treten muß, aber beide zusammen nicht eintreten können«, und drittens, »man sagt, ein Ereignis bleibt aus, wenn es nicht eintritt, oder wenn, was dasselbe heißt, das entgegengesetzte Ereignis eintritt« (1908, 4). Das heißt, auch in der Stochastik und der Probabilistik kann immer nur ein Ereignis gleichzeitig eintreten und nur ein Wahrscheinlichkeitswert kann sich gegen die anderen Ereignisse durchsetzen. Das Gehirn und insbesondere der Geist wird in der kybernetisch, informatischen Logik zu einem »intuitiven Statistiker« (Amos Tversky, zit. nach Ehrenberg 2019, 138) gekürt, Entscheidungsfindung zu einer individuellen Wahl und Entscheidungen in einzelne, voneinander unabhängige, Einheiten unterteilt. Stochastische Wahrscheinlichkeit beschreibt Situationen, in denen ein Individuum eine »Präferenz für A gegenüber B zeigt, aber Schwierigkeiten hat, diesen Unterschied wahrzunehmen. Wird die Wahl vielfach wiederholt und gibt das Subjekt A gegenüber B den Vorzug ist diese Präferenz stochastisch.« (ebd.).

Diese Ausschließlichkeit von Ereignissen erfährt in der stochastischen Anwendung, dem Ähnlichkeitsparadigma, der Mustererkennung und der Vorhersehbarkeit von Aussagen eine neue Dimension. Die hier viel beschworene Komplexität der Systeme verweist nicht auf die Vielseitigkeit, gar Diversität der definierten Aussagen/Kategorien, sondern allein darauf, dass mehrere dieser eindimensionalen Aussagen und Kategorien in der Berechnung ihres statistischen Auftretens in Zusammenhang gebracht werden können. Vorhersagen werden aufgrund der Datenlage bereits festgelegter Kategorien geschlossen, die sich also intrinsisch nicht widersprechen dürfen und somit keinerlei Brüche, Komplementäres oder Dialektisches zulassen.

2 Komplexität

Die Entdeckung und sukzessive Etablierung nicht linearer Systeme und Prozesse zunächst in der Physik bringt neue Theorien und mathematische Konzepte hervor. Die Komplexitätstheorie und später die Systemtheorie reagieren auf diese Entwicklung, konzeptualisieren die Informationsweitergabe in Systemen, Prozessen und Netzwerken nicht mehr nur linear, sondern als eigenständige kleine Einheiten, in denen auch nicht linear, heißt rekursiv kommuniziert wird. Entscheidend für das Verstehen dieser energetisch offenen und vernetzten Systeme ist der Blick auf die Beziehungen innerhalb eines Systems, nicht mehr die einzelnen, atomaren Elemente, sondern die Interaktionen rücken in den Fokus. In nicht linearen Systemen und Netzwerken finden Rückkopplungen und Rekursionen statt. Welche Rückkopplungen in einem System stattfinden und welche Effekte sich dadurch in einem System/Netzwerk zeigen, wird mit Wahrscheinlichkeiten beschrieben. Die epistemischen Sprünge und Erweiterungen der Wahrscheinlichkeitstheorie (Kap. 1.) hatten direkten Einfluss auf die Konzeptualisierung von Komplexität. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts ging die Wissenschaft noch davon aus, dass Leben aus dem Nichts entstehen konnte. Das änderte sich allmählich mit neuen Experimentalapparaturen, den Methoden des Sichtbarmachens und den neuen Möglichkeiten der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Unter dem Mikroskop konnte 1827 die bereits beschriebene brownsche Bewegung beobachtet werden, deren ungeordnete Bewegungen in Flüssigkeiten und Gasen sich nicht in die newtonschen Gesetze einordnen ließen, sondern erst durch die Entdeckung nicht linearer Prozesse und die Anwendung wahrscheinlichkeitstheoretischer Berechnungsmöglichkeiten nutzbar gemacht werden konnten.

Die brownsche Bewegung, die auch als die »wichtigste Brücke zwischen Mikro- und Makrophysik« (Bessenrodt 1977, 7) herangezogen wird, setzt viele Jahre nach ihrer ersten Entdeckung eine gänzlich neue Fachrichtung in Gang, die sich mit Theorien nicht linearer Systeme beschäftigt. Der Botaniker Robert Brown selbst hatte Pollenstaub in Wasser aufgelöst, unter dem Mikroskop untersucht und hierbei zitternde Bewegungen entdeckt, die sich mit dem wissenschaftlichen Instrumentarium des angehenden 19. Jahrhunderts nicht erklären ließen und somit von ihm als »aktive Urmoleküle, aller Materie« (zit. n. ebd., 7) interpretiert wurden. Erst Albert Einstein löste das Mysterium der kleinen aktiven Teilchen 1905 mit seiner Interpretation der brownschen Bewegung, in der die Partikel nicht aus sich selbst heraus die Bewegung hervorbringen, sondern durch Impulsübertragung der umliegenden Moleküle. Dies gab den Anstoß zu einer völlig neuen Sicht auf die Beschaffenheit von Materie und die ihr innewohnenden Prozesse. Zum tieferen Verständnis nötig war hierfür die Thermodynamik, die den Begriff der Entropie in die Wärmelehre einführte und damit die Physik letztendlich aus ihrer linearen newtonianischen Fantasielosigkeit zu erwecken wusste, indem sie eine zeitliche Dimension in physikalische Prozesse einführte.

