL in Lausanne als erstes größeres Ergebnis seines ursprünglichen Blue Brain-Projekts die Simulation der Aktivität von etwa 31 000 Neuronen aus dem somatosensorischen Cortex eines Rattengehirns, ausgeführt in zuvor nicht gezeigter, hoher Detailtreue. Bei hoher Datenmenge bedeutet das allerdings nicht mehr als die Simulation eines Hirnbereichs von der Größe eines Sandkorns.

2018 wurde die Finanzierung von Blue Brain-Projekts in der Schweiz nochmals verlängert. Es sollen bis dahin 116 Millionen Schweizer Franken in das Vorhaben geflossen sein. Zu jenem Zeitpunkt hieß es hinsichtlich seiner Komplexität auch: Die Modellierung eines einzelnen Neurons bei Blue Brain führe zu 20 000 gewöhnlichen Differentialgleichungen; bei der Modellierung ganzer Hirnregionen seien es schnell 100 Milliarden Gleichungen, die gleichzeitig gelöst werden müssen.

Dennoch lässt sich dem Standpunkt Henry Markrams nach einer möglichst Biologie-nahen Simulation eines Gehirns durchaus Positives abgewinnen; Zelle ist nicht gleich Zelle, und manche haben mehr Funktionen als man zunächst annimmt. Erst 2020 fand man heraus, dass Kleinhirnkörnerzellen über eine bislang unbekannte Eigenschaft verfügen. Diese Neuronen sind die zahlreichsten im Gehirn und gelten seit langem als die einfachsten. Es wurde angenommen, dass es sich um lineare Wandler eingehender Signale handelt, aber dies stellte sich als falsch heraus; auch die einfachen Zellen haben eine hohe Komplexität. Man schuf ein Computermodell von diesen Kleinhirngranulatzellen, die aus über 150 elektrischen Untereinheiten bestehen, in denen 9 verschiedene Arten von Ionenkanälen untergebracht sind, und die unterschiedliche Funktionszustände des Neurons liefern. Die mathematische Modellierung der Körnerzellen sagte die Expression des Ionenkanals TRPM4 voraus, eines Membranmoleküls, das die neuronale Erregbarkeit durch Regulierung des Entladungsmusters reguliert. Die theoretische Vorhersage des Vorhandenseins des TRPM4-Kanals wurde durch elektrophysiologische Ganzzellaufzeichnungen und Immunfluoreszenz bestätigt. Die Konsequenzen dieser Entdeckung wer-

den dazu führen, dass die derzeitige Theorie hinter der Funktionsweise des Kleinhirnnetzwerks geändert wird. Es ist für die sensomotorische Steuerung und sensorische Vorhersage von grundlegender Bedeutung. [maso2020]

Die Entscheidung zwischen „reverse engineering“ und Black box-Verfahren hat sich dennoch mittlerweile allein durch die Komplexität des Gehirns – molekular wie makroskopisch – zum Black box-Verfahren hin bewegt. Das muss ja nicht schlecht sein: Die Evolution hat für manche Aufgaben auch mehrfach Wege gefunden; so wurde das Auge rund 50 mal von ihr unabhängig voneinander hervorgebracht. Vielleicht erreicht Black box-Neuromorphik irgendwann Leistungen, zu denen das biologische Gehirn nie in der Lage wäre...



Karlheinz Meier
bei einem Vortrag
2013.

9.4 European Institute for Neuromorphic Computing – und Karlheinz Meier

Weltweit mit führend in der Entwicklung neuromorpher Hardware ist man wohl in Heidelberg – wohl auch wegen einer weiteren charismatischen Forscherpersönlichkeit: Karlheinz Meier (1955-2018) (s. Abb.). Der Physikprofessor kam von der Elementarteilchenphysik und war am DESY und CERN beschäftigt. Aufgaben zur Auswertung der riesigen Datenmengen, die der LHC-Teilchendetektor „Atlas“ am CERN lieferte – mit dessen Hilfe sich die Higgs-Bosonen nachweisen ließen, wodurch das Standard-Modell der Teilchenphysik gestützt wurde (und was mit einem Nobelpreis gewürdigt wurde) – brachten Meier in Kontakt mit analoger Elektronik, die schnelle Messergebnisse lieferte. Ihre Funktionsweise hatte jedoch Ähnlichkeiten mit neuronalen Strukturen.

