

# **Kapitel 2: Zeit der Umbrüche**

---

## **1 Zeit der Übersetzungen**

Im ersten Kapitel wurden die Anfänge der symbolisch-mathematischen Logik umrissen, mit ihr die sukzessive Neuausrichtung der Logik als erkenntnistheoretisches Werkzeug in der Physik und physikalischen Experimenten. Unter Mathematik wird im Zusammenhang mit mathematischer Logik nun nicht mehr allein die Disziplin, die mit Zahlen arbeitet, verstanden, sondern die Wissenschaft, die auf Gleichungen, infinitiven und differenzialen mathematischen Gesetzmäßigkeiten und der Verwendung einer symbolischen Sprache beruht. Das erkenntnistheoretische Tool der symbolisch-mathematischen Logik eröffnete neue empirische Zugänge zur Vermessung des Menschen und der Welt, die wiederum ganz konkret zur induktiven Methode und der Herausbildung naturwissenschaftlicher Disziplinen führte. Während die im ersten Kapitel geschilderten Entwicklungen vor allem der wissenschaftlichen Rhetorik des Reduktionismus zuzuschreiben sind, geht es in diesem Kapitel um die Ansätze, die eine Erweiterung des Reduktionismus anstreben und die sich im Allgemeinen der Komplexität verschrieben haben. In der weiteren Geschichte der Implementierung mathematischer Logik ist die Richtung allerdings linear: Die Versuche, Komplexität mathematisch und statistisch einzufangen, bauen auf den Vorannahmen des Reduktionismus auf, das heißt, das, was vormals formalisiert und habhaft gemacht worden war, wurde unter Zuhilfenahme von Wahrscheinlichkeitsrechnung und Stochastik einer vermeintlichen Komplexität zugeführt. Und so sind auch Neuronale Netzwerke letztlich ein Versuch, ›Komplexität‹ mathematisch einzufangen. Gleichzeitig basieren die Modelle künstlicher Neuronaler Netze auf einer mathematischen Verfasstheit von epistemologisch entscheidenden Konzepten der Komplexität, der Wahrscheinlichkeit, aber auch von Zeitlichkeit und Zufall

(s. hierzu Kap. 3), was wiederum das Unterfangen, organische Komplexität zu simulieren, grundlegend begrenzt.

Nachdem im ersten Kapitel die Geschichte der Mathematischen Logik aufgerollt wurde, wird es im zweiten Kapitel um die Entstehungsgeschichte der Computational Neurosciences gehen. Hierzu werden insbesondere zwei Bereiche näher betrachtet, die sich zunächst getrennt entwickeln und in den Computational Neurosciences zusammengeführt werden: Der erste Strang beinhaltet die Entstehung der beiden wissenschaftlichen Disziplinen, der Physiologie und der Neuroanatomie, deren Forschungen zu wichtigen Erkenntnissen über Neuronen und Synapsen führten, auf die sich die Computational Neurosciences heute noch stützen. Der zweite Strang folgt der Entstehung einer auf mathematischen Berechnungen basierenden neurowissenschaftlichen Disziplin. Nicht die Idee eines Netzwerkes stand hier Pate für die Konzeptualisierung neuronaler Aktivität, stattdessen ist der umgekehrte Fall richtig: Ausgehend von dem Wunsch, Berechnungen über die synaptische Aktivität anstellen zu können, wurden Ansätze aus der Elektrotechnik übernommen, die durch das ›netzartige‹ Hintereinanderschalten synaptischer Einheiten im Sinne einer elektrotechnischen Reihenschaltung die Gestalt einer Art Netzwerk annahmen. Gehirne wurden als »serielle Rechenmaschinen« (König/Engel 1998, 157) imaginert, wofür Claude Shannons mathematische Informationstheorie aus dem Jahr 1948 eine wichtige Wegmarke festlegte, in der Informationsverarbeitung als seriell und linear verstanden wurde. Der damals entwickelte Gedanke, die Gesetzmäßigkeiten neuronaler Aktivität in eine Reihenschaltung zu bringen, ist heute um komplexere stochastische Berechnungen erweitert und mithilfe rechenstarker Computer beschleunigt und gilt in dieser Form als der bedeutendste Ansatz in den Computational Neurosciences und der künstlichen Intelligenzforschung. Es geht daher im Folgenden um diejenigen Untersuchungsmethoden beziehungsweise Disziplinen, in denen der Wechsel von empirischer Messung zur Modellierung und Simulation von Prozessen stattfand, namentlich die Nachrichtentechnik, die Kybernetik, die daraus hervorgehende Kognitionswissenschaft und der Konnektionismus. Für das Verständnis der Computational Neurosciences muss diese Disziplin zunächst ganz klar von der künstlichen Intelligenz (KI) unterschieden werden. In ihrer Entstehungsgeschichte und teilweise auch in ihren Anwendungsbereichen und den verwendeten Methoden gibt es große Überschneidungen. Und auch zukünftig werden einige Bereiche der Neurowissenschaft enger mit KI zusammenwachsen. Dies zumindest zeigt sich in der thematischen Ausrichtung derjenigen Großprojekte, die von den For-

schungseinrichtungen der EU und den USA in den letzten Jahren finanziert wurden (plus vieler privatwirtschaftlicher Initiativen von Google, Amazon und Facebook – um nur die größten zu nennen, die sich an der Forschung zu KI beteiligen). Gehen wir zunächst historisch an den Anfang zurück und wenden uns der Miniaturisierung des Blicks und der Fragmentierung des Stofflichen in der Physiologie und der Anatomie zu.

