Kapitel 3: Komplexität, Kausalität und Zeitlichkeit in stochastischen Modellen

1 Ideengeschichte *revisited*

> Die Erde ist nicht der Mittelpunkt der Welt; der Mensch ist auch nur ein Tier; das Ich ist nicht Herr im eigenen Haus – es ist uns einigermaßen gelungen, mit diesen narzisstischen Kränkungen umzugehen. Nun schicken sich künstliche Intelligenzen an, uns auch noch die letzte stolze Domäne streitig zu machen: das Denken –
> *Bolz 1994, 9*

Im ersten Kapitel dieses Buches wurde die Geschichte der Logik vorgestellt, die sich als spannender Krimi erkenntnistheoretischer Entwicklungen entpuppte. Wir erinnern uns, Aristoteles gilt heute als einer der Ersten, der versuchte, Logik zu systematisieren, indem er Syllogismen aufstellte, also Grundlagensätze, die mithilfe der Aussagenlogik festlegen, ob ein Satz wahr oder falsch ist. Lange bestimmten die aristotelischen Grundlagensätze das, was als Logik diskutiert wurde, heute auch als »philosophische Logik« bezeichnet. Ab dem 17. Jahrhundert bildete sich sukzessive eine neue Logik heraus, die entweder als mathematische, symbolische oder heute auch als moderne Logik bezeichnet wird. Anfänglich von Leibniz, Bacon und Newton herausgefordert, später von Frege, Boole, Hilbert, Gödel detaillierter ausgearbeitet und zu einer eigenen Disziplin weiterentwickelt, gibt die moderne

Logik auf Symbole reduzierte Wege des Formalisierens an die Hand und ermöglicht dadurch eine mathematische Beweisführung.

Philosophische Logikverständnisse existieren nach wie vor und werden gleichfalls weiterentwickelt, diskutiert und theoretisiert. Aber eine These des ersten Kapitels deutet an, dass die philosophische Art des Argumentierens von der Mathematischen Logik in vielen Bereichen erkenntnistheoretischen Argumentierens abgelöst wurde, was unter anderem daran liegt, dass mathematische Formalisierungen die Grundlage für gegenwärtige Computertechnologien, Computermodelle und die gesamte künstliche Intelligenzforschung ausmachen. Und schon die Herausbildung der Logik als eigenständige Disziplin Anfang des 19. Jahrhunderts basiert auf Überlegungen aus der Mathematik. Syllogismen wurden durch deren mathematische Geschwister, durch Axiome ersetzt, die als apriorisch geltende Grundaussagen allein für die Mathematik gelten. Diese formal-logischen Grundkonzepte treffen nicht nur eine Entscheidung darüber, ob eine Aussage[1] wahr oder falsch ist; mit spezifischen Formalisierungen wie der *Algebraisierung der Logik* greifen die Überlegungen aus der Logik auf die Beschreibung der Prinzipien des menschlichen Denkens über.

Auch die Statistik basiert auf Logiken: auf der deskriptiven und der induktiven Logik. Diese beschreiben lediglich, welche Art des Schließens beim Theoretisieren verfolgt wird. Entweder die der beschreibenden Logik, die von gesicherten ›wahren‹ Grundaussagen ausgeht und deswegen zu ›wahren‹ oder validen Antworten kommt. Oder die der induktiven Logik, die nicht feststehende Prämissen annimmt, sondern eine Theorie aus der eigenen Beobachtung heraus entwickelt: »Inductive logic is about risky arguments. It analyses inductive arguments using probability.« (Hacking 2001, 11) Die Statistik wurde durch die Ergänzung der Wahrscheinlichkeitstheorie zur Stochastik (Verbindung von Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie), die auf mathematisch-induktiver Aussagenlogik beruht.

Die Geschichte der symbolisch-mathematischen Logik, so konnte in den letzten zwei Kapiteln gezeigt werden, ist seither mit den Vorstellungen des menschlichen Denkapparats verknüpft. Das gilt nach wie vor, auch im 21. Jahrhundert wird der Untersuchungsgegenstand Gehirn den Gesetzen der Mathematischen Logik unterworfen, heute ermöglicht durch rechenstarke Computer, implementiert in stochastische Berechnungen, wozu auch

1 Die Aussagenlogik, mit der sich nur einzelne Aussagen formalisieren lassen, wird um weitere Logiken wie die Klassenlogik oder die Modallogik erweitert.

die künstlichen Neuronalen Netzwerkalgorithmen gehören, ebenso wie die vermehrt eingesetzten Computermodelle und Simulationen neuronaler Prozesse. Heutige Vermessungstechnologien sind Berechnungstechnologien, die auf Wahrscheinlichkeit und der daraus abgeleiteten sogenannten Predictability (Vorhersagbarkeit) basieren.

Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts vollzogen sich zudem eine Miniaturisierung des Blicks und eine Fragmentierung physikalischer Körper und Eigenschaften; was sich etwa in der Entdeckung des Atoms und des Neurons/der Synapse ebenso ausdrückt wie im Auffinden wellenförmiger Frequentierung von Wärme, von Tönen und – mit Einstein – auch des Lichts. In den 1940er- und 1950er-Jahren wurden diese Erkenntnisse von der hauptsächlich militärisch genutzten Nachrichtentechnik zur Informationstheorie weiterentwickelt. Die Kybernetik und die angehenden Computerwissenschaften implementierten die Informationstheorie und Logik in den Aufbau und die Abläufe von Rechenmaschinen. Am Ende von Kapitel 2 steht die Entwicklung der modernen Naturwissenschaften, der Physik, und mit ihr der Physiologie, sowie speziell des Kognitivismus und des Konnektionismus. Wie die Kybernetik ist auch der Konnektionismus ein systemtheoretischer Ansatz, nur dass hier Systeme Neuronale Netzwerke heißen, aber ihre Konnektivität und Komplexität werden über die gleichen Steuerungs- und Verhaltensmuster bestimmt. Die Kybernetik wurde von anderen mathematisch-stochastisch analysierenden System- beziehungsweise Netzwerktheorien abgelöst: das, was weiter unten als Komplexitätstheorie vorgestellt wird. Die Komplexitätstheorie geht von Systemen aus, die sich nicht vollständig aus sich selbst heraus erklären lassen, sondern aus der spezifischen Art und Weise, wie die Vielzahl der in diesem System vorhandenen Teile miteinander agieren beziehungsweise kommunizieren und wie deren Prozesse sich spontan organisieren. Neuronale Netze werden als komplexe Systeme gefasst und Computational Neurosciences ist die Disziplin, die anhand synaptischer Feuerungsratendaten und mithilfe stochastischer Berechnungen diese Neuronalen Netze zu modellieren und simulieren sucht. Stochastik ist die Mathematik des Zufalls. »Stochastisch« heißt so viel wie zufällig und bringt die Wahrscheinlichkeitstheorie und die mathematische Statistik zusammen. Wahrscheinlichkeitstheorie, um mithilfe der Gesetze zufälliger Ereignisse mathematische Modellierungen vorzunehmen, die die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bestimmen. Mathematische Statistik gibt den Rahmen vor, aus Beobachtungsdaten Modellparameter durch die Angabe der statistischen Häufigkeit zu berechnen, mit der ein Merkmal innerhalb einer Grundgesamtheit einen möglichen Wert annimmt. Mit der anwendungsorientierten Ausrichtung der Mathematik in der Informatik wird ihre Aufgabe vermehrt in der Bearbeitung selbstreferenzieller Systeme gesehen, deren Wahrheitsgehalt in ihrer immanenten Widerspruchslosigkeit verortet wird.

In diesem Kapitel geht es darum, die epistemologischen Effekte der Entwicklungen, die in den ersten beiden Kapiteln beschrieben wurden, einzuordnen. Hierfür werde ich zunächst das Verhältnis von Mathematik und Logik vorstellen sowie die Kybernetik und den Konnektionismus als systemtheoretische Ansätze erläutern, deren Ausrichtung sich über neue konzeptionelle Perspektiven wie Autopoiesis, Selbstorganisation, Nichtlinearität bestimmt und die eine neue, mathematische Verfasstheit von Komplexität, von Zeitlichkeit und von Kausalität hervorbringen. Am Ende gehe ich auf die Kritik der instrumentellen Vernunft ein, die sich im Laufe der 1970er-Jahre formierte, um technische Deutungshoheit, gegen Mittel-zum-Zweck-Verhältnisse und gegen die Gutgläubigkeit der Menschen in Bezug auf künstliche Intelligenz zu problematisieren.

