matisierung‹ die zweckrationalistische Verfasstheit von Vernunft um die epistemischen Effekte der Mathematischen Logik.

2 Mathematisierung der Wahrnehmung. Von der Automatisierung des Denkens zum informierten Fühlen von Fakten

All science as it grows toward perfection becomes mathematical in its ideas – Whitehead 1911, 14

Für das hier im Folgenden vorgestellte Konzept einer Mathematisierung der Wahrnehmung stellt sich nun konkret die Frage, welcher Bereich der Mathematik die Grundlage für die behauptete Mathematisierung bildet. Und welchen Mehrwert hat die Geschichte der Mathematik für das Verständnis der (Computational) Neurosciences und der eher in der KI verorteten ›Neuronalen Netzwerke‹, die wiederum als Modelle und in Form von selbstlernenden Algorithmen aus den Neurowissenschaften heraus begannen, ein mathematisches, konnektionistisches Eigenleben zu führen?

Der Kybernetiker Norbert Wiener wirft einen Blick in die Technologiegeschichte und hält fest: »Wenn das 17. und das frühe 18. Jahrhundert das Zeitalter der Uhren war und das späte 18. und das 19. Jahrhundert das Zeitalter der Dampfmaschinen, so ist die gegenwärtige Zeit das Zeitalter der Kommunikation und der Regelung.« (1992, 74) Gleichzeitig sieht der Vordenker von gegenwärtig im Aufschwung begriffenen künstlichen Intelligenzen und neuronalen Netzen die Anleihen der Kybernetik in der Mathematischen Logik und bei Leibniz.

> An diesem Punkt kommt ein Element hinzu, das wiederholt in der Geschichte der Kybernetik auftritt – der Einfluß der mathematischen Logik. Wenn ich unabhängig von der Geschichte der Wissenschaft einen Schutzpatron für die Kybernetik wählen sollte, würde ich Leibniz nennen. (Ebd., 40)

Wiener nennt Leibniz nicht zufällig, denn dieser hat bereits einige mathematische Vorannahmen getroffen, die sich später auch in der Kybernetik wiederfinden. Zu nennen sind hier etwa: die von Leibniz erstmals initiierte Formalisierung hin zu einer Mathematischen Logik; seine Absicht, eine universelle Sprache einzuführen zum besseren Verständnis logischer Prozesse; seine Vorstellung von umfangreichen mathematischen Beweisen, für deren Berechnung er bereits kalkulierende Rechenmaschinen empfahl; sowie der Wunsch nach einer umfangreichen, möglichst umfassenden Enzyklopädie, die sich heute in Form des Internets ein Stück weit bewahrheitet hat.

Seit Wieners Einschätzung vom ›Zeitalter der Kommunikation und der Regelung‹ ist viel passiert, insbesondere die von Wiener theoretisch mitgestalteten Neuronenmodelle wurden konsequent weiterentwickelt, gestützt durch einen enormen Technisierungsschub leistungsstarker Computer. Gleichzeitig ist das kybernetische Erbe in den gegenwärtigen Neuronenmodellen nach wie vor präsent: die mathematische Verfasstheit der Regelungsmechanismen, die heute als stochastische Berechnungen in den parallel geschalteten Einheiten die Weitergabe von Information regeln, ebenso wie die auf Aussagenlogik beruhende Algebraisierung der Kommunikationstechnologien.

Das Konzept der Mathematisierung von Wahrnehmung verknüpft die Geschichte der Mathematischen Logik mit der Implementierung selbiger in die Neuronenmodelle der Computational Neurosciences, aber auch darüber hinaus in die auf künstlicher Intelligenz basierenden Technologien, um auf die Bedingungen gegenwärtiger Erkenntnisprozesse aufmerksam zu machen. Mathematisierung der Wahrnehmung stellt eine neue Form der Objektivität dar, eine Objektivität, die ihre Spuren vor vielen Jahren gelegt hat, aber erst jetzt, unter anderem durch die starke Rechenleistung heutiger Computer, zu ihrer vollständigen Implementierung in Erkenntnisprozesse geführt hat. Im Anschluss an Lorraine Dastons und Peter Galisons Projekt, eine Geschichte der *Objektivität* (2017) zu schreiben, lässt sich als Effekt einer Mathematisierung der Wahrnehmung aktuell ein weiteres Zeitalter ausmachen, nämlich das der stochastischen Objektivität. Die technische Verschmelzung der Analyse riesiger Datenmengen mit statistischen-stochastischen Wahrscheinlichkeitsrechnungen, die in den letzten Jahren stattfand, hat zu verobjektivierten Bedingungen der Erkenntnisapparaturen geführt.