Als Meier 1992 einen Lehrstuhl für Experimentalphysik in Heidelberg übernahm, arbeitete in der Neckarstadt am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung auch Henry Markram. Und Henry Markram, der dann zur École Polytechnique in Lausanne (Schweiz) wechselte, rief ja dort am Brain and Mind Institute zusammen mit IBM im Mai 2005 das „Blue Brain-Project“ ins Leben. Bestimmt gab es gegenseitig inspirierende Fachgespräche zwischen Meier und Markram...

Daher nimmt es nicht Wunder, dass Karlheinz Meier mit seinen zwischenzeitlich entwickelten neuromorphen Chips zum Direktor des Hardwareteils des Human Brain Project berufen wurde. Als dessen wichtigstes Projekt initiierte er auf dem Unicampus in Heidelberg ein Neubau für neuromorphes Computing.

Dessen Herzstück werden ein Konstrukt aus Siliciumstrukturen sein, die dem äußeren Eindruck nach konventionellen Computerchips ähneln. Anders als diese haben sie jedoch eine dezentrale Struktur, verarbeiten elektrische Impulse in einer Vielzahl von Prozessorelementen, die Charakteristiken von Neuronen aufweisen, asynchron (haben also keinen Systemtakt) – und diese Prozessorelemente funktionieren analog. Dementsprechend sind sie ungenauer als digitale Prozessoren, aber die gesamte Struktur des neuromorphen Computers ist fehlertolerant. Meier war natürlich ein glühender Verfechter derartiger Architekturen, betonte



Hamina in Finnland ist eines von drei **Google-Rechenzentren** in Europa. Früher hatte dort eine Papierfabrik ihren Sitz. Das Bild verdeutlicht den industriellen Charakter der Computerleistung, die für ok Google, Alexa, Siri, Cortana und Co. notwendig ist. Das untere Bild zeigt einen Teil der Kühlanlagen, die das Rechenzentrum mit Wasser aus dem angrenzenden Meer kühlen.

ihre Effizienz. Gegenüber dem Autor sagte er 2018: „Was derzeit in den medial hypen Teilen der künstlichen Intelligenz passiert, ist eine absurde Vergeudung von Ressourcen, um relativ moderate Ergebnisse zu bekommen.“ Gemeint waren dabei etwa die Mechanismen, die hinter Siri, Alexa, OK Google, Cortana und Co. stecken. Das ist eine riesige Computerstruktur mit Fabrikhallen-großen Rechnerräumen, die Megawatt an Energie verbrauchen und extra dort gebaut werden, wo Elektrizität billig sowie Wasserkühlung leicht verfügbar ist (s. Abb.).

Natürlich bedarf es dann noch der Kabel-, Antennen- und Satelliten-Infrastruktur, um das Smartphone in die Lage zu versetzen, Leute an ihre Einkaufsliste zu erinnern. Ressourcenverbrauch steckt

in der künstlichen Intelligenz aber auch in Teilen, an die der Nutzer oft nicht denkt. Moderne Smartphones verfügen zwar schon über spezielle Chip-Komponenten, die darauf ausgelegt sind, neuronale Netze arbeiten zu lassen. Was oft vergessen wird: Solche Netze müssen mit Zehntausenden oder besser Millionen von Beispielen trainiert werden. Dazu benötigt man „gelabelte“ Daten: Heere von Arbeitskräften sehen sich für das autonome Fahren zum Beispiel Millionen Straßenszenen an, kennzeichnen in diesen Bildern konturengenau jedes Haus, jeden Baum, jedes Verkehrsschild, jeden Radfahrer, jeden Fußgänger, jedes Auto... Das alles brachte den Heidelberger Professor zu dem Schluss: „Ich möchte nicht daran arbeiten, Deep Learning kompakter zu machen, also von den Rechnerfarmen auf Chipgröße herunter zu skalieren. Der Anreiz für meine Forschung liegt vielmehr darin, die Chips biologischer zu machen.“

Leider verstarb Karlheinz Meier im Oktober 2018 im Alter von nur 63 Jahren und erlebt die Inbetriebnahme des Neubaus für das European Institute for Neuromorphic Computing (EINC) mit rund 2200 Quadratmetern Nutzfläche, die wohl noch im Verlauf von 2020 stattfindet, nicht.