## **1.1 Miniaturisierung des Blicks, Fragmentierung und Übersetzung des Stofflichen in Wellenform**

Physiologie ist die Lehre vom Zusammenwirken physikalischer und biochemischer Vorgänge und untersucht biophysikalische Prozesse in Zellen, Geweben und Organen von Lebewesen. Der Stoffwechsel rückt in den Fokus verschiedenster Disziplinen wie etwa der Medizin, Biologie, Chemie und Physik. Die Physiologie wurde so schon früh zu einer Fachdisziplin, die sich mit den Vorgängen im gesamten Organismus wie Blutfluss, Stoffwechsel, Säften etc. beschäftigte und sich aus dem Wissen verschiedenster Fachrichtungen speiste.

Die Physiologie untersuchte durch Reize ausgelöste physische Sinneswahrnehmungen und ihre elektrischen Impulse zunächst als einzelne Teile des zentralen Nervensystems. Ende des 18. Jahrhunderts änderte sich dies grundlegend durch die Arbeiten Joseph Fouriers, der das mathematische Werkzeug für die Berechnung physikalischer Eigenschaften lieferte. Etwa ein halbes Jahrhundert nach Fouriers Entdeckungen begannen zuerst Hermann von Helmholtz, dann Gustav Theodor Fechner, größere Zusammenhänge menschlicher Sinnessysteme zu erforschen und sich der quantitativen Untersuchung der durch Sinneswahrnehmungen ausgelösten Empfindungen (Emotionen/Gefühle) zu widmen. Die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit den quantitativen Beziehungen von Reizintensität und Empfindungsstärke befasst, bezeichnet man als Psychophysik. Die von Gustav Theodor Fechner (1801–1887) begründete Psychophysik baut auf der experimentellen Psychologie auf und stellt den Versuch dar, Wechselbeziehungen zwischen subjektivem psychischem (mentalem) Erleben und quantitativ messbaren Reizen zu beschreiben. Wenden wir uns zunächst den Entdeckungen Joseph Fouriers zu.

## Fourier

Das Lebenswerk des Mathematikers und Physikers Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) reiht sich in die im 19. Jahrhundert zuspitzende Miniaturisierung des Blicks und der Fragmentierung des Stofflichen ein. Ein Blick, der sich anschickte, ausgelöst einerseits durch die erhöhte Empfindlichkeit von Messmethoden, andererseits durch neue mathematische Werkzeuge, die Welt und seine physikalischen Objekte in immer kleinere Einheiten aufzulösen. Fragmentarisierung meint hier dezidiert nicht Atomisierung, nicht die Zerlegung einheitlicher Objekte in seine Einzelteile, sondern verweist auf eine neue Qualität, die die Physik in Zusammenarbeit mit der Mathematik hervorbrachte: die Übertragung physikalischer Eigenschaften in Sinus- und Kosinuskurven. Fouriers Arbeit *Théorie analytique de la chaleur* von 1822 (ins Englische übersetzt 1878) stellt Gesetze auf, die die Ausbreitung von Wärme in Festkörpern mathematisch erfassen können. Mit dieser Herangehensweise bricht Fourier mit dem Materieverständnis der griechisch-atomistisch monadischen Theorie, also mit der aus kleinen Grundeinheiten zusammengesetzten Vorstellung von Materie und dem Universum, und wendet sich einer oszillierenden und prozesshaften Auffassung physikalischer Phänomene zu. Fourier war überzeugt davon, dass es mathematisch ausdrückbare Naturgesetze gibt und dass diese durch eine mathematisch formalisierte Sprache beschrieben werden können: Er schreibt: »Heat, like gravity, penetrates every substance of the universe, its rays occupy all parts of space. The object of our work is to set forth the mathematical laws which this element obeys.« (1878, 1) Fourier löst mit seinen sogenannten Fourier-Reihen auch ein grundlegendes mathematisches Problem: das der Wellenberechnung. Bereits von Leonard Euler vorausgedacht, wurde sie erst durch Fouriers Arbeiten möglich. Vor allem die Berechnung von Signalsprüngen in Schwingungskurven ließen sich vor Fourier nicht berechnen, höchstens zeichnen. Erst mithilfe der Fourier-Reihen werden auch die Signalsprünge als reguläre Funktionen von  $t$  berechenbar.