Die beiden ersten Hauptsätze der Thermodynamik besagen, dass erstens die Energie, die an einem Vorgang beteiligt ist, ihre Form ändern kann, aber nichts von dieser Energie verloren geht. Zweitens, und das ist für die Frage von Zeitwahrnehmung enorm wichtig, bleibt die an einem Vorgang teilhabende Energie zwar konstant, gleichzeitig verringert sich die Menge an nutzbarer Energie, da sich diese in Wärme, Reibung und Ähnliches umwandelt. Diese beiden Entdeckungen führten zur Thermodynamik, auch als »Wissenschaft von der Komplexität« (Capra 1983, 73) bezeichnet, da hier zum ersten Mal der Nachweis erbracht wurde, dass Naturprozesse sich nicht nur aus linearen (und dementsprechend berechenbaren) Prozessen zusammensetzen. Physikalische Vorgänge haben demnach eine bestimmte Richtung, die von thermodynamischen Bedingungen abhängig sind.

> Mechanische Energie wird in Wärme umgewandelt und kann nicht mehr vollständig zurückgewonnen werden. Wird heißes Wasser mit kaltem Wasser zusammengegossen, ist das Ergebnis lauwarmes Wasser, und die beiden Flüssigkeiten lassen sich nicht mehr trennen. […] All diesen Vorgängen ist gemeinsam, daß sie in eine bestimmte Richtung verlaufen – von der Ordnung zur Unordnung. Das ist die allgemeinste Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik: Jedes beliebige isolierte physikalische System entwickelt sich spontan in Richtung zunehmender Unordnung. (Capra 1983, 74)

Der Begriff der Entropie fasst dieses zweite thermodynamische Gesetz zusammen. Er besagt, dass jedes System zum wachsenden Chaos strebt. Das zweite thermodynamische Gesetz, insbesondere die hier eingeführte zeitliche Dimension, dass Prozesse nicht rückwärtslaufen können, kann mit Newton nicht mehr erklärt werden. Das war der Moment, in dem die Wahrscheinlichkeitstheorie und damit die Statistik von Ludwig Boltzmann ins Spiel kam, um das Verhalten nicht linearer Prozesse zu berechnen und wieder auf Spur zu bringen:

> Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie konnte das Verhalten komplexer mechanischer Systeme nach statistischen Gesetzen beschrieben und die Thermodynamik auf eine solide Newtonsche Grundlage gestellt werden […]. Boltzmann wies nach, daß der Zweite Hauptsatz ein statistisches Gesetz ist. Seine Aussage, dass gewisse Vorgänge nicht eintreten – beispielsweise die spontane Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie –, besagt nicht, daß sie unmöglich seien, sondern nur, daß sie äußerst unwahrscheinlich sind. (Ebd., 74f.)

Wer über die Einführung von Komplexitätskonzepten in wissenschaftliche Theorien spricht, sollte von der Systemtheorie nicht schweigen. Als Prinzip zum »Gebrauche der Mathematik und deren Anwendung« (Lambert 1765) schon beim Mathematiker und Logiker Johann Heinrich Lambert (1728–1777) zu finden, wurde die Systemtheorie als Konzept zunächst in der Biologie (Zellsysteme) und in der Kybernetik der 1940er- und 1950er-Jahre weiterentwickelt. Die Systemtheorie ist weniger eine eigenständige Theorie als eine Sammlung mathematischer Werkzeuge, und ihre wichtigste Einsicht ist die Feststellung, dass auch einfachste deterministische Gleichungen sehr komplexes Verhalten produzieren können. Die Systemtheorie ist eine verallgemeinernde Universaltheorie, um Erklärungsweisen für alle Systeme und deren Verhalten anzubieten, unabhängig davon, ob es sich um biologische Systeme wie Neuronale Netze handelt, um chemische oder physikalische Systeme oder um gesellschaftliche wie ›die‹ Familie oder ›der‹ Staat. Der Begriff »Komplexe Systeme« meint zunächst nicht viel mehr als Systeme, die über mehr als zwei Variablen und verschiedene Querverbindungen verfügen und die einem nicht reduktionistisch festgelegten Determinismus folgen. Heute gelten nahezu alle Prozesse und Vorgänge als nicht linear und alle Systeme als komplexe Systeme. Die Mathematik soll dabei helfen, wiederkehrende Muster in den Prozessen zu erkennen und näher zu beschreiben.

2.1 Was sind komplexe Systeme und wie lassen sie sich charakterisieren?

Das Prinzip der Selbstorganisation eines Systems geht allen anderen Beschreibungen von Systemen voraus und ist die grundlegende Annahme aller Systemtheorien. Selbstorganisation meint, dass Systeme ohne Einflüsse oder Steuerung von außen spontane Ordnungserhöhungen vollziehen können, also strukturelle Ordnungen erreichen ohne ersichtliche linear beschreibbare Ursachen. Dem Prinzip der Selbstorganisation oder auch Selbststeuerung unterliegen in systemtheoretischen Ansätzen alle komplexen Systeme, ob biologische, psychologische, soziale oder physische, auch Neuronale Netzwerke stellen ein System dar. Der Gedanke der Selbstorganisation wurde unter anderem durch die Kybernetik und ihre Modellierung parallel stattfindender Prozesse vorangetrieben. Selbstorganisation legt den Fokus auf die Erneuerung und Selbstregulierung von Systemen. Komplexe Systeme/Netze brauchen kein Steuerungssystem mehr von außen, sondern funktionieren durch ihre gegenseitige Beeinflussung und Selbstregulierung.