Für die Erfassung der Mathematisierung der Wahrnehmung orientiere ich mich an der von Nikolas Rose und Joelle Abi-Rached zur Untersuchung der Neurowissenschaften eingeführten Methodologie. Neurowissenschaftliche Wissensproduktion, so der Gedanke, lässt sich anhand dreier Zugänge erfassen: der Verortung in Raum und Zeit, der verwendeten Technologien und der Praktiken, die sich in der Erkenntnisproduktion herausgebildet haben (*spatial/temporal, technological, practicing* [Rose/Abi-Rached 2013, 55]). Die methodologische Klassifikation der drei Ebenen zeichnet sich nicht durch klar abgrenzbare Bereiche aus, sondern hilft im Gegenteil zu erkennen, wie stark die Konzeptionen der einzelnen Bereiche miteinander verknüpft sind. Gleichzeitig werde ich im Folgenden für alle drei Bereiche nachweisen, wie stark sich mathematische Vorstellungen in den Untersuchungsgegenstand eingeschrieben haben und weshalb demzufolge von einer Mathematisierung gesprochen werden kann.

Bezüglich der Verortung in Raum und Zeit zeigt die historische Analyse, »dass das Gehirn, bevor es zum Raum wurde, der vermessen und abgebildet werden konnte, zunächst als ein zusammenhängendes, eigenständiges Organ gedacht werden musste« (Fitsch 2014, 230). Und nicht nur das Gehirn musste als ›Denkraum‹ ausgewiesen werden, auch die Bestimmung Neuronaler Netze erfolgt über ihre räumliche und zeitliche Struktur. Die Kybernetik zieht die aus der Elektronik bekannte Reihenschaltung als räumliche und zeitliche Ordnungsstruktur heran, die das hintereinander geschaltete Verarbeiten von Informationen erklären soll. Schnell wird die ›Architektur‹ der neuronalen Netzwerke komplexer gefasst. Die Parallelverarbeitung in vielen miteinander verschalteten, aber selbstständig gefassten, selbstorganisierten Netzwerken verweist auf die Hardware-Software-Struktur moderner Computer. Das Addieren und Subtrahieren sowie Hemmen von Informationen und Reizen sind hierbei wichtige Schlagworte. Gleichzeitig kam es durch die Einführung der Infinitesimalrechnung und später der Wahrscheinlichkeitsberechnungen zu einer Neuordnung von Zeitlichkeit. Bei der Infinitesimalrechnung steckt die Unendlichkeit schon im Namen, mit der sich unbekannte Variablen aufgrund der Zerlegung der Welt in unendlich viele, kleine Teile berechnen ließ. Die unterteilten Abschnitte können als eigenständig berechenbare Variablen in einer Gleichung hintereinander berechnet werden und gleichzeitig am Ende etwas Zusammenhängendes, zum Beispiel eine Kurve, beschreiben. Sie können darüber hinaus Teilbereiche definieren, differenzieren, ihre Relationalität in den Unendlichkeitsraum verlegen und über die Integration geometrischer Funktionen die Variablen wieder einholen, angleichen und gleichmachen. Im 20. Jahrhundert forderte die Wahrscheinlichkeitstheorie als die wichtigste Zutat aktueller stochastischer Berechnungen die Raum-Zeit heraus. Die Wahrscheinlichkeit ist hier nicht mehr zeitlich oder räumlich konnotiert, im Sinne einer ewig währenden Zeit oder den unendlichen Weiten des Universums, sondern eines Tuns. Das Gesetz der großen Zahl verlangt möglichst viele, unendlich viele Durchgänge, etwa eines Würfelwurfs, um den Wahrscheinlichkeitswert, eine Sechs zu würfeln, bei 1/6 zu stabilisieren. Jede stochastische Berechnung oder auf Wahrscheinlichkeit basierende Simulation geht von einem angenäherten Wert aus, den es stabil nur in der unendlichen Wiederholung einer Handlung gibt. Für den in den Neurowissenschaften und den Neuronenmodellen ebenfalls weithin verwendeten bayesschen Wahrscheinlichkeitswert stimmt diese klare Verlagerung ins Unendliche jedoch nicht, verknüpfte Bayes doch die Wahrscheinlichkeit mit einem Erwartungswert, der sich wiederum aus gemachten Erfahrungswerten speist und sich damit der Statistik und der gaußschen Normalverteilung wieder annähert. Hieran wird deutlich, dass es sehr unterschiedliche Wahrscheinlichkeitskonzepte gibt, die jeweils gleichberechtigt in den Neurowissenschaften verwendet werden. Gleichzeitig werden diese oft nicht transparent ausgewiesen, noch ihre erkenntnistheoretischen Implikationen berücksichtigt.