1.2 Zum Verhältnis von Mathematik und Logik

Logik und auch die *Mathematische, moderne Logik* ist nicht äquivalent mit der Mathematik, geht nicht in ihr auf. Auch wenn die moderne Logik als Disziplin aus in der Mathematik geführten Diskussionen hervorging, ist sie keine mathematische Teildisziplin, sondern hat eine eigenständige Agenda.

Logik ist seit jeher eine Disziplin der Formalisierungen. Ein Großteil der Anpassungen in der modernen Logik stammt aus den Formalisierungen, die in der Mathematik vorgenommen wurden. Viele Erweiterungen drehten sich um mathematische Grundlagenfragen, und einige der Begründer sowie viele Erneuerer der modernen Logik waren Mathematiker*innen. Dennoch liegt auch der Fokus der modernen Logik auf der Untersuchung höherer Logiksysteme, wie zum Beispiel der Klassenlogik,[2] bei deren Untersuchung sich zwar mathematische Begründungsprobleme abwägen lassen, ihr Erkenntnisinteresse aber nach wie vor im Sinne der formalen Logik der aristotelischen

2 Klassenlogik bezeichnet die Logik, die ihre Objekte in Klassen subsumiert. Als Teil der Mengenlehre muss die jeweilige Klasse durch die Eigenschaft ihrer Elemente erzeugt werden.

Wissenschaftsidee folgt. Mein vorhergehender Verweis auf die Eigenständigkeit der Disziplinen deutet an, wie unterschiedlich prominent die logischen Teildisziplinen in der Wissenschaft, aber auch in gesellschaftlichen Debatten verhandelt werden. Die moderne mathematisch-symbolische Logik ist gegenwärtig deutlich tonangebender als ihre philosophische Schwester. Noch wichtiger aber ist, dass Erstere in fast alle unsere heutigen technischen Apparaturen und naturwissenschaftlichen erkenntnistheoretischen Methoden Eingang gefunden hat und somit ein logisches Grundgerüst stellt, aus dem, auch in der Wissensproduktion, kaum ausgebrochen werden kann.

Erfolgreich ist die Mathematische Logik trotz oder gerade wegen ihrer Eingeständnisse über ihre eigenen Grenzen und Unschärfen und seit Gödel auch über ihre Unvollständigkeit. Beide Erkenntnisse lagen nah beieinander:

> Nur wenig später (nach Heisenberg) zeigte Kurt Gödel, auf welch unsicherem Boden sich selbst die Mathematik samt der Logik bewegte, in dem er bewies, daß jedes Formalsystem von Bedeutung einige Aussagen enthält, deren Wahrheit oder Falschheit mit den formalen Mitteln des Systems allein nicht entschieden werden kann, mit anderen Worten, daß die Mathematik notwendig unvollständig bleiben muß. (Weizenbaum 1990, 293)

Die Mathematische Logik selbst gibt zu bedenken, auf welch formal begrenztem Boden sie und mit ihr die daraus abgeleiteten mathematischen Bedingungen stehen.

Auch wenn Logik und Mathematik nicht ineinander aufgehen, lässt sich feststellen, dass die Entwicklung der Logik zu einer eigenständigen Disziplin von den innerhalb der Mathematik geführten Diskussionen und Überlegungen ausging. Eine bestimmte Form der Logik – die mathematische Definition dessen, was unter logischen Prozessen zu verstehen sei – bildet die Voraussetzung dafür, dass sich die heute so fundamentale Wahrscheinlichkeitstheorie in der Stochastik durchsetzen konnte. So erläutert Carnap in den 1960er-Jahren die »logische Natur« der Wahrscheinlichkeitsrechnung im Rahmen der induktiven Logik. Der Wahrscheinlichkeitswert wird nicht einem einzelnen Ereignis zugeschrieben, sondern, wie Carnap anhand eines Beispiels verdeutlicht, einer bestimmten logischen Relation zwischen der Voraussage des Regens und dem meteorologischen Datum. »Da diese Relation eine logische ist, so ist auch die Aussage selbst im Falle ihrer Wahrheit aus rein logischen Gründen wahr; sie bedarf keiner empirischen Verifikation.« (Carnap 1956, 26)