Selbstorganisation aber meint vor allem eines: die Abgeschlossenheit von Systemen und Netzwerken und ihre Selbstreferenzialität. Diese epistemische Selbstbezüglichkeit komplexer Systeme stellt das wissenschaftliche Erbe einer Naturauffassung dar, das nicht mehr von fragmentierten, in sich geschlossenen Entitäten ausgeht, die nun nicht mehr linear hintereinandergeschaltet gedacht werden, sondern von in sich geschlossenen, auf sich selbst verweisenden Systemen. Somit sind auch Neuronale Netzwerke (ob artifizielle, also algorithmische oder physiologische) kleine, abgeschlossene, sich selbstorganisierende und in ihrer Grundstruktur sich gleichende Systeme. Gleichzeitig reiht sich diese Vorstellung in das Erbe einer Mathematischen Logik nach Hilbert ein, die nicht mehr von Erfahrung ausgehend ihre Grundsätze (Axiome) formuliert, sondern formal-logisch bestimmt. In anderen Worten: Axiome gelten dann als wahr, wenn sie sich selbst nicht widersprechen. Wahr ist demnach, was als wahr durch die Regelhaftigkeit im Rahmen einer Mathematischen Logik bestimmt wird. Erfahrung ist, was formalisiert werden kann und was in den Trainingsdaten steckt. Selbstbezüglichkeit bedeutet, nicht von Erfahrung auszugehen, sondern von formal-logischen Grundsätzen, die dann als wahr gelten, wenn sie sich nicht selbst widersprechen.

Die Annahme der Selbstorganisierung und damit der Abgeschlossenheit von Systemen ermöglicht ihre weitere Charakterisierung. In der Kybernetik wurden prozessorientierte Rechensysteme zunächst linear hintereinander in Reihe geschaltet. Mit den Erweiterungen konnektionistischer Errungenschaften wie die der Rekursion, Rückkopplungen, selbstlernender Algorithmen etc. entstanden komplexe Systeme, die in konnektionistischen und kognitionswissenschaftlichen Ansätzen als Neuronale Netze bezeichnet werden. Autopoiesische, komplexe, nicht lineare Systeme/Netze zeichnen sich durch ihren Grad der Selbstorganisation, der Rückkopplung, der Rekursion und Reverberation, des Selbstlernens und die sich daraus ergebende Selbstbezüglichkeit, Bifurkationen und eine spezifische Form der Periodizität und der Zeitlichkeit aus.

Rekursion, Rückkopplung und Feedback bezeichnen im Grunde genommen das gleiche Phänomen, die unterschiedlichen Begriffe verweisen auf die verschiedenen (System-)Theorien, in denen sie verwendet werden. Sie beschreiben einen zentralen Vorgang, über den sich nicht lineare Prozesse definieren. Ein Teil des Outputs einer Gleichung wird durch Rückkopplung beziehungsweise durch ihr Wiederaufrufen in den Prozess zurückgeführt und beeinflusst dadurch wiederum das momentane Verhalten des Systems. Rekursion bedeutet Zurücklaufen, meint das Rückkoppeln eines prinzipiell unendlichen Vorgangs, der sich selbst als Teil enthält oder mithilfe von sich selbst definierbar ist. Die so in Beziehung gesetzten und aufeinanderfolgenden Teilvorgänge und nacheinander erzeugten Systeme/Netze sind nicht unabhängig voneinander, ihre Relation orientiert sich an einer Kausalmatrix, jedes darin enthaltene System bestimmt sich durch selbstbezügliches, rekursives Verhalten (eine grafische Ausführung rekursiver Systeme, die einer Kausalmatrix folgen, sind Fraktale). Rekursionen beziehungsweise Rückkopplungen finden unendlich oft statt, wenn keine Abbruchbedingung in die Funktion einprogrammiert wurde, weil sich das rekursive Programm sonst theoretisch unendlich oft selbst aufruft. Wird das Systemverhalten durch positive Rekursion verstärkt, wie man es etwa aus der Rückkopplung zwischen Lautsprecher und Mikrofon kennt, verwandelt die Verstärkerschleife einen leisen in einen sehr lauten Ton. Negative Rekursion wirkt eher stabilisierend auf ein System. Bifurkation beschreibt den kritischen Punkt, der durch diese sich selbst oder benachbarte Funktionen unendlich oft aufrufende Rückkopplungen auftreten kann.

Iteration, der Prozess des mehrfachen additiven Wiederholens, und Rekursion werden heute gleich häufig in der Berechnung komplexer Systeme angewendet. Gleiche, also iterative, oder ähnliche rekursive Vorgänge werden hierfür wiederholt aufgerufen. Wichtig ist der unterschiedliche Anwendungsbereich: Prozessverarbeitungen, die auf stochastischen Berechnungen beruhen, basieren meist auf der Anwendung von Iterationen, die mehrfach Schleifen (for, while …) durchlaufen, bis eine Abbruchbedingung erfüllt ist.