Mit der Auflösung physikalischer Eigenschaften in charakteristische, periodisch auftretende Wellenfunktionen wollte Fourier ein universales Beschreibungs- und Berechnungsmodell für alle Naturerscheinungen erschaffen beziehungsweise extrahieren, denn für Fourier stand fest, dass die mathematische Analyse den Beobachtungen vorausgeht und dass die Mathematik unsere Sinne ersetzt: »Mathematical analysis has therefore necessary relations with sensible phenomena; its object is not created by

human intelligence; it is a pre-existent element of the universal order, and is not in any way contingent or fortuitous; it is imprinted throughout all nature.« (Ebd., 25)

In seinen Untersuchungen fiel Fourier auf, dass die Ausbreitung von Wärme logarithmischen Gesetzen folgt und somit ein Zusammenhang zwischen den von ihm untersuchten Naturerscheinungen und der abstrakten Zahlentheorie besteht. Darüber fand er die mathematischen Methoden der Fourier-Reihen und Fourier-Integrale, die eine Reihe von Funktionen beschreiben, die durch die Summen von Sinus- und Kosinusfunktionen ausgedrückt werden. Anfänglich dienten sie Fourier dazu, die Ausbreitung von Wärme in Festkörpern berechenbar zu machen. Mithilfe der Fourier-Reihen gelingt es, unstete, unregelmäßige Ausbreitungsentwicklungen in so kleine (Zeit-)Abschnitte zu unterteilen, bis sie periodisch auftreten und berechenbar werden. Die Suche nach und die Annahme von steter und unsteter Periodizität in Prozessen wird zu einer wichtigen Vorannahme für das Berechnen komplexer Systeme (s. Kap. 3). Aus diesen Überlegungen entwickelte er die Fourier-Analyse, die hauptsächlich dazu verwendet wird, aperiodische Signale in ein kontinuierliches Spektrum zu zerlegen. Aus der Summe dieser Frequenzanteile lässt sich das Signal später wieder rekonstruieren. Fourier-Reihen und die Fourier-Transformationen stellen bis heute wichtige Anwendungen für die Komprimierung und Speicherung großer Datenmengen dar.

Die epistemologischen Effekte durch Fouriers Denken und seine Erweiterung des Funktionsbegriffs um die unstetigen Funktionen waren zahlreich. Zuerst für die experimentelle Mathematik, denn »seine Forderung nach der praktischen Anwendbarkeit mathematisch formulierter Zusammenhänge [spielte] eine große Rolle für die nachfolgenden Entwicklungen« (Donner 2006, 6). Hierfür stellen die von ihm aufgestellten Fourier-Reihen sowie die nach ihm benannte Fourier-Transformation eine wichtige Grundlage für verschiedene Übersetzungsprozesse dar. Fourier-Reihen werden zum Beispiel in der Fourier-Transformation eingesetzt, ein Übersetzungsschritt, mit dem die Information von Bilddaten zum Zwecke ihrer Digitalisierung zwischengespeichert wird. Die Fourier-Reihen ermöglichen eine mathematische Übersetzung physikalischer Prozesse durch die Charakterisierung anhand ihrer spezifischen Wellenfunktionen. Fourier begriff physikalische Phänomene wie Wärme als Summe von Schwingungen und zerlegte diese in charakteristische Sinus- oder Kosinuskurven, um sie miteinander vergleichen zu können. Durch die Erforschung von Wärmeflüssen entfaltete Fourier die Methode der Dimensionsanalyse, die es ihm ermöglichte, die physische

Welt konzeptionell in diskrete (und damit berechenbare) Frequenzen und Funktionen zu übersetzen.

Ausgehend von diesem Verständnis einer nach mathematischen Regeln aufgestellten Welt aus Sinus- und Kosinusschwingungen, steht Fourier auch für den Übergang von der Analyse zur Synthese von Daten. Fourier entwickelte einen Weg, um feste Körper und ihre physischen Eigenschaften in Zahlen auszudrücken. Darüber hinaus gelang es ihm, diese Eigenschaften nicht mehr nur einzeln für sich genommen zu analysieren, sondern sie miteinander ins Verhältnis zu setzen, zu synthetisieren. Die Übersetzung von Signalwerten in ihre einzelnen Wellenfunktionen ist heute unerlässlicher denn je für die Übersetzungen fester Körper ins Digitale, wie zum Beispiel für die digitale Bildverarbeitung, die auf Fourier-Reihen und Fourier-Transformationen zurückgreift. Für den Medienwissenschaftler Bernhard Siegert hört die Materie mit Fourier auf, »newtonianisch zu sein. Die Materie Fouriers wabert.« (Siegert 2003, 242) Mit dem Rekurs auf das »wabernde« Zeitalter, in das wir durch die Weiterentwicklung der Gesetze der Thermodynamik und der Wahrscheinlichkeitstheorie mit Beginn des 20. Jahrhunderts eingetreten sind, verweist Siegert auf die konkreten Effekte, die die Wellentheorie und die Wahrscheinlichkeitstheorie auf die Entstehung der Digitalisierung wie der digitalen Bildverarbeitung hatte (Siegert 2003; vgl. Donner 2006).

## Helmholtz

Der Physiologe und Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) schloss hier direkt an Fourier an, war er es doch, der als Erster erfolgreich die von Fourier entdeckten Fourier-Reihen für die Zerlegung von Tonsignalen verwendete. Helmholtz trug wesentlich zur Begründung der experimentellen Physiologie bei und wurde bereits in jungen Jahren durch seine Versuche zur Messung der Nervenleitgeschwindigkeit bei Fröschen einem breiten Publikum bekannt.