Die verschiedenen Zugänge über die verwendeten Technologien und Praktiken lassen sich kaum voneinander trennen: Die Mathematisierung der Technologien in den Computational Neurosciences ist vielfältig und lässt sich schwerlich von der Ebene der entwickelten (Untersuchungs-)Praktiken unterscheiden, sind doch die erkenntnisleitenden Praktiken, gerade in den computerbetriebenen wissenschaftlichen Disziplinen, auf sinnstiftende (Computer-)Technologien angewiesen. Als Beispiel kann hier der mathematische Beweis herangezogen werden, der heute von Computern durchgeführt wird. Der mathematische Beweis ist eine wichtige Praktik, die die Mathematik als objektive und der Logik verpflichtete Disziplin auszeichnet und ihr Ansehen begründet. Dieses Ansehen überträgt sich auf auch auf Computermodelle und rechnergestützte Simulationen, basieren sie doch auf mathematischen Berechnungen und der darin eingeschriebenen Mathematischen Logik. Sie generieren nicht nur das Wissen über biologische neuronale Netzwerke, indem sie versuchen, deren Funktionsweise nachzubauen, sondern sie bestimmen auch darüber, was von der synaptischen Tätigkeit sichtbar gemacht wird beziehungsweise was als für die Informations- und Reizverarbeitung notwendig angesehen wird. Die Modellierung Neuronaler Netzwerke speist sich einerseits aus den numerisch bezifferten Werten biochemischer Messungen der Membrandurchlässigkeit, der Ionenkanäle etc. und andererseits aus der Systematik mathematischer Gleichungen, die den Ablauf der Feuerungstätigkeit von der Synapse über die nächste Synapse hin zu größeren Neuronenverbänden gewissermaßen in Form einer mathematischen Formel nachzeichnet. In eben diese Vorannahmen darüber, welches synaptische Verhalten für die neuronale Vernetzung wichtig ist, über die Struktur neuronaler Netze und über ihre Kommunikationswege und -formen sind ganz konkret mathematische Modelle eingeflossen. Das Hodgkin-Huxley-Modell ist eine von verschiedenen formalisierten Vorlagen, die zur Berechnung bestimmter Teilbereiche neuronaler Netzwerktätigkeit herangezogen werden kann. Mit Hilfe dieser Modelle können Experimentalanordnungen mathematisiert und in die Berechnungsstrukturen von Computermodellen implementiert werden.

Wichtig für ein Verständnis der Mathematisierung der Wahrnehmung sind einerseits die erkenntnistheoretischen Effekte, die sich durch theoretische Vorannahmen in das Wissen über den Menschen und das Gehirn einschreiben. Andererseits werden die mathematisch-statistischen Formalisierungen in die wissensgenerierenden Technologien eingeschrieben und werden so zu einem universalen Werkzeug. Der Mathematisierung der Wahrnehmung immanent ist eine formalisierte Mathematik, die sich an physikalischen Prozessen orientiert. Die Philosophin und Wissenschaftstheoretikerin Gabriele Gramelsberger nennt dies eine »physikaffine Mathematik« (2020, 392). Daran aber, so Gramelsberger weiter, »laboriert die Biologie, der ein wesentlich komplexerer Prozess- und Ordnungsbegriff wie auch Identitätsbegriff zugrunde liegt.« (Ebd.) Das heißt, um biologische neuronale Netzwerke zu beschreiben, ist die physikaffine Mathematik, wie sie hier im Buch vorgestellt wurde, kaum geeignet.

Wie ich in Kapitel 1 und 2 zeigen konnte, ist die Ideengeschichte der Mathematik und der Logik eng mit den Vorstellungen über die Funktionsweise des Geistes verbunden. Das lässt sich auch für die aktuellen Modelle kognitiver, neuronaler Verarbeitung aufzeigen. Der Konnektionismus verankert nicht nur eine bestimmte Art der Reizverarbeitung durch die Funktionsweise vorhersagender neuronaler Netze im menschlichen Gehirn, sondern implementiert hierdurch eine ganz bestimmte Mathematische Logik in die Modelle des Denkens. Die essenzielle Suche in den computerbetriebenen Neurowissenschaften konzentriert sich auf den Mechanismus, mit dem das Gehirn Entscheidungen trifft, und darauf, welche Art von Entscheidungsstrukturen Neuronale Netzwerke aufbauen, um Entscheidungen treffen zu können. ›Entscheidung‹ wiederum meint hier nicht abzuwägen, welche Entscheidung richtig oder falsch ist. Jede Einheit eines – artifiziell wie organisch modellierten – Neuronalen Netzwerks trifft beständig Entscheidungen, indem sie prüft, ob ein Reiz unverändert weiterverarbeitet werden kann, weil er der Kausalmatrix des entsprechenden Netzwerks entspricht, oder ob eine Fehlerkorrektur erfolgen und der Reiz zurück ins Netzwerk gespeist werden muss. Diese Entscheidungen werden – so die Vorstellung der Computational Neurosciences – aufgrund von Wahrscheinlichkeiten vorgenommen, also von