In Neuronalen Netzen bildet die Rekursion die Grundlage für die ›selbstlernenden Algorithmen‹ und stellt somit eine neue Form des maschinellen Lernens dar. Rückkopplungen und Rekursion macht aus ›müden‹, also ausschließlich ausführenden Algorithmen selbstlernende Algorithmen. Bei einer Rekursion genügt es, lediglich die Prozeduren oder Funktionen mit der Aufforderung zu ergänzen, dass sie mit einem regelmäßig geänderten Parameter erneut anzuwenden sind, bis eine Abbruchbedingung erfüllt ist.

Um die Paradigmen der Regularität und die darüber hergestellte Stabilität linearer Systeme in die Welt der nicht linearen Systeme zu übertragen, wird die Periodizität zu einer unentbehrlichen Chiffre (allerdings in seiner aktuellen, nicht seiner etymologischen Bedeutung von Null und leer). Periodizität stellt also Regularien für komplexe Systeme auf. Sie wird insbesondere mit der Frage nach der Möglichkeit von Zufallsereignissen in komplexen Systemen relevant, beziehungsweise es werden Zufallsereignisse durch das Einführen von Periodizität in komplexen Systemen *per definitionem* ausgeschlossen, da Zufälligkeit nur als das nicht Vorhandensein bestimmter Formen von Regularität aufgefasst wird. »Die Periodizität ist als Form der Regularität basal in dem Sinne, dass sie in allen übrigen Formen enthalten ist; sie zeichnet sich ferner durch Minimalität bei der algorithmischen Umsetzung aus, ist also die am einfachsten zu prüfende Form von Regularität.« (Kirchner 2018, 245)

Die Versprechen nicht linearer und komplexer Systeme verweisen vermeintlich auf die Begrenztheit vorherigen wissenschaftlichen Forschens. Das Verhältnis dreht sich um, das Nichtlineare, miteinander Vernetzte und aufeinander Rekurrierende in der Natur wird nicht mehr als Ausnahme, als Anomalie angesehen, sondern als ihr Normalzustand. Komplexe Systeme sollen dabei helfen, Formen von Vielfalt und vielfältigen Zusammenhängen zu erfassen, was vorher mit deterministischeren Ansätzen, die das Leben, die Natur und den Menschen mit Uhrwerken, Maschinen und Automaten verglichen, kaum möglich war.

Diese auf das Gehirn übertragenen systemtheoretischen Annahmen riefen auch kritische Stimmen in den Kognitions- und Neurowissenschaften hervor. Es stellte sich die Frage, wie die sich selbst organisierenden Neuronalen Netze in Kontakt mit der Außenwelt treten können? Oder auch allgemeiner, wie Systeme mit- und zueinander in den Austausch kommen, sich nicht nur selbstreferenziell verhalten, sondern inter- und intraaktiv kommunizieren? Zur Diskussion wurde auch die Frage gestellt, wodurch das Gehirn, zusammengesetzt aus vielen kleinen Systemen beziehungsweise Neuronalen Netzwerken, zu einem Output hervorbringenden Organismus wird. Wie lässt sich aus dem Chaos feuernder Neuronennetzwerke ein klarer Gedanke extrahieren? Wie extrahieren Neuronale Netze aus dem Rauschen des Gehirns eine klare Entscheidung, etwa dass eine Aktion gestartet wird, zum Beispiel das Heben eines Arms? Wie materialisiert sich Erinnerung und wie kann Erinnerung wieder abgerufen werden? Ein möglicher Ordnungsansatz ist die zeitliche Synchronisation von Prozessen, in der über das gleichzeitige beziehungsweise das spezifische zeitlich versetzte Feuern von Synapsen, über das Bewusstwerden von Denkprozessen Entscheidungen getroffen werden (vgl. Singer 2005, 46). Erst durch die Einführung einer zykluszeitlichen Komponente wurde eine Modellierung der Kommunikation zwischen den Neuronen möglich: »The cycle-time then is the time unit for the operations of neural nets.« (Kay 2001, 598)

Durch die zeitliche Harmonisierung wird die Neuronenaktivität unter Kontrolle gebracht und das nicht lineare Rauschen des Gehirns in eine Ordnung gesetzt, die in der Neurowissenschaft zu Anschauungszwecken auch schon mal mit einem Orchester verglichen wird: Wenn alle in einem Orchester wissen, wann sie was zu spielen haben, dann entsteht eine Melodie.

Die oben beschriebenen Konzepte der Selbstorganisation, der Komplexität, der Nichtlinearität von Netzwerken, bauen auf vorherigen Reduktionen und Mathematisierungen auf, die sich allesamt in der Logik der Verschaltung des Computers und der Welt der Algorithmen ausdrücken lassen. Und auch der Umkehrschluss ist wahr: Keiner dieser auf mathematischen Modellen beruhenden und in Algorithmen eingelassenen Begriffe könnte ohne die Rechenpower des Computers berechnet werden. Diese erkenntnistheoretischen Konzepte, die mathematischen Modelle und die in Computer implementierten Verschaltungslogiken bedingen einander und bringen das hervor, was hier im Anschluss an die Kritische Theorie mit Instrumenteller Vernunft vorgestellt werden wird.