Um Abhilfe zu schaffen für die anwendungsorientierten Schwierigkeiten der Wahrscheinlichkeitstheorie, wurde das Gesetz der großen Zahl angewandt mit dem Ziel, das Problem der Uneindeutigkeit zu lösen. Das Gesetz der großen Zahl besagt, dass Wahrscheinliches wahrscheinlicher wird, wenn das Experiment immer wieder unter den gleichen Bedingungen durchgeführt wird. Als Beispiel: Bei wenigen Würfelwürfen kann der Durchschnittswert von dem gemittelten Durchschnittswert 1/6 abweichen. Würfelt man nur 6x, liegt der Wahrscheinlichkeitswert so gut wie nie bei 1/6, sondern entweder unter oder über diesem Wert. Erst bei unendlich vielen Würfelwürfen nähert sich die gemittelte Wahrscheinlichkeit, eine Sechs zu würfeln, dem Wert 1/6 an. Mit dieser Prämisse, die relative Wahrscheinlichkeit ihrem statistischen Wert zuzuführen, wurde die mathematisch einwandfreie, aber der physikalischen Realität fremde Kategorie der Unendlichkeit eingeführt. Der Bezugsrahmen für wahrscheinlich eintretende Ereignisse wurde demnach radikal verändert beziehungsweise in einen erfahrungsunabhängigen Raum der Unendlichkeit verlegt.

> Die Moderne bringt das Unendliche in die Schriftzeichen, ohne sich dabei auf die Vorstellung von unendlich vielen Dingen oder Handlungen zu beziehen. Im Endlichen der Zeichen dann argumentiert sie, so wie es in der Mathematik immer üblich ist: Wenn dies falsch ist, muß das Gegenteil wahr sein, tertium non datur. Dagegen stellt sich die Gegenmoderne und sucht in ihrer radikalen Zuspitzung, alle mathematische Theorie so zu rekonstruieren, daß sie sich aus der Elementarhandlung des Eins-nach-dem-Anderen, dem elementaren Prinzip des Zählens ableiten lässt. In der Konsequenz ist das Tertium non datur damit ungültig, sobald es auf das Unendliche angewandt wird. Hier gibt es ein Drittes, das Unentschiedene und vielleicht das Unentscheidbare. Der Witz an diesem Widerspruch zur Moderne ist, daß der Streit unter anderem auf die Theorie der Entscheidbarkeit und damit auf die der Denkmaschine hinauslief. (Mehrtens 1990a, 14)

Die in sich geschlossene und selbstreferenzielle Mathematische Logik, die keine Erfahrungswerte mehr benötigt, sondern aufgrund bereits existierender Daten die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Ereignisse ermittelt, ermöglichte den Erfolg der Wahrscheinlichkeitstheorie und damit aller stochastischen Prozesse, die heute durch ihre Implementierung in Technologien Simulationen und Zukunftsberechnungen ermöglichen.

Die von Mathematiker*innen initiierte Neuausrichtung der *Modernen Logik* ist demnach eng mit dem Erfolg der Wahrscheinlichkeitstheorie verknüpft. Letztere verdankt ihren Erfolg wiederum der Logik, da sich die Wahrscheinlichkeitstheorie rein auf ihre logische Inhärenz stützt. Dadurch wurde nicht nur die induktive Logik, also »alle Arten des Schließens […], bei denen die Conclusio über den Gehalt der Prämissen hinausgeht und daher nicht mit absoluter Sicherheit behauptet werden kann« (Stegmüller 1956, 1), zur tonangebenden wissenschaftlichen Methode. Auch wurde die über viele Jahrhunderte geführte erkenntnistheoretische Debatte über die Bedingungen einer möglichst ›wahren‹ Erkenntnisproduktion empirischer oder beschreibender Art in einer nie dagewesenen Einheitlichkeit beantwortet. Die mit der Wahrscheinlichkeitstheorie entstandenen Möglichkeiten der Berechnung – wie sie etwa in Simulationen und Computermodellen zur Anwendung kommen – werden seither zunehmend wichtiger in der Wissenschaft.