Der EINC-Neubau kann auf glückliche Umstände im Umfeld von Heidelberg zurückgreifen: Die Hälfte der Baukosten für den EINC-Neubau in Höhe von rund 18 Millionen Euro stammt aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) im Zuständigkeitsbereich des baden-württembergischen Wissenschaftsministeriums, das weitere zwei Millionen Euro beisteuert. Mit einer Summe von sechs Millionen Euro sichern drei private Förderer die Finanzierung des Neubaus: Dr.



Luftaufnahme des Heidelberger Universitätscampus „Neuenheimer Feld“ von Ende Juli 2020. Im gelben Oval zu sehen: Der Neubau des „European Institute for Neuromorphic Computing“ (EINC).

Hans-Peter Wild, der 1974 in das elterliche Unternehmen Wild für Aromen einstieg – besonders bekannt durch die Marke Capri-Sonne, unterstützt die geplante Infrastruktur mit drei Millionen Euro, und mit jeweils 1,5 Millionen Euro tragen die Klaus Tschira Stiftung und die Dietmar Hopp Stiftung zum Bauvorhaben bei. Beide gehen auf Gründer des größten europäischen Softwarekonzerns SAP zurück, der wenige Kilometer südlich von Heidelberg in Walldorf sein Hauptquartier hat. Die Universität Heidelberg selbst bringt über eine Million Euro aus Eigenmitteln auf.

Die Fertigstellung des EINC wird sich aufgrund von bautechnischen Problemen wohl bis 2021 verzögern; hier ein Foto von Ende Juli 2020.



10 Neuromorph: Die elektronischen Chips

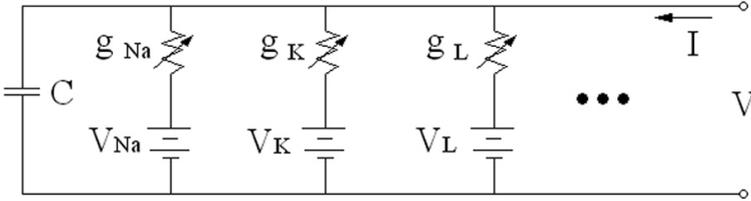
Biologisch inspiriert bezieht sich auf Strukturen und Funktionen, nicht auf Substrate, die materielle Basis. Von daher zeichnen sich mehrere Ansätze zur Verwirklichung ab. Aufgrund des Entwicklungsstandes der vorhandenen Technologie war es naheliegend, sich der Aufgabe zunächst mit Siliciumchips zu nähern. Aber auch dafür gibt es mehrere Wege.

Chips biologischer machen – wie es Karlheinz Meier beabsichtigte – kann insbesondere durch zwei Maßnahmen geschehen: Sowohl dadurch, dass das Lernen lokal wird, also auf einem Chip passiert, als auch dadurch, es von Algorithmen zu befreien, es autonom, selbstorganisierend zu machen, ein selbstlernendes System zu etablieren. Beides strebt man nach wie vor in Heidelberg an, dem der Biologie wohl am stärksten orientierten neuromorphen Projekt in der Welt. Einen weiteren Schwerpunkt des neuromorphen Computings innerhalb des Human Brain Project bildet in England „SpiNNaker“. Das Ziel beider neuromorpher Projekte ist es, eine Signalverarbeitung zu erreichen, wie sie das biologische Gehirn auszeichnet. Während das SpiNNaker-Projekt darauf ausgelegt ist, optimale Neuronen-Simulationen sowie interneuronale Verbindungen zu finden – jedes künstliche Neuron wird dort durch einen eigenen Prozessorkern simuliert (s. u.), arbeiten die Heidelberger Forscher daran, eine energieeffiziente künstliche Hirnstruktur zu schaffen, die allerdings wohl zehnbis hunderttausend mal schneller funktionieren wird als ein biologisches Gehirn.