Helmholtz gilt als äußerst vielseitiger und umtriebiger Wissenschaftler. Für diese Abhandlung ist er vor allem aus zwei Gründen interessant: einerseits wegen seiner Ausformulierung des Energieerhaltungssatzes, der über kurz oder lang zu der Annahme nicht linearer Prozesse beitrug, was wiederum zu einer völlig neuen Mathematik und Physik geführt hat (s. Komplexitätstheorie in Kap. 3). Andererseits wegen seiner Reaktivierung eines mechanistischen Menschenbildes, auch und besonders im Bereich der experimentellen Physiologie.

Helmholtz war der Auffassung, dass in der Biologie und Physiologie keine anderen Konzepte als die der Mathematik, Physik und Chemie nötig seien. Seine Schrift *Über die Erhaltung der Kraft* (1847) enthält zu Beginn eine Einführung in die erkenntnistheoretischen und naturphilosophischen Voraussetzungen des Energieprinzips und endet mit der Programmatik einer mechanistischen Naturanschauung. Eben jene Schrift enthält erste Grundüberlegungen eines Energieerhaltungssatzes, der die Unzerstörbarkeit von Energie beschreibt. Der Energieerhaltungssatz wiederum führte im Folgenden zur Formulierung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik und damit zu den Anfängen nicht-linearer Systeme, die später als komplexe Systeme beschrieben werden (s. Kap. 3).

In seinen Arbeiten legte Helmholtz wichtige Grundsteine für die Psychophysik, etwa für die Frage, wie sensorische Messungen aussehen müssten, um die Hervorbringung psychologischer Zustände des Gehirns durch spezifische Reize zu untersuchen.<sup>1</sup> Helmholtz kann demnach mit seinen umfangreichen Arbeiten über Sinneswahrnehmungen als Vordenker der Psychophysik und auch in Teilen der Kognitionswissenschaften gelten – die bis heute zentrale Disziplinen der Hirnforschung darstellen. Diese Ansichten finden sich in den Netzwerkalgorithmen, die als Helmholtz-Machine bezeichnet werden, wieder. Die Namensgeber beziehen sich in einem Paper mit dem Namen *The Helmholtz Machine* (Dayan et al. 1995) explizit auf Helmholtz und seine Theorie, das menschliche Wahrnehmungssystem als eine statistische Schlussfolgerungsmaschine anzusehen. »Following Helmholtz, we view the human perceptual system as a statistical inference engine whose function is to infer the probable causes of sensory input.« (Ebd., 1) Eine Helmholtz-Maschine besteht aus zwei Netzwerken: einem Bottom-up-Erkennungsalgorithmus, der die Daten als Input entgegennimmt und eine Verteilung über verborgene Variablen erzeugt, und einem erzeugenden Top-down-Netz, das die Werte der verborgenen Variablen und die Daten rekursiv selbst erzeugt (mehr hierzu in Kap. 2).

Die Labore des 19. Jahrhunderts brachten weitere Theorien und Methoden auf dem Feld der physiologischen Forschung hervor, die Antworten auf die Fragen rund um die Philosophie des Geistes und der möglichen Verbundenheit von Geist und Körper liefern sollten. Zwei weitere, sehr unterschiedliche

---

<sup>1</sup> Es gilt als umstritten, ob Helmholtz (auch) zu den Begründern einer empirischen Psychologie gezählt werden kann (Mausfeld 1994).

Ansätze sollen hier noch genannt und kurz vorgestellt werden: die Psychophysik Gustav Theodor Fechners und Siegmund Exners Theorie der assoziativen Verbindungen des Gehirns, die als Vorläufertheorie heutiger Neuronaler Netzwerktheorien gesehen werden kann.

## Fechner

Gustav Theodor Fechner (1801–1887) wurde bekannt als Begründer der Psychophysik (vgl. 1877), der experimentellen Psychologie und der experimentellen Ästhetik (vgl. 1871). Durch das Zusammenbringen dieser drei Bereiche, die jeweils eine methodische Herangehensweise beschreiben, bereitete Fechner den Weg für die induktive Metaphysik, eine im naturwissenschaftlichen Sinne betriebene Psychologie, in der Experiment, Erfahrung und Metaphysik miteinander verknüpft werden. In der experimentellen Ästhetik wird Ästhetik als individuell erlebter Wert verstanden, der dadurch erstmals als Grundlage für die induktive empirische Forschung fruchtbar gemacht werden konnte. Induktiv meint vom Besonderen zum Allgemeinen zu schließen, dass heißt, die individuell erlebten ästhetischen Werte/Daten werden zum Ausgangspunkt weiterer theoretischer Überlegungen und Verallgemeinerungen. Der zugrunde gelegte Gedanke der induktiven Metaphysik ist demnach, dass für die Erfassung der Wirklichkeit von der Erfahrung ausgegangen wird, in der Interpretation des Erlebten aber der Forschende über sich selbst hinausreichen soll.

