

NZZ, 27.2.13

Gehirn-Simulationen – ein hindernisreicher Erkenntnisweg

Erfahrungen aus der Klimamodellierung zeigen, was man bei der Modellierung des Gehirns bedenken sollte

Computersimulationen gewinnen in der Hirnforschung zunehmend an Bedeutung. Aufbau und Zielsetzungen der Modelle sind aber unterschiedlich. Manche sollen etwa den Weg weisen, welche Prozesse im Gehirn experimentell untersucht werden sollen.

Markus Christen

Der Zuschlag der Europäischen Kommission zum «Human Brain Project» macht augenfällig: Auch die Hirnforschung setzt auf die enorme Rechenkraft moderner Computer, um Antworten auf grundlegende Fragen zu finden. Dies ist Teil einer umwälzenden Entwicklung. Drei der sechs Finalisten des europäischen «Flagship»-Wettbewerbs vertrauen massgeblich auf Simulationen für den Erkenntnisgewinn. Das In-silico-Experiment – also Versuche im Computer – wird nebst In-vitro- (im Reagenzglas) und In-vivo- (am lebenden Organismus) Versuchen zum dritten Standbein der Forschung.

Gehirn und Computer

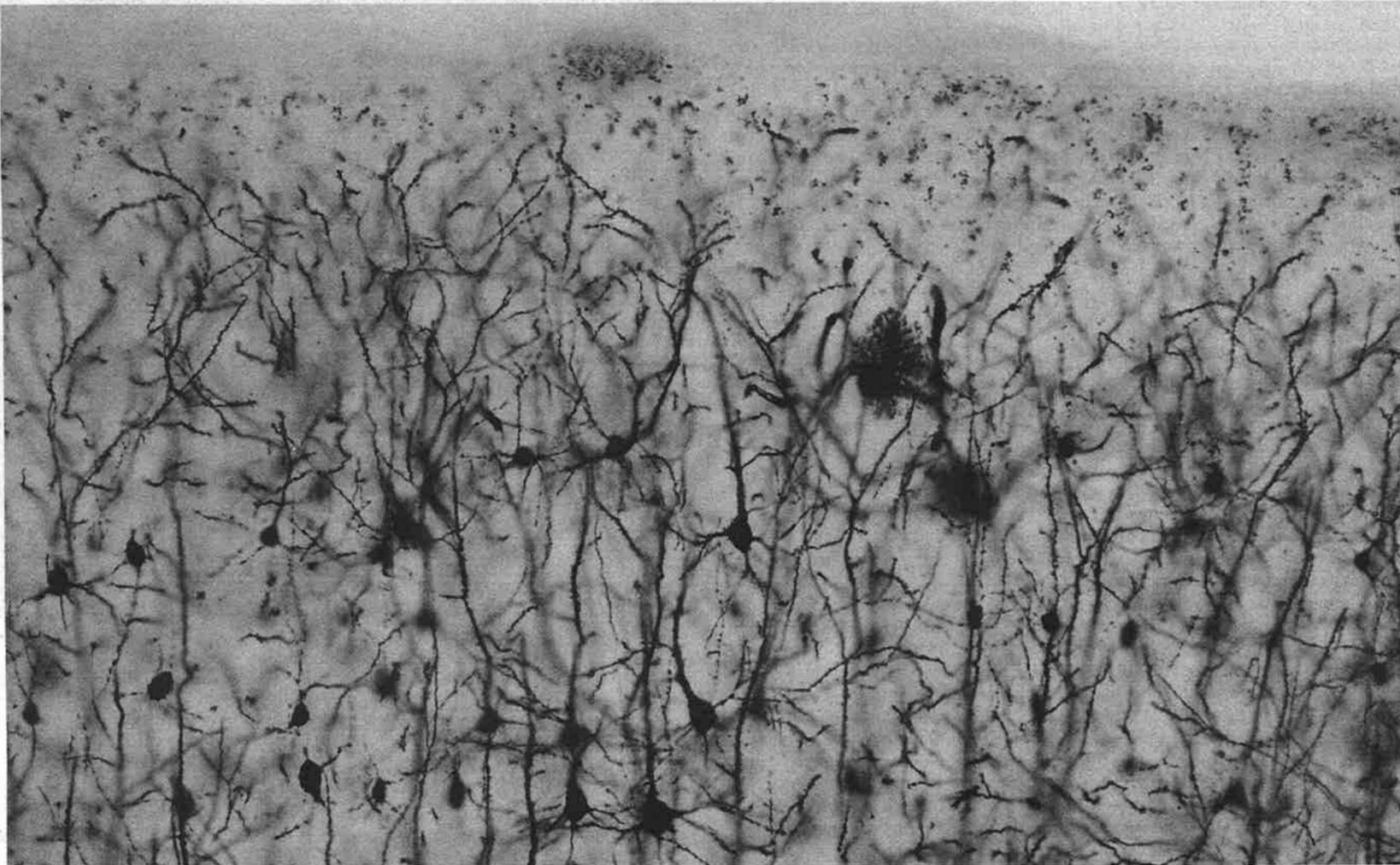
In der Hirnforschung ist die Rolle der Simulation besonders facettenreich, weil der Computer als Instrument der Simulation Gehirnmodelle inspiriert hat und umgekehrt das Gehirn als Vorbild für künstliche Rechner diente. Grössen wie John von Neumann und Alan Turing sahen im Gehirn eine Inspiration für die Entwicklung «elektronischer Gehirne». Gewiss war bald klar, dass digitale Rechner Informationen auf ganz andere Art verarbeiten als das biologische Vorbild. Die genauen Mechanismen der Informationsverarbeitung sind beim Gehirn im Detail unklar – die Kluft zwischen Mustern von Nervenimpulsen und dem Gedankengang, den sie repräsentieren, ist weiterhin gross. Es ist deshalb unstritten, wie weit die Informations-Analogie in der Hirnforschung trägt, wie die Philosophin Brigitte Falkenburg in einem jüngst erschienenen Buch ausführt.