10.1 Physikalische Grundlage neuromorpher Schaltungen: Das Hodgkin-Huxley-Modell

Die Simulation von natürlichen Neuronen und Synapsen in neuromorpher Hardware geschieht mit einfachen elektrischen Schaltelementen. Das bekannteste Modell für eine derartige Simulation stammt von Alan Lloyd Hodgkin (1914-1998) und Andrew Fielding Huxley (1917-2012). Die englischen Biowissenschaftler stellten es 1952 ursprünglich auf zur Beschreibung der Entstehung von Aktionspotentialen im Riesenaxon des Tintenfisches [10]. Beide erhielten zusammen mit dem Australier Sir John Carew Eccles (1903-1997) 1963 den Nobelpreis für Medizin „für ihre Entdeckungen über den Ionen-Mechanismus, der sich bei der Erregung und Hemmung in den peripheren und zentralen Bereichen der Nervenzellenmembran abspielt“. In dem Hodgkin-Huxley-Modell laufen Aktionspotenziale (Spikes); es gilt als relativ Biologie-nah.

Man moduliert mit ihm spannungsabhängige Membranwiderstände für die Ionenströme innerhalb einer Membran durch variable Widerstände (s. Abb.). Ein Kondensator simuliert dabei die elektrische Membrankapazität C . Der Gesamtmembranstrom ist die Summe der Kalium-, Natrium- und Leck- Ströme I_K , I_{Na} und I_L und des externen Stroms I_{ext} (etwa ein durch



Ein elektrischer Schaltplan für das Hodgkin-Huxley-Modell.

Membranpotential V gehorcht dann der Differentialgleichung

$$C \cdot (dV/dt) = I_{ext} - I_K - I_{Na} - I_L$$

I_K beispielsweise ergibt sich aus der Differenz der Membranspannung zum jeweiligen Gleichgewichtspotential E und der dazugehörigen Leitfähigkeit g : $I_K = g_K (V - E_K)$; die anderen Ströme entsprechend. Die Leitfähigkeiten g_K und g_{Na} sind zeitabhängig und somit für die Entstehung eines Aktionspotentials verantwortlich, während die Leckleitfähigkeit g_L konstant bleibt; der Widerstand der Membran kann als unveränderlich angesehen werden. Abbildung 6 zeigt einen elektrischen Schaltplan für das Hodgkin-Huxley-Modell. In Abbildung 7 wird dargestellt, dass ein beschleunigter Ablauf von Impulsmustern in solchen Schaltkreisen gegenüber den natürlichen Entsprechungen auf die elektrischen Eigenschaften zurückzuführen ist; Spannungen werden einfach schneller auf- und abgebaut.

Eine entscheidende Idee der beiden englischen Wissenschaftler war, Variablen einzuführen, die die Dynamiken der Ionenkanäle nachbilden (Gatingvariable). Die postulierten Gatingvariablen haben sich später als echte Struktureigenschaft der spannungsabhängigen Ionenkanäle herausgestellt. Diese Variablen geben den Anteil der gerade geöffneten Kanäle an und bilden damit eins der Elemente der Plastizität von neuronalen Netzen, die mit Lernprozessen zu tun haben.

