

gien bediente: »Indeed, brain-research discourse is rife with metaphors and tropes, especially analogies between brains and technology, including, since the nineteenth century, what we may call media technology (phonograph, telegraph, telephone, internet).« (Lysen 2020, 19) Für die Geschichte der Computational Neurosciences trifft dies erst in einem zweiten Schritt zu, ihre Anfänge finden sich in einer Mathematisierung der Aussagenlogik, des Blicks, der Wahrnehmung und der methodischen Zugänge. Die Bedingungen heutiger Computermodelle und -simulationen wurden zwar erst in den letzten Jahren durch rechenstarke Computer und sogenanntes Machine Learning möglich, ihre erkenntnistheoretischen Spuren und Anleihen führen aber weit in die Geschichte der Mathematik und Logik und erst später auf die informationstechnischen Modelle der Kybernetik zurück.

Daher wird es in diesem Buch weniger um Ästhetik(-en) gehen (wiewohl Ästhetik im rancièreschen Sinne als Formen von Möglichkeitsräumen auch dieser Arbeit zugrunde gelegt wurde), sondern mehr um die mathematische Verfasstheit der Logik – im Sinne einer mathematisch induzierten Logik des Schließens und der Beweisführung.

## 1 Was sind Computational Neurosciences? Die Beschreibung eines Feldes und ihrer Methode

Die Welt der Computational Neurosciences, ebenso wie alle neurowissenschaftlichen Felder, die auf der Basis mathematischer Modelle arbeiten, ist eine Welt mit ganz eigenen logischen Schlussfolgerungen. Um diese Welt einer spezifischen, *wahrscheinlichen* Logik zu verstehen, soll in diesem Kapitel der Geschichte und Entstehung des Feldes nachgegangen werden. Versteht man die theoretischen Grundlagen dieser Wissenschaft, lassen sich die daraus resultierenden Schlussfolgerungen verstehen. Wie arbeiten und welcher Methoden bedienen sich die Computational Neurosciences? Wie unterscheiden sich die Computational Neurosciences von Computed Neurosciences, Cognitive Neuroscience, Neuroinformatik, Big Data Neurosciences, Theoretischer Neurowissenschaft, Philosophie des Geistes und künstlicher Intelligenz? Denn sie alle haben einen gemeinsamen Nenner: die Klärung der Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitung im Gehirn und die Lösung, dass das Gehirn *computations* anstellt, nicht nur als Methode, sondern auch als Modell und Metapher für die Funktionsweise des menschlichen Gehirns.

Computational Neurosciences gelten als Teilbereich der Physik/Physiologie. Gleichzeitig sind sie ein interdisziplinäres Feld, und wie genau eine Person die Computational Neurosciences versteht und betreibt, liegt meist in der Disziplin begründet, aus der sie kommt und die strukturiert, welche Art von Daten analysiert werden und mit welchen Modellen gearbeitet wird. In den Computational Neurosciences wird das Gehirn als informationsverarbeitende Maschine verstanden, und das Ziel ist es, herauszufinden, welche Art Berechnungen das Gehirn durchführt. Die übergreifenden Fragen lauten hier also: Wie rechnet das Gehirn? Welche Algorithmen benutzt es? Wie wird Information codiert und wie wird Information im Gehirn verarbeitet? Das wichtigste methodische Werkzeug zur Beantwortung dieser Frage in den Computational Neurosciences ist die mathematische Modellierung von Komponenten des Nervensystems wie Nervenzellen, Synapsen und Neuronalen Netzwerken mithilfe der Biophysik, dynamischer und komplexer Systeme und der Informatik. Computational Neurosciences heißt aber *nicht* allein Computer-gestützte Neurowissenschaft oder die Anwendung von Clusteranalysen oder Big-Data-Methoden. Auch wenn die Bereiche manchmal sehr nahe beieinanderliegen, denn all die genannten Teildisziplinen der Neurowissenschaft verwenden Modelle, die mit dem Computer simuliert und ausgewertet werden. Gleichzeitig wachsen die Bereiche auch durch die Verwendung ähnlicher mathematischer Neuronenmodelle enger zusammen. So beschreibt eine der von mir interviewten Personen die Situation folgendermaßen: »At my institute they have an A.I. program at the neuroscience institute, so there's lots of cross-over. And I think that, yet also the development of machine learning and of A.I. and the resurrection of neural network made sort of the marriage of these fields ›natural‹.« (Interview 6, 13 Min.)