Die enorme Effizienz des Gehirns – ein menschliches Gehirn benötigt lediglich eine Leistung von 30 Watt – ist aber Ansporn zur Entwicklung neuer Technologien. Unter dem Stichwort «neuromorphic engineering» arbeiten Wissenschaftler an Computerchips, die die Besonderheiten der biologischen Informationsverarbeitung nachbilden sollen. Man kann dies als eine Form von Hirnsimulation mittels Hardware ansehen. Die meisten heutigen Simulationen sind hingegen Software-basiert und in digitaler Technik implementiert. Die zum Einsatz kommenden Supercomputer nutzen dabei Prinzipien wie die parallele Informationsverarbeitung.

Unterschiedliche Ansätze

Um die Rolle von Modellen und Simulationen in der Hirnforschung zu verstehen, sind zwei Unterscheidungen wichtig, wie der Lausanner Physiker Wulffram Gerstner in einer jüngst erschienenen Arbeit in «Science» ausführt: die Komplexität des Modells und der Ausgangspunkt der Modellbildung. Beim Bottom-up-Ansatz baut man das Modell aus gut verstandenen Einzelteilen bzw. grundlegenden Prinzipien auf; beim Top-down-Ansatz versucht man, eine Systemfunktion zu reproduzieren.

Nur einfache mathematische Modelle können analytisch verstanden werden. Je realitätsgetreuer man das Gehirn nachbilden will, desto grösser wird die Komplexität. So gibt es auf der Ebene der Neuronen beispielsweise rund 200 verschiedene Typen von Ionenkanälen, die die elektrischen Eigenschaften der Neuronen bestimmen.



Ein umfassendes Modell des Gehirns muss Prozesse auf zahlreichen Ebenen berücksichtigen. Abgebildet sind Nervenzellen in der Hirnrinde.

SPL/KEYSTON

Die Unterscheidung zwischen bottom-up und top-down verweist auf eine besondere Schwierigkeit, mit der sich Hirn-Modellierer konfrontiert sehen. Prozesse auf zahlreichen Ebenen spielen eine Rolle: die molekulare, subzelluläre und zelluläre Ebene, die Ebene des lokalen Netzwerkes, des Netzwerkes zwischen Hirnregionen und der Verschaltung mit den Sinnesorganen und Muskeln. Gehirne sind zudem Teil sich verhaltender und sozialer Organismen. Gerstner sieht in Modellen ein Instrument, um diese Ebenen zu verbinden.