2.2 Emergente und effiziente Komplexität in den Computational Neurosciences

Durch systemtheoretisch angeregte beziehungsweise freigesetzte epistemische wirksame Modelle abgeschlossener Systeme, Netzwerke der Selbstorganisation und Rekursion, spielen auch neue Komplexitätstheorien eine bedeutende Rolle in der weiteren Geschichte konnektionistischer Versuche, dem Gehirn eine neue Form zu geben. Ein abweichendes Verständnis von Komplexität beziehungsweise der Art der Komplexität, nach der gesucht wird, begründete zwei der heute wichtigsten Stränge kognitiv-computationaler Methoden. Komplexität wird in den Computational Neurosciences als Erforschung von Effizienz neuronaler Systeme verstanden. Für den Bereich des Machine Learning und selbstlernender neuronaler Netzwerke ist die Emergenz eines Systems, also die Frage nach dem Zusammenspiel der einzelnen Elemente eines Systems, von Interesse.

Kurzer Rückblick, wie diese unterschiedlichen Foki entstanden sind. Kurt Gödel zeigt in seinen Arbeiten der 1930er-Jahre die Grenzen des Berechenbaren und des Rechnens generell auf und setzt mit seinem Unvollständigkeitssatz neue Maßstäbe in der Mathematik, indem er selbstbezügliche, unentscheidbare formale Aussagen entwirft, deren Wahrheitsgehalt nicht durch eine Rechnung ermittelt werden kann. Der Fokus des Mathematikers liegt dabei aber auf der Logik formalisierbarer Prozesse, für die er universell anwendbare Codes entwickelt. Damit schlägt Gödel erstmals eine Brücke von den für diese Fragen notwendigen Axiomen und beweisbaren Theoremen zu ihrer programmatischen Anwendung in Computern, bestehend aus Reihen von Operationen, mit denen Beweise im Sinne der Logik berechnet werden können. Sein Unvollständigkeitssatz gilt neben der Ableitung Alan Turings als epochale Entschlüsselung des Entscheidungsproblems, das Gödel wie Turing ähnlich begreifen: Das Entscheidungsproblem muss, im Sinne der Mathematischen Logik, auf Fragen begrenzt werden, die eine klare Ja/Nein-Antwort zulassen. Heißt: Gibt es eine Ähnlichkeit zwischen Bild A und Bild B: ja/nein? Kommt eine Eigenschaft vor: ja/ nein. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis eintritt: 0 gar nicht, 1 sehr hoch etc. Das Entscheidungsproblem versöhnt Logik und Mathematik und stellt die Bedingungen auf, aus deren Logik sich der Computer heraus entwickelt hat sowie sein Anspruch, logische Denkprozesse zu vollziehen und daraus logische Entscheidungen abzuleiten.

Gödel begründet mit diesen Überlegungen zu den Grenzen algorithmischer Theorembeweise das, was heute theoretische Informatik genannt wird: eine durch die Logik inspirierte Perspektive, die sich mit der Effizienz mathematischer Werkzeuge, Axiomen, Algorithmen und Berechnungen digitaler Computer auseinandersetzt. Der oben benannte Unterschied zwischen der theoretischen Informatik und konnektionistischen Ansätzen findet sich in ihrer unterschiedlichen Verwendung der Komplexitätstheorie: Erstere beschäftigt sich mit der rechnerischen Komplexität von im Computer durchgeführten Theorembeweisen, fragt nach der Anwendbarkeit und der Effizienz des für ein Problem vorgeschlagenen Algorithmus und ist der Deduktion verpflichtet. Ein zweiter konnektionistischer Ansatz beschäftigt sich mit dem Zusammenwirken vieler interagierender Elemente in Systemen, die ein komplexes emergentes Verhalten, neue Eigenschaften oder Strukturen innerhalb eines Systems hervorbringen, das sich nicht auf seine Einzelteile reduzieren lässt. Dieser Ansatz folgt der induktiven Logik und mündet in dem heute deutlich dominanteren Bereich neuronaler Netze und des Machine Learnings.

Eine von mir interviewte Person nannte ein anschauliches Beispiel für effizienzbasierte Fragen kognitiver Komplexität:

> Die Theorie der kognitiven Komplexität untersucht die intrinsische Schwierigkeit von rechnerischen Problemen. Nehmen wir zum Beispiel das Sehen, sagen wir, es gibt einige Pixel, und sagen wir, Sie wollen berechnen, was die wahrscheinlichste Interpretation dieser spezifischen Pixel ist – das ist das rechnerische Problem. Dann fragt man sich, was ist der schnellste Algorithmus, wenn Sie sich einen Algorithmus ausdenken würden, der dieses Problem rechnerisch löst, wie viele Ressourcen braucht dieser Algorithmus? Ressourcen können Zeit oder Platz sein, in der Kognitiven Komplexität geht