Um noch etwas klarer das Interesse der Computational Neurosciences beschreiben zu können, möchte ich kurz die etwas vereinfachten, aber dem Verständnis dienlichen Ebenen der Neurowissenschaften vorstellen. Grob lassen sich folgende drei Ebenen in den neurobiologischen Untersuchungen des Gehirns ausmachen: Die ›obere‹ Ebene beinhaltet die Funktionen größerer Hirn-areale, etwa die speziellen Aufgaben verschiedener Gebiete der Großhirnrinde, also des Kortex oder der Amygdala. Die ›mittlere‹ Ebene beschreibt das Geschehen innerhalb von Verbänden von Hunderten oder Tausenden Zellen. Und die ›untere‹ Ebene umfasst die biochemischen Vorgänge in einzelnen Synapsen und Nervenzellen. Ein Großteil neurowissenschaftlicher Forschungen widmet sich der Untersuchung der oberen und unteren Ebene und erzielt hier bereits einige Fortschritte (vgl. Das Manifest 2013). Die mittlere Ebe-

ne, die die untere und obere Ebene miteinander verknüpft, ist noch kaum verstanden und damit fehlt bisher auch die Antwort auf die Frage, wie aus feuernden Neuronen und Synapsen höhere kognitive Fähigkeiten entstehen. Im Grunde genommen wollen die Computational Neurosciences jetzt Antworten für die sogenannte mittlere Ebene der Hirnforschung finden: Es geht darum, Neuronenmodelle zu beschreiben, die verstehen lassen, wie es ausgehend von der Aktivität einzelner Neuronen zu den Feuerungsraten ganzer Neuronennetzwerke kommt. Oder wie die Neuronalen Netzwerke gestaltet sein müssen, um Prozesse wie Lernen, Denken und Wahrnehmen zu meistern.

Der Fokus der Computational Neurosciences liegt dezidiert in den biologischen, bio-chemischen und funktionsmorphologischen Eigenschaften der Neuronen und den neuronalen Bündnissen, die sie eingehen. Ausgehend von diesen Daten, werden in den Computational Neurosciences Neuronenmodelle erdacht, mathematisch-stochastisch ausgearbeitet und formuliert sowie simuliert. Dazu gehören zum Beispiel die Berechnung der Membrandurchlässigkeit der Ionenkanäle in den Synapsen, aber auch schematischer die Architektur kleiner neuronaler Einheiten, die Informationen in rekurrenten Systemen verarbeiten. Die Computermodele können, müssen aber nicht, auf Daten aus Experimenten zurückgreifen, wie zum Beispiel die Ableitung synaptischer Feuerungsraten.

Die Berechnungsmodelle der Computational Neurosciences beruhen auf den Beschreibungen der Feuerungsrate eines einzelnen Neurons. Ab den 1950er-Jahren bestand die Möglichkeit, kleinste Elektroden in einzelne Nervenzellen einzuführen, sodass die experimentellen Daten einzelner Synapsen abgeleitet werden konnten. Gegenwärtige Studien und Simulationen in den Computational Neurosciences wollen das Zusammenspiel der Nervenzellen in ihren Netzwerken berechnen. Hierfür wurden neue Methoden wie das Optical Imaging entwickelt, mit dessen Hilfe viele Feuerungsraten gleichzeitig gemessen werden können. Obschon diese Methoden und Technologien zur Verfügung stehen, ist ihr flächendeckender Einsatz in den Computational Neurosciences eher Zukunftsmusik denn gegenwärtige Realität. Ein Großteil der abgeleiteten Neuronenantworten stammt noch aus der Ableitung der Feuerungsraten singulärer Neuronen in Tierversuchen. Das heißt, die Mehrzahl der Neuronenmodelle basiert auf dem Verhalten einzelner Neuronen, und für die Verwendung dieser Daten braucht es wiederum Modelle, die aus der einzelnen Antwort die Antwort eines ganzen Neuronenbündels berechnen. Zentral hierfür sind die sogenannten Spikes, das heißt kurze

elektrische Pulse, die von einem Neuron zu einem anderen gesendet werden. Über diese meist binär codierten elektrischen Zustandsänderungen wird neuronale Kommunikation modelliert.

Und dann nehmen wir Modelle, die jetzt vereinfacht die Aktionspotenzial-generierung – also die Generierung von Spikes beschreiben; die sogenannten Integrate and Fire-Modelle. Diese lassen sich mithilfe von Differenzialgleichungen beschreiben. Das ist eine Gleichung, die den zeitlichen Verlauf von dem Membranpotenzial bestimmt, in Abhängigkeit von den Inputs. Und wenn es dann eine Schwelle gibt, dann gibt es einen Spike, das Membranpotenzial wird dann zurückgesetzt auf einen negativen Wert und dann geht das Spiel von vorne los, das Neuron oder die Gleichung integriert wieder alle Inputs, bis die Schwelle wieder erreicht wird, und dann gibt es wieder einen Spike. Und immer wenn es einen Spike gibt, dann gibt es auch einen Effekt auf andere Neuronen. Die Art der Effekte wird dann wiederum durch die neuronalen Verbindungen in dem Netzwerk bestimmt. Das heißt, wenn zwei Neuronen verbunden sind und das vorgeschaltete Neuron einen Spike hat, dann ändert sich das Membranpotenzial in dem nachgeschalteten Neuron auf eine bestimmte Weise. Das erhöht sich zum Beispiel, macht einen Sprung. Damit kann man modellieren, wie dann eine Synapse funktioniert. Und wichtig ist am Ende, wie viel Strom, was für Strompulse in so eine Zelle reinkommen, oder wie sich das Membranpotenzial ändert, also die Antwort auf ein Spike des vorgeschalteten Neurons. (Interview 7, 31. Min.)