Bottom-up: das Blue Brain

Das ambitionierteste Bottom-up-Modell wird an der ETH Lausanne umgesetzt: das 2005 begonnene «Blue Brain Project», das die Basis für das «Human Brain Project» bildet. Es handelt sich dabei nicht um ein einzelnes Modell. Vielmehr geht es um den Aufbau einer Strategie zur Integration von Daten über alle Ebenen der Organisation des Gehirns – quasi ein gigantischer Wissenskorpus, aus dem die Wissenschaftler Modelle für bestimmte Zwecke herausziehen können. «Wir können nie alle Prozesse im Gehirn messen. Wir können aber aus den verfügbaren Daten und biologischen Prinzipien und unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen systematisch Modelle erzeugen, die Wissenslücken überbrücken und die relevanten Prozesse im Gehirn voraussagen. Danach können wir mit gezielten Experimenten im realen Gehirn prüfen, ob diese Voraussage und das damit erreichte Verständnis korrekt war», beschreibt Henry Markram die Strategie.

Derzeit ist «Blue Brain» in der Lage, eine Hirnregion, bestehend aus etwa 100 Kolumnen (eine Struktur im Cortex), nachzubilden, das sind rund eine Million Neuronen und eine Milliarde Synapsen. Das Modell soll möglichst genau die strukturellen Eigenschaften des biologischen Originals nachbilden – also beispielsweise die statistische Verteilung der Ionenkanäle auf den Neuronen, die räumliche Verteilung der Neuronen und deren Verknüpfung.

Einen anderen Ansatz verfolgt die im kalifornischen San Jose beheimatete

«Cognitive Computing Group» von IBM um den Computerwissenschaftler Dharmendra Modha. Auch diese Wissenschaftler betonen, es gehe um das Verständnis des menschlichen Gehirns, doch der Ansatz ist nicht vergleichbar mit Markrams Vorgehen. Die verwendeten Neuronen-Modelle sind deutlich einfacher – dafür ist das Modell quantitativ grösser. Aufsehen erregte 2009 die Veröffentlichung einer Simulation, die 1,6 Milliarden Neuronen und 8,87 Billionen Synapsen umfasste. Das ist etwa die Grösse der Hirnrinde einer Katze.

Beeindruckend an dieser Leistung war die computertechnische Leistung, eine derart grosse Zahl an Neuronen und Synapsen mit allen damit verbundenen Anforderungen an Berechnung (2×10^{13} synaptische Updates pro Sekunde), Speicherplatz (144 Terabytes) und Bitrate (10^{13} Impulse pro Sekunde) modellieren zu können. Inwieweit das Modell aber einen Erkenntnisgewinn für die Hirnforschung bringt, ist im Anschluss der Publikation kontrovers diskutiert worden. Zwar hat das Modell einige biologische Parameter implementiert, allerdings ähnelten die rhythmischen Oszillationen, die man als Output des Modells messen konnte, «eher

Epilepsie als einem Muster, das man einem echten Katzengehirn zuschreiben könnte», hielt der Hirnforscher Terry Sejnowski in einem Kommentar fest.

Ein drittes Beispiel ist das sogenannte Spaun-Modell der University of Waterloo in Kanada. Das aus 2,5 Millionen Neuronen bestehende Modell reproduziert mittels eines biologisch inspirierten neuronalen Netzes acht Funktionen des Gehirns, zum Beispiel die Mustererkennung, das Nachzeichnen einer Figur und das Beantworten einfacher Fragen. Teil des Modells sind eine Kamera als sensorisches System und ein (virtueller) Roboterarm. Die Tatsache, dass ein einziges System alle Aufgaben lösen konnte und damit die Flexibilität biologischer Gehirne simuliert, war die Innovation dieses Modells.

Der Studienleiter Chris Eliasmith erklärt die Bedeutung solcher Modelle: Simulationen hätten für die Hirnforschung eine ähnliche Bedeutung wie Theorien in der Physik. Sie seien testbare Hypothesen darüber, wie das Gehirn bestimmte Funktionen realisiert. In einem nächsten Schritt will Eliasmith's Team neuromorphe Computerchips in das Modell integrieren, um die Rechenzeit zu beschleunigen.