Ähnlichkeitsparadigmen, die darüber Auskunft geben, wie ähnlich die jeweils zu verarbeitenden Reize dem bereits programmierten Muster sind.

Stochastische Berechnungen sind das Mittel zum Zweck in den Computational Neurosciences, der Neuroinformatik, der Neurobiologie – eigentlich in allen Disziplinen, die mithilfe von Computermodellen und Simulationen Daten analysieren und modellieren. Dennoch lassen sich innerhalb dieses Feldes fundamentale Unterschiede ausmachen, wie und vor allem mit welchem Selbstverständnis welche Wahrscheinlichkeitsannahmen und stochastischen Kalküle angewendet und verallgemeinert werden. Insbesondere lassen sich Unterschiede in den Annahmen über die neuronale Architektur feststellen, innerhalb derer die mathematische Prozessierung vorhersagender Entscheidungsmuster stattfindet. Stochastik stellt den epistemologischen Rahmen für die Modellierung, innerhalb derer Daten eingebunden, analysiert und ausgewertet werden. Stochastische Prozesse helfen dabei, das Gehirn »als ein extrem komplexes System zu verstehen, das aus ganz vielen Elementen besteht, und erst in dem Zusammenwirken dieser Elemente entstehen kollektive Effekte« (Interview 2, 1:25:00). Stochastisch bedeutet zufällig, weshalb Stochastik auch als Mathematik der Daten und des Zufalls bezeichnet wird. Sie fasst, wie bereits ausgeführt, die Wahrscheinlichkeitstheorie und die mathematische Statistik zusammen. In stochastischen Berechnungen stellt die Wahrscheinlichkeitstheorie die Prämissen für die mathematische Modellierung von Vorgängen bereit. Auf der Grundlage dieser Prämissen liefert die Statistik Verfahren, um aus Beobachtungsdaten Modellparameter zu bestimmen und Aussagen über die Angemessenheit der Modellierung machen zu können. Mittels stochastischer Prozessberechnungen können experimentelle Beobachtungsdaten mit bereits existierenden und funktionierenden Modellen kombiniert und analysiert werden. Die Analyse findet dabei über die Einbindung in ein Computermodell oder eine Simulation statt, deren Verhalten und Effizienz geprüft werden, wodurch den Daten eine Bedeutung zugewiesen wird. Auswertung bedeutet in diesem Zusammenhang das Vorhersagen von Verhalten. Die Computational Neurosciences zum Beispiel greifen, wie am Neuronenmodell von McCulloch und Pitts beschrieben, für ihre Modellierungen auf Daten aus der Biologie und aus biochemischen Prozessen zurück.

Andere Herangehensweisen an stochastische Prozesse erfordern andere Modelle: stochastische Prozesse, das heißt Zufallsprozesse, und eine nicht lineare Dynamik. Das sind zwei sehr wichtige Felder, um neurobiologische Systeme zu verstehen. Stochastizität ist die Grundlage für das Modellieren und Simulieren, aber auch für das Verständnis neuronaler Systeme. Welche Prozesse als stochastisch gefasst werden, das bestimmt das Modell beziehungsweise die Tatsache, ob Daten oder Werte eines bestimmten Prozesses mithilfe anderer Methoden oder Experimentaltechnologien abgeleitet werden konnten. Stochastische Prozesse sind auch an der Modellierung und Berechnung künstlicher neuronaler Netzwerke beteiligt. Gleichzeitig verwenden nicht alle Forscher*innen der Computational Neurosciences das gleiche Modell künstlicher neuronaler Netzwerkalgorithmen (s. Kap. 2).