10.2 SpiNNaker in Manchester

Einen Schwerpunkt des neuromorphen Computings innerhalb des Human Brain Project gibt es im britischen Manchester unter der Leitung von Steve Furber (geb. 1953). Er war Mitentwickler des ARM-32-bit-RISC-Prozessors bei der Firma Acorn. Zusammen mit Sophie Wilson baute er einen BBC Microcomputer als Teil eines TV Programms. Dieser wurde über eine Million mal verkauft und in über 80 Prozent der Schulen in Großbritannien benutzt. Ihr ARM RISC-Prozessor wurde in viele Geräte der Unterhaltungselektronik und in Mobiltelefone eingebaut und bis 2012 mehr als 30 Milliarden Mal produziert. Jetzt ist Furber im Rahmen des HBP verantwortlich für das SpiNNaker-Projekt (spiking neural network architecture). Damit soll die Konnektivität von biologischen Hirnstrukturen nachvollzogen werden. In dem SpiNNaker-Computersystem kommunizieren 57 600 ARM-Prozessoren mit jeweils 18 Kernen; insgesamt sind es also 1 036 800 Kerne und über 7 TB RAM. Jeder Chip simuliert über 16 000 Neuronen. Die Gesamtsimulation umfasst also rund eine Milliarde Neuronen; sie sollen über die tausendfache Menge an Synapsen-Simu-

lationen miteinander verbunden sein (s. Abb.). Auf diese Weise kann das Verhalten von einer Milliarde Neuronen in Echtzeit simuliert werden.

Noch einmal zum Vergleich: Schätzungen nach besteht das menschliche Gehirn aus knapp 100 Milliarden Nervenzellen (Neuronen) und etwa ähnlich vielen Gliazellen; angegeben werden häufig 86 Milliarden Neuronen [60]. Die brasilianische Neurowissenschaftlerin Suzana Herculano-Houzel hat diese genauere Zahl ermittelt und 2009 ihr Ergebnis veröffentlicht. Davon liegen etwa 16 Milliarden Neuronen in der Großhirnrinde (Cortex cerebri), etwa 69 Milliarden im Kleinhirn (Cerebellum) und rund 1 Milliarde in den restlichen Hirnregionen (von Hirnstamm, Zwischenhirn und Basalganglien). Miteinander verbunden sind Neuronen über Synapsen, im menschlichen Hirn geschätzt rund 100 Billionen (10^{14}), sodass durchschnittlich eine Nervenzelle mit 1000 anderen verbunden wäre und von jedem anderen Neuron aus in höchstens vier Schritten erreicht werden könnte.

Das entspricht durchaus der SpiNNaker-Architektur. Dessen Chips sind auch gar nicht neuromorph; vielmehr sind es eher konventionelle, digitale ARM-Prozessoren. Genauer handelt es sich um das SpiNNaker-Multicore-System-on-Chip. Der Chip ist ein global asynchrones lokal synchrones System (GALS) mit 18 ARM-968-Prozessorknoten auf synchronen Inseln. Man kann sagen: Die Vernetzungsstruktur von SpiNNaker ist neuromorph. Konkret bedeutet dies: Die in den Chips simulierten Neuronen senden untereinander über spezielle Verbindungsschaltungen Spannungsimpulse aus. Solche Spikes gibt es wie bereits erläutert auch in biologischen Gehirnen, und hier wie dort passiert die Verarbeitung solcher Spikes in den Neuronen asynchron. SpiNNaker soll helfen, optimale Neuronen-Simulationen sowie interneuronale Verbindungen zu finden.

Im September 2019 wurde bekannt gegeben, dass die SpiNNaker-Maschine der zweiten Generation an der TU Dresden errichtet wird; dafür stellt man 8 Millionen Euro bereit. SpiNNaker 2 bzw. „SpiNNcloud“, wie man das Projekt bezeichnet, wird aus 10 Millionen ARM-Kernen beste-

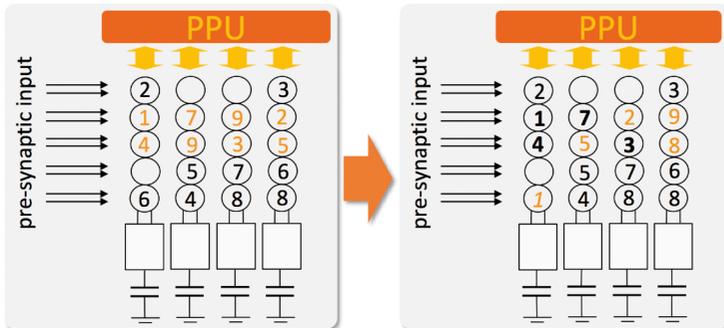
Die SpiNNaker-Maschine in Manchester mit einer Millionen Prozessorkernen. Übrigens: Ein Spinnaker ist ein großes, gewölbtes Vorsegel. Das Projekt mit dem gleich klingenden Akronym verwendet eine Grafik davon als Logo.