> es vor allem um die Frage, ob das Gehirn über die Ressourcen verfügt, diesen Algorithmus auszuführen. Und nun gibt es Probleme wie die bayessche Inferenz im Allgemeinen: Wenn es keine vereinfachenden Annahmen gibt, dann gibt es keinen Algorithmus, und das ist keine technische Einschränkung, das ist eine mathematische Einschränkung. Es bedeutet, dass ein Algorithmus, der diese Berechnung durchführt, immer sogenannte exponentielle Zeit braucht, also dass die Zeit, die er benötigt, in die Höhe schießt, je mehr die Anzahl der Pixel wächst. Das bedeutet, dass man für alles andere als trivial kleine Bilder mehr Zeit braucht, als seit dem Urknall vergangen ist, um sie tatsächlich zu berechnen. Wir sagen: Ja, das kann das Gehirn nicht. Selbst wenn das Gehirn mit Lichtgeschwindigkeit rechnen könnte, was es nicht kann, wäre es nicht in der Lage, das in Jahrhunderten zu berechnen. Und NP-Schwere bedeutet, das sind diese Arten von Problemen, die diese Eigenschaft haben, dass es keinen effizienten Algorithmus für sie gibt. (Interview 3, Min. 45f.)

Die Komplexitätstheorie in der theoretischen Informatik definiert für Aufgaben, die das Entscheidungsproblem, also alle Probleme mit einer Ja-oder-nein-Antwort betreffen, Komplexitätsklassen für die weitere Verwendung in Gleichungen. Zu diesen Klassen gehört unter anderem P – als die Komplexitätsklasse, die die Menge aller Entscheidungsprobleme darstellt, die in Polynominalzeit gelöst werden können. Das heißt, die Antwort ja oder nein kann in einer angemessenen Zeit entschieden werden. NP ist die Klasse aller Entscheidungsprobleme, für die eine gefundene Lösung effizient rechnerisch und in Polynominalzeit überprüft werden kann. NP-complete ist eine Komplexitätsklasse, die die Menge aller Probleme X in NP darstellt, für die es möglich ist, jedes andere NP-Problem Y in Polynominalzeit auf X zu reduzieren. NP-Schwere beschreibt die Komplexitätsprobleme, die mindestens so schwer sind wie die NP-complete-Probleme. Diese Klasse muss nicht in der Komplexitätsklasse NP aufgehen noch müssen sie Teil des Entscheidungsproblems sein. Bereits Gödel beschrieb 1956 dieses, bis heute offene Problem der Vergleichbarkeit von Komplexitätsklassen für das Entscheidungsproblem (P=NP?). Polynominalzeit gibt die Zeit an, in der Komplexitätsprobleme mithilfe von Rechenmaschinen lösbar sein müssen. Die Polynominalzeit bildet damit den Rahmen für praktisch lösbare mathematische Probleme und praktisch nicht lösbare Probleme. Diese theoretischen Überlegungen zur Berechenbarkeit der eigenen Modelle spielen eine fundamentale Rolle in den Computational Neurosciences.

> Und interessanterweise sind viele Modelle in der Kognitionswissenschaft NP-hard, das heißt, die Modelle die postuliert werden, sind praktisch nicht in der Polynominalzeit lösbar. Aber wir benutzen sie als Modelle dafür, wie das Gehirn rechnet. Gleichzeitig können wir nachweisen, dass das nicht möglich ist. Also es gibt dann zwar einen Algorithmus dafür, aber alle diese Algorithmen verbrauchen so viele Ressourcen, sie können nicht plausibel physikalisch realisiert werden. Diese Algorithmen können nicht auf die reale Welt zurück skaliert werden, denn das würde das Modell sprengen. Und dann sagen sie, ja das ist nur ein technisches Problem. Nein, das ist kein technisches Problem, da stimmt etwas grundlegend nicht. (Interview 3, 47 Min.)

2.3 Kausalität und Zufall in komplexen Systemen

> We know that in the realm of natural science, the absolute connexion between the initial and final elements of a problem, exhibited in the mathematical form, fitly symbolizes that physical necessity which binds together effect and cause –
> *Boole 1958, 316f.*

Der Mathematiker Henri Poincaré (1854–1912) widmet sich in einem Text aus dem Jahr 1908, den grundlegenden Schwierigkeiten, die in der Definition und Abgrenzung von Kausalität als klare Festlegung von Ursache und Wirkung und zufälligen Erscheinungen deutlich werden. Sein Hinweis auf die mathematischen Grenzen in der Beschreibung von Naturgesetzen, beruht auf Überlegungen vor der quantenphysikalischen Revolution und vor den Veränderungen, die sich durch die Einhegung nicht linearer Prozesse in der Mathematik ergaben:

> Eine sehr kleine Ursache, die für uns unbemerkbar bleibt, bewirkt einen beachtlichen Effekt, den wir unbedingt bemerken müssen, und dann sagen wir, daß dieser Effekt vom Zufall abhänge. Würden wir die Gesetze der Natur und den Zustand des Universums für einen gewissen Zeitpunkt genau kennen, so könnten wir den Zustand dieses Universums für irgendeinen späteren Zeitpunkt genau voraussagen. Aber selbst wenn die Naturgesetze

> für uns kein Geheimnis mehr enthielten, können wir doch den Anfangszustand immer nur näherungsweise kennen. Wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden, den späteren Zustand mit demselben Näherungsgrade vorauszusagen, so ist das alles, was man verlangen kann; wir sagen dann: die Erscheinung wurde vorausgesagt, sie wird durch Gesetze bestimmt. Aber so ist es nicht immer; es kann der Fall eintreten, daß kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich und wir haben eine »zufällige Erscheinung«. (Poincaré 1908 [23: Text 114])