1.2 Differentialgleichung

»The first thing that a mathematics student learns on entering college (and often before) is the differential calculus. In order to differentiate, you first learn about derivatives.« (Hacking 2014, 62) Um rechnen zu können, muss man lernen zu differenzieren, um zu differenzieren, muss man verstehen, Funktionen, Klassen oder Bedeutungen aus anderen, in Relation dazu gestellten Kategorien abzuleiten. Gottfried Wilhelm Leibniz und Isaac Newton bereiteten unabhängig voneinander den Boden für die Infinitesimalrechnung, die später zur *Analysis*, einem Teilgebiet der Mathematik, wird und der Überbegriff für Differential- und Integralrechnung ist. Mit der Infinitesimalrechnung lassen sich Funktionen auf unendlich kleinen (d.h. infinitesimalen) Abschnitten widerspruchsfrei beschreiben. Leibniz' Differenzmethode beispielsweise definiert eine Kurve als unendlich, sodass eine Tangente letztlich die Kurve in einer unendlich kleinen Strecke schneiden musste. Auf diesem unendlich kleinen Abschnitt der Tangente lässt sich mithilfe eines infinitesimalen Steigungsdreiecks die Steigung der Tangente bestimmen. Mathematische Modernisierung heißt für den Mathematiker und Wissenschaftshistoriker Herbert Mehrtens »Differenzierung und Diversifizierung. […] Die neue Variante ist die Spaltung in zwei ›Lager‹, die in der gemeinsamen Praxis nicht existieren, aber undeutliche Abbildung einer ganzen Reihe von Oppositionen sind, wie rein-angewandt, […] Algebra-Geometrie, Rede-Sprache, Subjekt-Objekt.« (Mehrtens 1990a, 16)

Die Integralrechnung ist eine Methode zur Berechnung von Flächen unter Zuhilfenahme von Funktionsgraphen. Die Differentialrechnung ist eine Vorgehensweise, um lokale Veränderungen von Funktionen, trotz Unbekannter, zu berechnen. Einer Funktion ist normalerweise ein Eingabewert und nach tabellarischem Prinzip ein Ausgabewert zugeordnet. Mithilfe der Differentialgleichung können lokale und auch sehr kleine Veränderungen in die Eingabewerte einberechnet werden, was demnach Variationen der Ausgabewerte zulässt. Die Infinitesimalrechnung, und somit auch die Differential- und Integralrechnung, ist in allen Natur- und Ingenieurwissenschaften von großer Bedeutung und basiert auf Begriffen wie Grenzwert, Folge und Reihe. Mit diesem Werkzeugkasten des Differenzierens einzelner Variablen, beispielsweise um die Steigung einer Kurve zu bestimmen, wird die Kurve in unendlich viele Abschnitte unterteilt und jedem Punkt auf der Kurve ein anderer Steigerungswert zugeschrieben. Durch diese Verlagerung in den Unendlichkeitsraum und die Unterteilung in unendlich viele Einzelabschnitte lassen sich die Abschnitte voneinander unterscheiden, in Variablen voneinander abgrenzen und so in einer Gleichung in eine mathematisch ausgedrückte Relation bringen. Über das Anlegen und Anwenden geometrischer Formen im unendlichen Raum lassen sich Naturphänomene mathematisch beschreiben. Die leibnizsche und newtonsche Analysis ist ein Werkzeugkasten, vielleicht einer der wichtigsten Formalisierungsschritte und wegweisend für viele weitere Formalisierungen, die in der Geschichte der Mathematik noch folgen sollten: »Schönes historisches Beispiel ist die Differential- und Integralrechnung. Sie ist eine der ersten Formalisierungen, mit seinen Zeichen, die es hervorgebracht hat und die bis heute Bestand haben. Manches hat sich durchgesetzt, anderes nicht.« (Interview 1, Min. 31f.)

1.3 Klassenzugehörigkeit – die eindeutige Kategorie

Seit ihren Anfängen zielt die Mathematische Logik, neben der sukzessiven Formalisierung und Bereitstellung einer sich universal gerierenden Zeichensprache, auch auf die Suche nach den »Gesetzen des Denkens« (Mehrtens 1990a, 502). Spätestens mit George Booles »Algebraisierung der Logik« (Guillaume 1985, 816) wird dieser Wunsch Programm. Booles zweites großes Werk, das als mathematischer Werkzeugkasten unseres Computerzeitalters gilt, heißt dementsprechend: *An Investigation of the Laws of Thought on which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities* (1854). Diese hierin formalisierte Algebra, die die Eigenschaften von Rechenoperationen und das Rechnen mit Unbekannten regelt, »diese ›Algebra der Logik‹ ist im wörtlichen Sinne nicht die Logik selbst, sondern deren *Struktur*« (Peckhaus 1994, 366; Hervorh. im Orig.).