Von der klassischen Metaphysik der Antike und des Mittelalters unterscheidet sich die induktive Metaphysik dadurch, daß jetzt die Erfahrung in einem viel weiteren Umfang als damals beigezogen wird, nämlich in der ganzen Breite der modernen Forschung, daß diese positive Erfahrung maßgebliche Erkenntnisquelle bleibt im Unterschied zu der geistphilosophischen Methode und daß die Ergebnisse dementsprechend als vorgreifende Abrundungen der empirischen Forschung nur hypothetischen Charakter tragen. (Geschichte der Philosophie, 545)

Nicht das Überschreiten der Sinne ist das Ziel, sondern in der induktiven Metaphysik ist man prinzipiell an die sinnliche Erfahrung gebunden und »das Hinausführen über die Erfahrung nur ein Vorgriff auf das vermutliche Ergebnis noch zu gewinnender Erfahrung, der gemacht wird, um nicht bei einem Stückwerk stehenbleiben zu müssen« (ebd., 546). Ausgehend von der Idee einer induktiven Metaphysik, begründete Fechner 1860 die Methode der Psy-

chophysik als Teilgebiet der experimentellen Psychologie, was sie zu einem der ältesten kognitiven Forschungsgebiete macht, die bis heute Anwendung findet. Ziel der Psychophysik ist es, Zusammenhänge von Reiz und Erleben empirisch zu untersuchen und die gesetzmäßigen Wechselbeziehungen zwischen subjektivem psychischem (mentalem) Erleben und quantitativ messbaren, objektiven physikalischen Reizen zu bestimmen. Als völlig neuer Ansatz, um sich der Frage nach dem Zusammenhang von Leib-Seele/Gehirn und Geist zu nähern, inspirierte Fechner mit der Psychophysik viele Wissenschaftler\*innen wie den Physiologen Ernst Mach, den Soziologen Max Weber und den Psychologen Sigmund Freud, und auch Helmholtz ist Anhänger der psychophysischen Methode, um nur einige zu nennen.

Der Zusammenschluss von Psychologie und Physik in der Psychophysik Fechners funktionierte deswegen, weil er die Psychologie rein als Naturwissenschaft ansah, in der die Psyche, wie die Physik, mit experimentell-empirischen Methoden untersucht werden könne. Damit unterwarf Fechner die Psyche den Prämissen der mathematischen Modellierung von Wahrnehmungs- und Denkprozessen, auch im kognitiven und motorischen Bereich, deren Berechenbarkeit sich aus ihrer Regelmäßigkeit ergibt und in der quantifizierbaren Reizmerkmale mit quantifizierbarem Verhalten in Beziehung gesetzt werden. Ein Beispiel für die von Fechner eingeführte Formalisierung der Beziehung von Psyche und Physik ist das Weber-Fechner-Gesetz. Hierin wird der Zuwachs der psychisch/subjektiv empfundenen Stärke von Sinneseindrücken mit dem Zuwachs der objektiv messbaren Intensität des Reizes ins Verhältnis gesetzt, ein Verhältnis, das sich nicht linear ausdrückt, heißt: dass die Intensität der subjektiven Sinneserfahrung nicht linear mit dem physischen Reiz steigt, sondern in logarithmischer Abhängigkeit steht. Einschränkend sollte erwähnt werden, dass dieses Gesetz nur für einen sehr eingeschränkten Bereich mittlerer Reizintensität gilt.

## 1.2 Vorläufertheorien Neuronaler Netze – Exner

Bevor Neuronale Netze in ihrer mathematischen Ausgestaltung zur Lösung für fast alles wurden, mussten sie zunächst aufgespürt, beschrieben und modelliert werden. Ihre Entdeckung – oder auch Erfindung – ist voller Brüche und nahm einige Zeit in Anspruch. Lange vor der mathematischen Konzeptualisierung Neuronaler Netzwerke wurde diskutiert, wie die neuronale Masse aufgebaut ist und was sie ausmacht: ob die Grundlagen für die Bewältigung der vielfältigen Aufgaben, die das Gehirn verrichtet, im einzelnen Neuron

zu verorten sei oder in seiner syncytialen Anordnung als vielkerniger durch die Verschmelzung von ursprünglich einkernigen Zellen entstandener Plasmakörper (vgl. Lexikon der Neurowissenschaft; Spektrum der Wissenschaft). Erst in den 1950er-Jahren wurde mithilfe des Elektronenmikroskops die Auffassung der Existenz diskreter Zellstrukturen im Nervengewebe anatomisch bezeugt.

Im Folgenden werde ich entlang dreier Entwürfe die Entdeckungsgeschichte Neuronaler Netze skizzieren. Diese Ansätze aus der Anatomie, die die Morphologie des Gehirns genauer unter die Lupe nehmen, werden Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts eher selten verfolgt. Deutlich mehr Anklang fanden in diesem Zeitraum elektrophysiologische Forschungen, die sich das (zentrale) Nervennetz als galvanisches Geflecht vorstellen. Unter anderem geschieht dies im Anschluss an Helmholtz, aber auch an die in dieser Zeit moderne Elektrotherapie, mit der gezielt »lahme beziehungsweise überreizte Nerven, [...] mithilfe elektrischer Stromschläge stimuliert werden sollten«. Eduard Hitzig machte im Jahr 1869 bei seinen Versuchen, die Anwendung der elektrotherapeutischen Methode zu verbessern, die Entdeckung, dass sich durch die Reizung mit Elektroden hinter dem Ohr »unwillkürliche Augenbewegungen« (Hagner 1997, 275) hervorrufen lassen. Diese Entdeckung führte bei ihm zu der Vermutung, dass jede Augenbewegung durch die Reizung zerebraler Areale erzeugt werden kann. Um dieser Vermutung weiter nachzugehen, startete Hitzig zusammen mit Gustav Fritsch, seines Zeichens Anatom, ein Experimentsystem zur lokalen Reizung zerebraler Hirnregionen, deren Ergebnisse sie in ihrem Buch *Ueber die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns* zusammenfassten (vgl. Fritsch 2014, 82).