Die hier zitierte Aussage Poincarés zeigt die Fallstricke auf, die sich aus den Übersetzungen der experimentellen Beobachtungen der Physik in die statischen Gesetze der Mathematik ergeben. Poincaré unterscheidet zwischen theoretischer Vorhersagbarkeit und der praktischen Unmöglichkeit, Ausgangsdaten beliebiger Genauigkeit zu er- beziehungsweise beschaffen. Poincaré deutet an, dass Zufall auf der praktischen Unmöglichkeit der Vorhersage beruht, das heißt, für ihn ist Zufall allein Ausdruck für Nichtwissen oder Nochnichtwissen. In Poincarés Aussage klingt ein erster Verweis auf die Gesetze nicht linearer Prozesse an, die die Kausalitätsprinzipien kurze Zeit später durch die Implementierung der Wahrscheinlichkeitstheorie fundamental verändern sollten.

Durch die Wahrscheinlichkeitstheorie und ihre Einbettung in die Berechnung komplexer Systeme wird das Kausalitätsprinzip neu ausgerichtet: Bisher war das Kausalgesetz die »induktive Verallgemeinerung der Erfahrung, dass sich in der Regel zu jedem beobachtbaren Ereignis B ein anderes Ereignis A finden lässt« (Morfill/Scheingraber 1993, 282). Mit dem Verlassen eines deterministischen Standpunkts, durch die Implementierung der Gesetze nicht linearer Prozesse, verlieren die reduziert gehaltenen Kausalaussagen ihren Sinn, da es bei der Untersuchung »komplexer Systeme mit vielfältigen Zusammenhängen […], in den meisten Fällen unmöglich ist, zwischen einzelnen Ereignissen eindeutige Ursache-Wirkungs-Verknüpfungen zu konstruieren« (ebd.).

Die induktive und vorhersagende Logik stochastischer Berechnungen basiert auf dem statistischen Verhältnis von Ursache und Wirkung und sucht nach Korrelationen, nicht nach kausalen Zusammenhängen. Zufall wird mithilfe der Probabilistik als Variable berechenbar gemacht und als notwendige veränderliche Größe in komplexen Systemen vorausgesetzt. Statistik bildet die methodische Grundlage, um eine Art Inventur der gesammelten und vorhandenen Daten vorzunehmen und einen Überblick darüber zu geben, welche Informationen überhaupt vorhanden sind und welche Verteilungsmodalitäten vorliegen. Was aber die Gründe für diese Verteilung sind, das lässt sich mit stochastischen Modellen und Algorithmen nicht grundlegend, nicht theorieleitend klären. Artifiziellen Systemen fehlt das Mitbedenken der Anfangs- und Randbedingungen beziehungsweise das Einordnen, warum die Anfangs- und Randbedingungen so sind, unter denen das Problem gelöst werden soll, ebenso wie die Reflexion ihrer eigenen eingebetteten Systematiken und Logiken. Die Netzwerke können zur Selbstorganisation Prozesse iterieren (wiederholen) und Daten immer wieder einspeisen, sie können rekursiv gefundene, gemachte Fehler in das System zurückspiegeln und daraus lernen, dass dies fehlerhaft war. Sie können ihre Anfangs- und Randbedingungen innerhalb einer Simulation variieren, auch können die bekannten Naturgesetze programmiert und über nominale Angaben in die Berechnungen eingeschrieben werden, diese sind aber nur ein Teil des Systems, Randbedingungen sind eher kontingent und kontextabhängig.

Das Kausalitätsprinzip ist Ausgangspunkt von logischen wie statistischen Überlegungen: Wenn, dann. Aus x ergibt sich y etc. Um dem Kausalitätsprinzip zu entsprechen, müssen Experimente unter den gleichen Bedingungen wiederholt und ihre Ergebnisse reproduziert werden können: Gleiche Bedingungen müssen gleiche Ergebnisse hervorbringen. Das ist die Fundamentalanforderung jeden wissenschaftlichen Experiments im Labor – bis heute. Sie gilt aber nicht für die Statistik: Diese prüft nicht mehr die Kausalität von Zusammenhängen, sondern ihre Korrelation, also ob ein Zusammenhang signifikant beziehungsweise valide ist. Sie gilt auch nicht für auf stochastischen Berechnungen basierende Computermodelle und Simulationen.

Das Kausalitätsprinzip der Experimentalwissenschaften, vor allem aber der Physik, besagt, dass gleiche Ursachen gleiche Wirkungen haben. Das Kausalitätsprinzip wird in starke und schwache Kausalität unterschieden. So beschreibt die schwache Kausalität, dass gleiche Ursachen gleiche Wirkungen haben, sagt aber nichts über die *Schwere*, mit der eine Ursache mit einer Wirkung zusammenhängt. Die starke Kausalität hingegen, die insbesondere in nicht linearen Prozessen oder Systemen angenommen wird, besagt, dass ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen haben, aber kleinste Abweichungen zu extrem verschiedenen Ergebnissen führen können. Diese Bestimmung von Kausalität ist eine rein mathematische Festlegung für das Verhältnis von Ursache und Wirkung in Systemen und dient allein der weiteren formal-logischen Verfasstheit der anzuwendenden Gleichungen, aber kaum der Einschätzung über die Ursächlichkeit eines Ereignisses über ein anderes. Das Prinzip von Ursache und Wirkung wird, wenn zwei Prozesse ein und demselben System angehören, als gegeben vorausgesetzt. Das Verhalten nicht linearer Systeme mit starker Kausalität über längere Zeiträume ist nicht genau vorherzuberechnen.