In dem Moment, da die boolesche Algebra und die darin eingelassene Definition der Aussagenlogik, dass Aussagen entweder wahr oder falsch sein müssen, in den Computer implementiert wurde, wurde zweierlei zementiert: die Notwendigkeit, alle Aussagen, Annahmen, Wahrscheinlichkeiten mit 0 oder 1 anzugeben, und ebenso, dass alle Aussagen nur eines von beiden sein können: wahr oder falsch, wahrscheinlich oder unwahrscheinlich, gefällt oder nicht gefällt, anwesend sein oder nicht anwesend sein. Zufällige oder unvorhergesehene Ereignisse und ihre dialektische oder komplementäre Verwobenheit werden konsequent ausgeblendet. Norbert Wiener gibt an, dass sich der in Rechenmaschinen eingelassene boolesche Algorithmus auf der Dichotomie von ja und nein begründet, die angibt, ob eine Aussage innerhalb oder außerhalb einer Klasse liegt. Das heißt, dass alle Daten, die in die Rechenmaschine eingespeist werden, in Form zweier verschiedener Alternativen angegeben werden müssen: So haben alle Daten, numerische wie logische, die in die Maschine eingegeben werden, die Form einer Anzahl von Auswahlen zwischen zwei Alternativen, und alle Operationen mit den Daten nehmen die Form der Bildung einer neuen Menge von Auswahlen abhängig von einer Menge von alten Auswahlen an. »Das bedeutet, daß jede Möglichkeit, die während der Operation der Maschine eintreten kann, einfach eine neue Menge von Auswahlen der Möglichkeiten 1 und 0 bestimmt, die nach einer festen Menge von Regeln von den bereits gefällten Entscheidungen abhängt.« (Wiener 1992, 174)

In Bettina Heintz' Beschreibung über die Anfänge der Algorithmusdefinition in den 1930er-Jahren erweitert sie die übliche Erzählung der Einbettung von Entscheidungsalgorithmen in die Turingmaschine um eine zur selben Zeit aufgestellte Lösung des gleichen Problems durch Emil Posts (1897–1954) Annahme eines ›Arbeiters‹:

> Alan Turing war zu seiner Zeit nicht der einzige Mathematiker, der sich um eine formale Definition des Algorithmusbegriffs bemühte. Im selben Jahr, 1936, als Turing seine Arbeit publizierte, stellte Alonzo Church seine berühmte These auf, und ein dritter Mathematiker, Emil Post, schlug eine weitere Präzisierung vor, und zwar mit Hilfe einer Argumentation, die praktisch deckungsgleich war mit jener von Turing. Turing und Post wußten nicht voneinander, und dennoch kamen beide auf genau dieselbe Idee. Mit einem bezeichnenden Unterschied allerdings. Beide verbanden die Idee des Algorithmus mit etwas »Mechanischem«, nur führte Turing zur Präzisierung eine Maschine ein, Emil Post dagegen einen Fließbandarbeiter. [...]

> ein ›Arbeiter‹, der völlig mechanisch seinen Instruktionen folgt. Der Postsche Arbeiter bewegt sich in einem ›symbol space‹, und dieser Symbolraum besteht wie bei Turing aus einer unendlichen Folge von Feldern, die entweder leer sind oder eine Markierung enthalten. [...] Der Postsche Arbeiter tut also genau dasselbe wie Turings Maschinenkopf. Er bewegt sich nach rechts oder nach links, überschreibt ein Symbol oder löscht es. Und dies alles tut er, wie eine Maschine, völlig mechanisch. [...] Beide Präzisierungen des Algorithmusbegriffs sind mathematisch gesehen äquivalent. [...] [Beide] illustrierten diese Idee anhand eines praktisch identischen Designs: Ein unendliches Band. Unterteilung in Felder. Einfachste Handlungen. Mechanisches Ausführen von Befehlen. Schrittweises Vorgehen. Sequenzielle Anordnung. Der Grundgedanke blieb bei beiden gleich: Das Befolgen eines Algorithmus ist ein Prozeß, dessen Ausführung keine Abweichung, keinen Spielraum zuläßt. (Heintz 1993, 166f.)