Siegmund Exners (1846–1926) Arbeit bietet konkrete konzeptionelle Anknüpfungspunkte für das heutige Verständnis Neuronaler Netze. Schon in der Einleitung seines Buches *Entwurf zu einer physiologischen Erklärung der psychischen Erscheinung* (1894) macht Exner deutlich, dass für ihn eine rein elektrophysiologische Erklärung der Reizübertragung im zentralen Nervensystem nicht ausreiche, und frohlockt: »Jetzt hat sich die Ueberzeugung von der Erklärbarkeit dieser Lebensvorgänge auf Grund von chemischen und physikalischen Vorgängen Bahn gebrochen.« (1) Exner bemerkt weiter: »Diese Unmöglichkeit, den motorischen Nerven auf künstlichem Wege in einen continuirlichen Erregungszustand zu versetzen, legt die Frage nahe, ob denn sein natürlicher Erregungszustand, d.h. der durch den Willen hervorgerufene, ein continuirlicher ist. Wir haben Ursache anzunehmen, dass dieses nicht der

Fall ist.« (39) Eindrücklich beschreibt der Physiologe Exner, der unter anderem Medizin in Heidelberg bei Hermann von Helmholtz studiert hatte, wie er die zu seiner Zeit möglichen Visualisierungen einzelner Zellen wie die von Ramón y Cajal und Camillo Golgi mit denen weniger prominenter Präparate der Hirnrinde in Beziehung setzt:

Als ich dann mit einer anderen Behandlungsweise Einblick in den Bau der Rinde zu gewinnen suchte, erhielt ich Bilder, die von dem genannten in solchem Grade abwichen, [...]. Ein Gewirre markhaltiger Nervenfasern in verschiedenen Schichten von wechselndem Charakter tritt zu Tage, während die Nervenzellen nur unvollkommen erkannt werden. (27f.)

Im Anschluss an frühe Arbeiten von Ramón y Cajal geht Exner von der Nervenzelle als funktionales Grundelement des zentralen Nervensystems aus und vermutet, dass diese wie Verschaltungselemente hintereinandergeschaltet sind. Weiter geht er von einem assoziativen Verarbeitungsmodell aus und beschreibt Synapsen als einzelne Verknüpfungsknoten dieses Netzes, die erfahrungsbedingt modifiziert werden. Hochspezifische Kontakte einer Nervenzelle zu einer Vielzahl von näher und weiter entfernt gelagerten Neuronen bieten Erregungskopplungen, aus denen sich komplexe Reflexbahnen im Hirngewebe aufbauen. Erst das Zueinander- beziehungsweise Auseinanderstreben einzelner Komponenten im Gefüge interneuronaler Kontakte, ermöglicht die Informationsweitergabe und stellt die Grundlage für Lernenprozesse dar. »Das Nervengewebe gibt so eine Matrix vor, die über diese Kontaktstellen den Erregungsfluß in dem Gewebe leitet.« (Breidbach 1997, 27f.)

Exner stellt, so der Neurowissenschaftler und Wissenschaftshistoriker Olaf Breidbach, mit diesem Modell einen formalisierten Ansatz der komplex vernetzten Hirnarchitektur auf, wie wir es auch von heutigen Modellen neuronaler Vernetzung kennen. Nicht nur können sich Erregungseingaben überlagern, wodurch einzelne Reizeingänge durch andere Erregungsschübe moduliert werden. Auch verstärken sich die Erregungsschübe durch diese Überlagerung und können so lokale Veränderungen der Verknüpfung in der neuronalen Architektur verursachen. »Jeder Reizverarbeitungsvorgang induziert einen derartigen Rückbezug des Systems auf sich.« (Ebd., 30f.) Durch diese sich überlagernden Erregungseingaben

in eine Nervenbahn, über eine Erregungsstreuung durch übergeordnete Hirnzentren (Aufmerksamkeit), [kann] eine Nervenverbindung ›gebahnt‹

werden: Die häufige Benutzung einer Bahn verbessert deren Übertragungseigenschaften. Als potentielle Mechanismen dieser Leitfähigkeitsänderung gibt Exner die Verdickung der Nervenfasern oder auch die lokale Vermehrung der interneuronalen Kontakte an. Schaltstelle zwischen den Neuronen ist – seiner Konzeption zufolge – der Kontaktbereich zwischen den Endverzweigungen des vorgelagerten Neurons (dem Endbäumchen) und dem Zellkörper der nachgeordneten Zelle. (Ebd., 32)