In dem Modell artifizieller neuronaler Netzwerke bestimmt sich die Architektur, also das Netzwerk selbst, aus zufälligen Prozessen. Das ist aber nicht immer der Fall. In den datengetriebenen Modellierungen der Computational Neurosciences werden bestimmte Prozesse als stochastisch definiert, andere, wie etwa das Netzwerk, als statisch angenommen. Eine von mir interviewte Person erläuterte das folgendermaßen:

> Wenn man ein Netzwerk aus Neuronen hat und die Neuronen sind die Knoten von diesem Netzwerk und die Synapsen deren Verbindung, und diese einzelnen Knoten, die werden jetzt beschrieben durch das Membranpotenzial von unserem Neuron, das macht Spikes und das ist ein dynamischer Prozess und dieser dynamische Prozess, der ist stochastisch. Die einzelnen Neuronen, die sind stochastisch, aber die einzelnen Netzwerke, die werden größtenteils als statisch betrachtet. Die Konnektivität zwischen den Neuronen, die wird oftmals als stationär angenommen, obwohl das natürlich nicht stimmt. Auch die Synapsen – die Verbindung, die ändern sich sowohl abhängig von Erfahrung und Lernen und so, also das ist natürlich ein wichtiges Thema in C.N., das heißt synaptische Plastizität, dass sich die Synapsen und die Verbindungsstärken selbst verändern, aber auch, da gibt's auch selbst Zufälligkeit in den Verbindungen. Aber wenn man, wenn ich meistens drüber nachdenke, über die Zufälligkeit und die Stochastizität, denke ich, dass die einzelnen Neuronen, dass die stochastisch feuern. Und das ist die Stelle, in der das Rauschen ins Nervensystem kommt (Interview 2, Min. 13f.).

Das Modell der künstlichen Feedforward-Netze greift auf Modelle der Kognitionspsychologie zurück, insbesondere das im Anschluss an Überlegungen von Helmholtz von den Wissenschaftlern als ›Helmholtz-Maschine‹ (Dayan et al. 1995) bezeichnete Neuronenmodell, in dem das Gehirn Reize über Abgleiche verarbeitet, um anhand von Modellen mögliche Ursachen vorherzusagen und in das System als Fehlerkorrektur wieder einzuspeisen (vgl. Clark 2013, 182). Neu ist allein der Gedanke der Backpropagation (Fehlerrückführung), die über die spezifische Anordnung kleiner kaskadischer Einheiten im Top-down-Verfahren Fehler korrigieren und diese Behebung in das nächste System weitertragen, die also das ›eigenständige‹ Lernen neuronaler Netzwerke erklären soll.

Die Mathematisierung von Wahrnehmung drückt die allumfassende Implementierung mathematischer Logiken und Prämissen in heutige erkenntnisleitende Werkzeuge, Theorien und Modelle sowie die verwendeten Technologien aus. Die Theorien und Methoden sind durchdrungen von mathematischen Logiken, rational-logischen Abläufen und statistischen Vorhersagen. Im Folgenden werden die Effekte der Mathematisierung am Beispiel des algorithmischen und des vorhersagenden Gehirns vorgestellt.

3 Etwas Besseres als die Natur? Effekte der Mathematisierung von Wahrnehmung: *algorithmic* und *predictive brain*

Computational Neurosciences sind nicht nur ein erstaunlich interdisziplinär arbeitendes Feld, auch die Bezüge in andere Teilbereiche der Hirnforschung treten deutlich zutage. Allianzen und Überschneidungen gibt es nicht nur mit experimenteller Mathematik, Informatik, theoretischer Physik, Neuroinformatik und künstlicher Intelligenzforschung, die Debatten über die physische Verfasstheit des Gehirns reichen auch in die Psychologie, die Philosophie (des Geistes) und die Kognitionswissenschaften. Aus einigen Überschneidungen der Teilbereiche sind wiederum neue Subdisziplinen entstanden. Die Neurowissenschaft konnte sich so einerseits zu einer eigenständigen Disziplin herausbilden, die sich mit dem Gehirn beschäftigt, gleichzeitig deckt die Bezeichnung ein enorm breites Feld mit vielen Unterdisziplinen und methodischen Zugängen ab, die teilweise ein ähnliches, aber mitunter auch völlig unterschiedliches Verständnis des Gehirns, des Mentalen, der Psyche und der jeweiligen zerebralen Prozesse beinhalten. Der Fokus dieses Buches liegt nur auf einem sehr kleinen Bereich dieses breiten Feldes, auch, und das wurde auf den letzten Seiten hoffentlich deutlich, wenn es immer wieder konzeptionelle wie theoretische Überschneidungen gibt und epochenabhängige Tendenzen, in denen sich eine mathematische Mechanik des Geistes durchsetzte.

Hinter die heute wohl unumstrittene »Einsicht, dass niemand ohne Gehirn denken könne« (Fitsch 2013, 5), dass es also das Gehirn ist, das Gedanken, Gefühle, Bewusstsein und Erinnerung hervorbringt, kann nicht mehr zurückgegangen werden. Ebenso hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass für die