hen, die auf 70 000 Chips in 10 Server-Racks verteilt sind. SpiNNaker 2 wird demnach die neuronale Simulationskapazität um einen Faktor deutlich größer als 10 erhöhen.



10.3 Hicann-Chip für BrainScaleS 2

Zur Zeit besteht das Heidelberger „BrainScaleS-System“ noch aus 20 8-Zoll-Siliciumwafern. Man belässt also die einzelnen Chips gleich auf dem Wafer, der insgesamt aus 384 „Hicann-Chips“ (High Input Count Analog Neural Network) besteht. Die Chips werden in 180 nm-Pro-



Darstellung der **strukturellen Plastizität im BrainScale2-System**. Teile der präsynaptischen Adress-Speicher in den Synapsen werden durch die PPU verändert (links: gelbe Zahlen). Synapsen mit hoher Korrelation werden beibehalten (rechts: fettgedruckte Zahlen); Synapsen mit ungenügender Korrelation werden auf ein anderes präsynaptisches Neuron umgestellt (rechts: gelbe Zahlen). Links unten wurde eine etablierte synaptische Verbindung durch eine zufällige neue ersetzt (rechts: kursiv gelb).

zesstechnologie dargestellt. Da jeder Chip 512 Neuronen und 114 688 Synapsen simuliert, kommt das Gesamtsystem auf 3 932 160 Neuronen und 880 803 840 Synapsen.

Die nächste Generation ist aber bereits in Arbeit, wurde 2018 vorgestellt: Der Hicann-Chip, die 3. Generation, für das BrainScaleS-2-System. Es soll um 2023 als Großgerät in Betrieb gehen. Der Chip simuliert mit den typischen Mitteln der Silicium-Elektronik Eigenschaften von Pyramidenzellen. Diese Neuronen kommen nur in der Großhirnrinde und in der Amygdala (Mandelkern) von Säugetieren vor. Die Simulation bezieht sich auf solche in der fünften Schicht des kortikaler Säulen.

Die Strukturgröße des neuen Chips beträgt 65 nm. Das ermöglicht im Unterschied zu den Vorgänger-Chips zusätzliche Funktionalitäten. In dem Chip hat man zusätzlich zu dem Auftreten von Natrium-Ionenströmen (und damit -Spannungsspitzen, Spikes), die auch schon die Vorgängerversion beherrschte, die Funktion von Ionenkanälen modelliert, die auf Calcium bzw. NMDA (N-Methyl-D-Aspartat) aufbauen. NMDA-Rezeptoren gehören zu den ionotropen Glutamatrezeptoren, Ionenkanäle in der Zellmembran, die durch die Bindung ihres Liganden Glutamat aktiviert werden. Der Chip ist in der Lage, eine Koinzidenz-Detektion für eintreffende Spikes durchzuführen und auf diese Weise zu lernen.

10.3.1 Prozessor-Einheiten für Plastizität

Insbesondere verfügt er über eine Plasticity Processing Unit (PPU) für jede elektronische Synapsen-Einheit. Sie besteht aus einem SIMD-Mikroprozessor (single instruction multiple data, d. h. es werden mehrere Datenströme nach einer einzigen Rechenvorschrift prozessiert). Mit der PPU lassen sich nicht nur synaptische Gewichte beeinflussen, sondern auch Wachstums- und Verbindungsprozesse von Dendriden und Axonen simulieren (s. Abb.). Jede Synapse verfügt dafür über einen eigenen Speicher. Dieser speichert allerdings nicht nur das synaptische Gewicht, sondern auch die Adressierungen des präsynaptischen Neurons. Auf diese