Viele bis nahezu alle der hier aufgeführten, von Exner beschriebenen Charakteristika Neuronaler Netzwerke können in den »neo-konnektionistischen Grundideen der derzeitigen kognitiven Neurowissenschaften« (ebd., 31) nachgewiesen werden. So wird zum Beispiel die Mechanik der Denkvorgänge durch die Konnektivität der Nervenzellen hervorgerufen. Auf Exners Konzept der Transformation von sensorischen zu motorischen Karten rekurrieren die »modernen Realisationen der visuellen Steuerung von Bewegungselementen in parallelverarbeitenden Computern« (ebd., 29). Breidbach merkt an, dass Exners Konzept der Neuronalen selbstverwalteten Netze keineswegs ungewöhnlich ist für seine Zeit. »Vielmehr zeichnet er, in einer ansonsten allerdings seltenen Präzision, nur mehr das Bild der Hirnfunktionen nach, daß in den letzten Dezennien des 19. Jahrhunderts für einen Großteil der Hirnforscher bestimmend war.« (Ebd., 32)

### 1.3 Funktionsmorphologische Entdeckungen – das Neuron und die Synapsen

Der Mediziner und Physiologe Camillo Golgi (1843–1926) hatte angelehnt an die Färbetechnik der Fotografie herausgefunden, dass durch das Behandeln des Gehirngewebes mit Silbernitrat Neuronenstrukturen des Gehirns dunkel gefärbt werden, wodurch die Struktur einzelner Neuronen im Detail hervortritt. Für Golgi waren diese eingefärbten Gewebestrukturen ein Beweis dafür, dass Neuronen durchgängig miteinander verbunden sind und ein Geflecht ergeben, das sich aus untereinander verbundenen Zellen zusammensetzt. Während Golgi also meinte, »einen feinen Faserfilz abzubilden« (Golgi 1890), kam Ramón y Cajal hingegen durch den Einsatz und die Weiterentwicklung von Golgis Methode zu dem Schluss, dass das Gehirn aus autonomen Zellen bestehe. Anstelle eines zusammenhängenden Netzes schlug Cajal daher die Theorie des einzelnen Neurons vor, das über spezielle Verbindungen – die Synapsen – mit anderen Neuronen kommuniziere. Santiago Ramón y

Cajal (1852–1934) war Anatom und sammelte eine Vielzahl der histologischen Daten, die zu seiner Zeit angefertigt wurden, beziehungsweise fertigte diese mithilfe der von Golgi entwickelten Methode selbst an – wofür er große Berühmtheit über seine Zeit hinaus erlangte. Für Cajal, wie für Exner, ist die Nervenzelle ein integraler Baustein, aus dessen Verständnis eine Analyse komplexer Hirnfunktionen möglich wird, für das er mit seinen bis in die feinsten Hirnverästelungen aufgelösten Visualisierungen sorgen wollte (vgl. Breidbach 1997, 217). Auch für Cajal wird immer mehr die Synapse zum Dreh- und Angelpunkt. Er ist bereits früh von der chemischen Übertragung in der Synapse überzeugt (vgl. Gassen 2008). Durch seine histologischen Visualisierungen konnte Cajal Zelltypen identifizieren und in ihrem Gewebezusammenhang darstellen, wodurch er ein komplexes dreidimensionales Bild realer Verknüpfungen/Darstellungen der zellulären Konstitution des Hirns erhielt. Zumindest bis zu einem gewissen Grad konnten die neuroanatomischen Darstellungen Cajals Aussagen über die funktionelle Analyse solcher Neuroarchitekturen treffen. Dies galt wenigstens für den Bereich zur primären Reizverarbeitung, nicht aber in den Bereichen der assoziativen, also der höheren Funktionen der Hirnrinde. Hier konnten keine klaren Kopplungen an etwaiige sensorische Nervengewebebereiche gefunden werden (vgl. Breidbach 1997, 213).

Charles Scott Sherringtons (1857–1952) Arbeit ist ebenfalls relevant für die heutige Konzeption Neuronaler Netzwerke. Gemeinsam mit Charles Roy beschrieb Sherrington im Jahr 1890 die Regulation des Blutflusses im Gehirn – eine für die Physiologie sehr bedeutsame Erkenntnis, dass das Gehirn über lokale Blutversorgungssysteme verfügt und dass diese mit dem Auftreten funktioneller Aktivität verbunden sind (vgl. Roy/Sherrington 1890, dazu Fitsch 2014, 83). 1897 beschrieb er die Arbeitsweise der Synapse und gab ihr ihren Namen. Im Anschluss daran widmete er seine Untersuchungen der »zentralen Maschinerie der Reflexleitung« (Breidbach 1997, 266) und wies nach, dass die Träger dieser Reflexleitung einzelne Neuronen sind, die eigentlich integrierenden Einheiten aber die untereinander aufgebauten Verbindungen darstellen. Damit hatte Sherrington »den Grundbaustein der interneuronalen Verschaltung identifiziert: die Synapse. [...] Ein Neuron, das zeigte Sherrington auf, war demnach keine in sich bestehende Reaktionseinheit, vielmehr gewann es seine Reaktionsqualität erst durch den Modus der Verschaltung.« (Ebd.)