Diese Beschreibung einer algorithmischen Abfolge ist bis heute die gleiche geblieben. Allein die sequenzielle Anordnung der Lösungsschritte hat sich verändert, wurde durch parallel verarbeitende Prozesse ersetzt. Ebenso wurde das systemtheoretische Konzept der Selbstorganisation durch die Implementierung rekursiver Prozesse eingeführt. Hier können die Algorithmen, die von ihnen erbrachten ›Beweise‹, die sich in 0 und 1 ausdrücken, in den weiteren Berechnungsprozess wieder eingespeist werden. McCullochs Anwendung des ins Maschinelle übersetzte Aussagenlogikkalküls zur Berechnung Neuronaler Netze beschreibt die Wissenschaftshistorikerin Lili E. Kay als gewöhnliche Ausschlusslogik:

> For example, one of the early studies, following in the heels of the »Logical Calculus,« was McCulloch's theoretical analysis, »The Heterarchy of Values Determined by the Topology of Nervous Nets« (1945): a preliminary introduction to nets describing purposive activities, namely, circular, non-hierarchical nets, that he christened »heterarchy.« He demonstrated that in such nets, when stimuli appropriate to a number of actions are present, then only the most valued action will be emitted. In order to demonstrate that the architecture of such a neural net in no way implied a strict hierarchical ordering of actions, he constructed a net which, confronted with three choices: A or B, B or C, and C or A, emit A rather than B, B rather than C, but C rather than A. This concept of heterarchy and its terminology became incorporated in the literature of Artificial Intelligence. (Kay 2001, 604)

Auch wenn der von McCulloch prominent gemachte Begriff der Heterarchie im Sinne der Komplexitätstheorie ein System von Elementen beschreibt, die vom Gedanken her gleichberechtigt nebeneinanderstehen, wird dieses Unterfangen spätestens in der Berechnung derselben ins Gegenteil verkehrt. Die Elemente eines Systems werden wiederum als abgeschlossene Systeme behandelt, die in Konkurrenz zueinander entweder A oder B sind, aber nicht AB beziehungsweise etwas ganz anderes sein können. Auch der Begriff der Rekursivität hilft nicht dabei, die Komplexität der Welt in die mathematischen Modelle, die diese berechnen, zu bringen. Algorithmen, die Vorgänge komplexer Systeme beschreiben, gehen von deren Rekursivität aus. Rekursiv heißt so viel wie ›durch sich selbst definierend‹ oder ›zu bekannten Werten zurückgehend‹, was bedeutet, nur abgeschlossene Systeme können modelliert werden. Dies wird aber der Komplexität und Verwobenheit der physikalischen Welt oft nicht gerecht: »The algorithms in these discussions, whether recursive or not, are situated within organizational settings and sets of interactions which are anything but recursive.« (Neyland 2015, 121)

Neben der Notwendigkeit von Ja/Nein- sowie von 0-und-1-Aussagen müssen sich diese Antworten auch ausschließen.

> Even if each unit is told after each trial whether it should have fired faster or slower, a procedure known as supervised learning, it cannot be trained to perform even quite simple operations. The classic example is the exclusive OR (A, or B, but not both A and B). This can easily be done if a net of several layers is allowed. Unfortunately, this leads to a problem: of all the various synapses, which ones should be adjusted to improve performance? This is especially acute if the synapses lie on several different layers of neurons. (Crick 1989, 130)

Die mittels der Wahrscheinlichkeitstheorie vorhergesagten Ereignisse werden nicht mehr absolut mit 1 und 0 angegeben, sondern graduell, die Wahrscheinlichkeitswerte können auch mit Zahlen zwischen 0 und 1 angegeben werden. Dennoch stehen die Ereignisse auch weiterhin in Konkurrenz zueinander, wenn das eine Ereignis wahrscheinlich eintreten kann, schließt es das Eintreten eines anderen Ereignisses aus. Thomas Bayes definiert in seinen Grundsätzen zur bedingten Wahrscheinlichkeit – ein Wahrscheinlichkeitsbegriff, auf den heute vermehrt im Modelling Neuronaler Netze zurückgegriffen wird (s. Kap. 3.2) –, dass erstens »mehrere Ereignisse unvereinbar sind, wenn das Eintreten eines von ihnen das Eintreten der übrigen ausschließt«, zweitens »zwei Ereignisse entgegengesetzt sind, wenn eines von ihnen eintreten 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 Netzwer-