Mathematische Modelle sind die Grundlage jeglicher weiterer Wissensproduktion in den Computational Neurosciences. Die Vorannahmen fließen direkt in die Daten ein. Eine geringfügige Datenlage ist hierfür kein Problem, alle weiteren angenommenen »Ereignisse« werden hinzugerechnet.

Die Umsetzung der informationsverarbeitenden Algorithmen basiert in den Computational Neurosciences auf Stochastik. Neuronale Netzwerke (im Folgenden als Eigenname großgeschrieben und synonym mit Neuronalen Netzen und Neuronalen Systemen verwendet) werden als stochastische Prozesse beschrieben, das heißt, es handelt sich um nicht lineare, komplexe Prozesse, die in ihre Berechnung Zufallsvariablen miteinbeziehen. Stochastik ist die Verbindung von Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie, die ihre Aussagen als Vorhersagen über das Eintreten eines bestimmten Ereignisses in die Zukunft verlagern. Die oft zitierte »Lebensweisheit« »trau keiner Statistik, die du nicht selbst gefälscht hast« drückt das Unbehagen aus, das statistischen Berechnungen mit ihren vielen Fallstricken wie Unterkomple-

xität, Schwierigkeit der Variablenbestimmung, Validität der Aussagen und der Frage, welche der gefundenen Korrelationen eine ernst zu nehmende Aussage über den Untersuchungsgegenstand verspricht, zugrunde liegt. All diese Fallstricke sind fundamentale erkenntnistheoretische Überlegungen, die in der Geschichte der Wahrscheinlichkeitstheorie und der Statistik noch angelegt sind, aber in der allgegenwärtigen Anwendung der Stochastik kaum noch eine Rolle spielen. Die Statistik hat sich unter neuen, mathematisierten Vorzeichen als Stochastik flächendeckend in der Wissensproduktion der Computermodelle und Simulationen durchgesetzt, ohne dass dies als Methodik ausgewiesen würde. Das wirft mitunter die epistemisch höchst aktuelle Frage auf, wie das Verhältnis von Korrelation und Kausalität verhandelt wird, wenn die Stochastik und die daraus entstandenen künstlichen Neuronalen Netzwerke Korrelationen behaupten, indem sie Vorhersagen treffen, die Frage von Kausalität aber nicht mehr diskutiert wird.

## 2 Die Hirnforschung und die Mensch-Maschine-Allegorie

Der Wunsch, das komplexe Gefüge des Gehirns und des Denkprozesses zu formalisieren, ist Jahrhunderte alt. Der Mathematiker und Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) entwickelte nicht nur das Dualsystem, das heute als die mathematische Grundlage für die Entwicklung von Lochkarten und späteren Rechenmaschinen und Computern gelten kann. Auch beschäftigte er sich bereits mit der Frage, wie Maschinen mit expliziten Denkgeregeln ausgestattet werden können. Ähnlich Ada Lovelace (1815–1852), die heute vielen als erste Programmiererin bekannt ist; sie verband ihre Überlegungen zu Rechenmaschinen mit der Frage nach der Funktionsweise des Gehirns. Lovelace entwickelte in ihrer Übersetzung von Charles Babbages Beschreibung der Differenzmaschine (engl. analytical engine) einerseits eine Art Programm für die *Analytical Engine* von Babbage, während sie gleichzeitig (um 1843/44) auch an der Skizze eines mathematischen Modells für die Funktionsweise des Nervensystems saß (»a calculus of the nervous system«) und an der Frage, wie das Gehirn Gedanken und wie Nerven Gefühle hervorbringen. Diese ersten philosophischen Zeugnisse des Mensch-Maschine-Vergleichs können als Versuche gelten, sich den Abläufen des Gehirns auf der Ebene der Logik zu nähern. Die Parallele zur Maschine begründet bis heute die Modellbildung in den Neurowissenschaften und wird durch das gegenwärtige Comeback der als Konnektionismus bezeichneten Theorie aktuell wieder verstärkt. Der Konnektionis-