Mit diesem Fokuswechsel vom Neuron auf dessen Kontaktstellen, die Synapsen, konnte Sherrington weitere Spezifizierungen dieser Zwischenverbin-

dungen vornehmen. »Eine Kontaktregion zwischen zwei Neuronen formiere eine Barriere, die es erlaube, zwei Zellen miteinander zu verkoppeln und damit einen geordneten Durchfluß von Erregung im Nervensystem zu ermöglichen.« (Ebd., 267) Um den Durchfluss zu gewährleisten, sind die Zellen eng aneinandergelagert, aber in abgetrennte Reaktionsräume aufgeteilt, deren synaptische Kontaktregionen nicht verschmolzen sind, sondern durch Zellmembran getrennt. Die Weiterleitung in diesen Zellmembranen ist durch Ionentransfer, Potenzialdifferenz und Akkumulation von Ladung organisiert, das heißt spezifische Reaktionen der Zellen, die sich messen lassen. Mit dieser Theorie schuf Sherrington den Ausgangspunkt für weitere neurobiologisch-physiologische Forschungen, und eben die Beschreibung und Messung dieser synaptischen Reaktionen der Zellmembran und der Ionenweiterleitung ist das methodische Werkzeug der Computational Neurosciences. Gleichzeitig hielt Sherrington an der holzschnittartigen »Lokalisationsidee im Gehirn fest und begründet im Anschluss an die Phrenologie sogar eine Neophrenologie« (ebd., 269).

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts hatte Exner ein Neuronenmodell entwickelt, das, ausgehend von der Tätigkeit der Synapse, die lokalen Veränderungen der Erregungskopplung von Zellen beschreibt. In diesem Modell bilden diese neuronalen Zellen bei ihrer gleichzeitigen Erregung eine Einheit, das bedeutet, auch das Konzept eines Zusammenwirkens in Neuronalen Netzwerken wurde von Exner vorweggenommen. Dieses Konzept wurde erst 50 Jahre später im 20. Jahrhundert aufgegriffen, ohne allerdings auf Exner zu verweisen. Auf Cajal hingegen wird sich innerhalb der Computational Neurosciences sehr viel bezogen. Ein Beispiel aus der neueren Geschichte zeigt, dass der Rekurs auf Cajals Arbeiten vor allem auf sein visuelles Vermächtnis abzielt. Cajals Sichtbarmachungen einzelner Neuronen, die durch ihre starke Vergrößerung in all ihrer Feinheit in ihrem Verbund dargestellt werden, sind ikonisch geworden und dienen aktuell den Neurowissenschaftler\*innen rund um das Blue-Brain-Projekt als ästhetisches Erbe, um auf eine vermeintlich ›authentische‹ Rekonstruktion und Darstellung des neuronalen Gewebes Bezug nehmen zu können und die eigene Arbeit, die größtenteils auf visuellen Simulationen beruht, in die Tradition Cajals und damit seiner ›ehrlichen‹ Handarbeit im Labor zu stellen: »If Cajal was here, [...] he would be very happy about what we are doing. In the 21st century, the HBP would extend Cajal's vision to reconstruct and preserve brain data digitally in the computer, forever« (Mahfoud 2018, 179). Die englische Wissenschaftshistorikerin Tara Mahfoud interpretiert diese Inszenierung als Reinkarnation von Cajals Vi-

sion, denn ganz so, wie Cajal unermüdlich daran arbeitete, Neuronen in zwei Dimensionen abzubilden, würde das Human-Brain-Projekt diese Arbeit in vier Dimensionen durchführen: »[...] – reconstructing cells and classifying them, studying the rules underlying their growth, building algorithms to digitally synthesise and classify neurons, mapping neurons onto the landscape of the digitised brain, and finally running these models in simulation over time – the fourth dimension.« (Ebd., 180)

Wie ich bereits weiter oben ausgeführt habe, war das exnersche, cajalsche und sherringtonsche Verständnis neuronaler Funktionsweisen ein neuromorphologisches, heißt hier wurde erstmals der Schwerpunkt auf Struktur und Form von Organismen gelegt.

Since Cajal, there have been so many revisions to how scientists understand the function of different cells. In the 1940s, Eccles, Hodgkin and Huxley made it possible to record the electrical behaviour of single neuron cells, and to classify neurons by their electrical behaviour. More recently, the Allen Institute for Brain Science has begun to classify cells based on genetic expression, and others are arguing for classification based on cells' molecular phenotype. But the most common ways of classifying cells remain based on either their anatomical or electrical properties. This is why the largest databases of single neuron cells are NeuroMorpho and NeuroElectro [...]. (Ebd., 198)

Im Folgenden werden wir den Pfad der anatomisch-morphologischen Funktionsweise des Gehirns wieder verlassen und uns einer Theorie zuwenden, die aus den Überlegungen der Nachrichtentechnik und der Elektrotechnik herrührt. Die ›Mechanisierung des Geistes‹ sowie mechanische Neuronenmodelle bilden weitere wichtige Stränge, um das Konzept der künstlichen Neuronalen Netze zu verstehen. Ausschlaggebend für diese Entwicklung war zunächst ein Durchbruch auf dem Gebiet der Logik beziehungsweise der Entscheidungslogik. Die von Alan Turing möglich gemacht Algorithmisierung von Entscheidungsschritten ist ein wichtiger Schlüssel für die weitere Implementierung der Mathematischen Logik in die Erkenntnisproduktion, fügt sie sich doch nahtlos in die boolsche Algebraisierung der Aussagenlogik ein, in der eine Aussage entweder wahr oder falsch sein muss: Bei Turing muss eine Entscheidung entweder mit ja oder nein zu beantworten sein.