Was wird simuliert?

Wissenschaft generiert Erkenntnisse meist in Form von Modellen, die Wirkungszusammenhänge darlegen. Solche Modelle können als mathematische Gleichungen, als (Software-)Algorithmen oder physikalische Realisierungen vorliegen. Wird ein Modell derart implementiert, dass man das Verhalten des Modells in der Zeit untersuchen kann, spricht man von einer Simulation.

Simulationen dienen unterschiedlichen Zwecken: Im Fall einer Vorhersage kontrolliert man Input und Mechanismus und interessiert sich für den Output. Bei einer «Nachhersage» interessiert man sich bei definiertem Mechanismus und Output für den Input. Im Fall einer Erklärung sucht man bei bekanntem Input und Output nach dem Mechanismus.

Bei bestimmten Problemen herrscht Einigkeit über die grundlegenden Wir-

kungsmechanismen. Bei einem kosmologischen Modell ist das etwa das Gravitationsgesetz. Bei vielen Simulationen ist aber umstritten, welche der möglichen Prozesse, die bei einem Phänomen eine Rolle spielen könnten, in das Modell eingehen sollen.

Zudem können selbst bei Kenntnis der grundlegenden Mechanismen diese nicht immer in das Modell eingebaut werden, zum Beispiel wegen der begrenzten Rechengeschwindigkeit oder weil empirische Daten fehlen. Man greift dann auf sogenannte Parametrisierungen zurück, die eine hinreichende Approximation erlauben sollen. Dazu kommt, dass mathematische Gleichungen, die das Modell bilden, meist gar nicht exakt, sondern nur numerisch gelöst werden können. Die Simulation ist also nur eine Approximation des Modells.

Mit zunehmender Bedeutung von Simulationen in der Hirnforschung stellt sich die Frage, wie sich dies auf die Forschungspraxis auswirkt. Parallelen dazu finden sich in der Wetter- und Klimamodellierung, denn solche Modelle waren die ersten, die Mitte des 20. Jahrhunderts auf Computern umgesetzt wurden. Sie bilden den Kern heutiger Klimamodelle, die eine enorme politische Bedeutung erhalten haben.

Die Grenzen der Modelle

Die Sozialwissenschaftlerin Myanna Lashen hat bezüglich der Klimamodellierung einige kritische Punkte des Simulations-Ansatzes identifiziert: Erstens sind die Grenzen zwischen Modell-Ersteller und Modell-Nutzer schwammig, was Schnittstellen-Probleme mit sich bringt. Zweitens entfernen sich die Modellierer in der Ausbildung und Berufspraxis vom Phänomen, das sie untersuchen. Drittens sinkt die kritische Distanz der Modellierer zu ihrem Modell. Viertens entwickeln die mittels Simulationen generierten Resultate aufgrund von Visualisierungstechniken eine suggestive Kraft, die im wissenschaftlichen Alltag die Grenze zwischen Modell und Realität verwischen kann. Dazu kommt, dass der Programm-Code keinem Peer-Review unterliegt und eine Replikation der Modelle aufgrund des hohen Aufwandes praktisch nicht stattfindet. Ein Gegengewicht dazu bietet eine Vielfalt an Modellen: Wenn unterschiedliche Ansätze zu vergleichbaren Resultaten kommen, steigt das Vertrauen in die Resultate.

Solche Probleme dürften auch in der Neurowissenschaft virulenter werden, je grösser die Bedeutung von Simulationen wird. Dies kann Auswirkungen ausserhalb der Wissenschaft haben. Das «Human Brain Project» rechtfertigt die Investition öffentlicher Mittel damit, Ursachen von Krankheiten wie Depressionen oder Alzheimer zu finden. Es ist also nicht ausgeschlossen, dass Hirnmodelle dereinst eine ähnliche politische Bedeutung erhalten werden wie Klimamodelle. Ein Bewusstsein für die Herausforderungen des Simulations-Ansatzes wird dann zu einem Erfordernis.