Zufall

»Ich möchte nur darauf aufmerksam machen, wie viele verschiedene Bedeutungen dem Wort Zufall gegeben werden, und wie nützlich es wäre, sie zu unterscheiden.« (Poincaré 1906, 114)

Wenn Kausalität das Verhältnis von Ursache und Wirkung beschreibt, definiert sich Zufall als die Abwesenheit von Kausalität, ein Ereignis, das eintritt, ohne dass dafür eine Ursache oder eine Gesetzmäßigkeit erkennbar wird. Zufälligkeit grenzt sich als Gegensatz von der Notwendigkeit ab, ist aber gleichzeitig in seiner Negation auf diese angewiesen. Denn erst im Wissen um Regelhaftes und Notwendiges wird Zufälliges deutlich.

Diese definitorische Gegenüberstellung von Zufall und Gesetzmäßigkeit, die die Abwesenheit des jeweils anderen anzeigt, verändert sich im mathematischen Verständnis zur Berechnung komplexer Systeme/Netze mittels Stochastik. Wenn Zufälligkeit als Fehlen von Ursächlichem und Regelhaftem beschrieben und »als Negation einer bestimmten Form von Regularität« (Kirchner 2018, 245) angesehen wird, braucht es eine übergeordnete Charakteristik, um Zufälliges dennoch mathematisch berechenbar zu machen. Um den Zufall in den Griff zu bekommen und ergo seiner Berechenbarkeit zuzuführen, wird den verschiedenen zufällig eintretenden Ereignissen in komplexen Systemen

> ein eigener Regularitätsbegriff angelegt […]: die Periodizität, die als Reminiszenz an die vor-chaotische, d.h. sich mit linearen oder linearisierten Problemen beschäftigende Naturwissenschaft aufgefasst werden kann. Die Periodizität ist als Form der Regularität basal in dem Sinne, dass sie in allen übrigen Formen enthalten ist; sie zeichnet sich ferner durch Minimalität bei der algorithmischen Umsetzung aus, ist also die am einfachsten zu prüfende Form von Regularität. (Kirchner 2018, 245)

Durch die Annahme von mathematisch berechenbarer Periodizität in komplexen Systemen können Zufallsverteilungen mithilfe von Wahrscheinlichkeitsrechnungen als notwendiger Motor für die Aufrechterhaltung eines komplexen Systems eingebaut werden. So wird Zufall zu seinem Gegenteil: einer Notwendigkeit, die selbstverständlich über statistische Häufigkeitsverteilungen als selbsterhaltende Maßnahme in selbstlernende Algorithmen einbezogen wird.

Die Einteilung, ob biologische, organische, physikalische oder neuronale Prozesse deterministisch oder zufällig verfasst sind, stellt sich in den Computational Neurosciences heute tatsächlich nicht mehr: Organisch-neuronale Prozesse sind stochastisch verfasst. Als komplexe Systeme basieren sie auf einer statisch ermittelten Kombination aus regelhafter Zufälligkeitsverteilung. Diese mathematische Einhegung mithilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie wird auch als Probabilistik, ein Anwendungsbereich der Wahrscheinlichkeitsrechnung, bezeichnet.

3 Wahrscheinlichkeit

Nach den Turbulenzen, die die Entdeckung des 1. und 2. Hauptsatzes der Thermodynamik der newtonschen Physik bescherte, brauchte es neue mathematische Herangehensweisen, um nicht lineare Prozesse zu berechnen und die Formalisierung komplexer Systeme zu ermöglichen. Hier kommt die Wahrscheinlichkeitstheorie ins Spiel, die dabei half, »das Verhalten komplexer mechanischer Systeme nach statistischen Gesetzen« (Capra 1983, 74) zu beschreiben. Mithilfe von Wahrscheinlichkeitsannahmen können Aussagen, Vorhersagen und Urteile nach dem Grad ihrer Gewissheit eingestuft werden. In Kapitel 1 wurde bereits in die Wahrscheinlichkeitstheorie eingeführt. An dieser Stelle sei noch auf die Diversität von Wahrscheinlichkeitskonzepten hingewiesen, eine Art der Chancenberechnung gibt es nicht, Wahrscheinlichkeitsannahmen können sehr unterschiedlich verfasst sein. In den Anfängen wurde die Wahrscheinlichkeit eines eintretenden Ereignisses dadurch bestimmt, dass »die Zahl der ›günstigen‹ durch die Zahl der ›möglichen‹ Fälle dividiert« (Stegmüller 1956, 2) wurde. Das bedeutet, »wenn die Wahrscheinlichkeit, mit einem Würfel eine Sechs zu werfen, gleich 1/6 ist, so beruht dies nach der klassischen Ansicht darauf, daß sechs mögliche Fälle, nämlich die sechs verschiedenen Augenzahlen des Würfels, und ein günstiger Fall, nämlich die Augenzahl 6, vorliegen« (ebd.).