rechnungen 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.).

Das Feld der Wahrscheinlichkeitsmöglichkeiten lässt sich auch anders bemessen, und je nach Unterteilung, die man vornimmt, kommt man zu einem anderen Ergebnis:

> Wenn etwa nach der Wahrscheinlichkeit gefragt wird, daß mit einer Münze zweimal hintereinander ›Schrift‹ geworfen wird, so könnte man zunächst die Überlegung anstellen, daß es drei Möglichkeiten gäbe: 1. zweimal Schrift, 2. zweimal Kopf, 3. einmal Kopf und einmal Schrift; die gesuchte Wahrscheinlichkeit wäre also gleich 1/3. Nach einer anderen Überlegung würde man jedoch die dritte Möglichkeit nochmals zu unterteilen haben in ›zuerst Kopf, dann Schrift‹ und »zuerst Schrift, dann Kopf«, wodurch man als gesuchten Wahrscheinlichkeitswert 1/4 herausbekäme. (Stegmüller in Carnap 1959, 3)

Seit dem 17. Jahrhundert haben sich noch einige weitere Wahrscheinlichkeitskonzepte herausgebildet. Wahrscheinlichkeit in der frequentistischen Definition bedeutet etwa, dass die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses im Falle eines wiederholbaren Experiments den Grenzwert der relativen Häufigkeit des Eintretens dieses Ereignisses bei vielen Wiederholungen darstellt. Andererseits versagt Wahrscheinlichkeit als physikalische Größe in Experimenten, die man nicht oft wiederholen kann. Nach Bayes bedeutet Wahrscheinlichkeit: Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ist ein Maß dafür, wie stark man von dem Eintreten des Ereignisses überzeugt ist. Nicht mehr das Maß an Zufälligkeit ist ausschlaggebend, sondern die Einschätzung darüber, was ein wahrscheinlicheres Ereignis ist. In dem Würfel- und Münzbeispiel wird Ereignissen eine Eigenschaft zugeschrieben und deren Wahrscheinlichkeit bemessen. Werden diese Eigenschaften konkretisiert, heißt auf Personen bezogen oder darauf, dass der nächste Wurf eine Sechs wird, handelt es sich um die Wahrscheinlichkeitsvorhersage einer Aussage. Das heißt, es kann von mindestens drei verschiedenen Arten von Wahrscheinlichkeiten ausgegangen werden, die vorhergesagt werden sollen: die Wahrscheinlichkeit von Argumenten, Aussagen und Eigenschaften. Für alle Wahrscheinlichkeitskonzepte wurden mathematische Formalisierungen gefunden, sodass sie in mathematische Berechnungen einfließen können.

In Kapitel 1 wurde bereits auf eine weitere Unterscheidung in der Wahrscheinlichkeitstheorie hingewiesen, zwischen sogenannter subjektiver und objektiver Wahrscheinlichkeit. Im Folgenden möchte ich die subjektiv verfasste bedingte Wahrscheinlichkeit nach Thomas Bayes näher erläutern.

3.1 Bedingte Wahrscheinlichkeit oder Intuition quantifizieren – Bayes

Ein allgemeines Schema zum Rechnen mit Wahrscheinlichkeiten wurde 1774 von Pierre-Simon Laplace in seinem Artikel *Treatise on the Probability of the Causes of Events* vorgestellt. Das Laplace'sche Gesetz stellt eine Möglichkeit vor, wie man von beobachteten Effekten auf ihre wahrscheinlichen Ursachen rückschließen kann. Sie lässt sich für jedes Ereignis anwenden, in der man die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses auf der Grundlage seiner Geschichte einschätzen kann. Eine ähnliche Idee wie Laplace, die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses rückwärts, von seinem Eintreten her zu denken, hatte auch der Mathematiker, Statistiker und presbyterianische Pfarrer Thomas Bayes (1702–1761). Bayes notierte seine Gedanken in seinem Essay *Towards solving a problem in the doctrine of chances*, der erst nach seinem Tod erschien. Hierin definiert Bayes einen inversen Wahrscheinlichkeitsansatz, der zu seiner Zeit kaum Beachtung fand und erst in den 1990er-Jahren, mit steigender Computerrechenleistung, wiederendeckt wurde. Bayes definiert in seinem Essay insgesamt sieben Wahrscheinlichkeitsannahmen, drei dieser Lehrsätze sollen hier kurz vorgestellt werden: Satz 4 besagt, dass »ein Ereignis entschieden ist, wenn es entweder eingetreten oder ausgeblieben ist«. Satz 5 definiert den zu errechnenden Wahrscheinlichkeitswert eines Ereignisses: »[D]ie Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ist das Verhältnis zwischen dem Wert, welcher einer an das Eintreten des Ereignisses geknüpfte Erwartung zu geben ist, und dem Werte des in diesem Falle erwarteten Gewinns.« Im 6. Satz stellt Bayes mit der Gleichstellung von *chance* und *probability* seine Wahrscheinlichkeitsdefinition in die Tradition der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie, um sie darüber zu plausibilisieren: »Unter Chance verstehe ich dasselbe wie unter Wahrscheinlichkeit.« (alle Zitate: Bayes 1908, 4)

Bayes Definition bringt erstmals den Gedanken einer gegenseitigen Abhängigkeit von Wahrscheinlichkeiten ins Spiel. Die Abhängigkeit von Ereignissen erlaubt es, das Eintreten eines Ereignisses A unter der Bedingung, dass ein Ereignis B eingetreten ist, zu berechnen. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von A hängt vom Eintreten von B ab. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintritt, bedingt die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines anderen Ereignisses und wird deswegen auch als bedingte Wahrscheinlichkeit beschrieben.

Bayes hatte im Anschluss an Laplace einen Weg gefunden, die relative Wahrscheinlichkeit einer Hypothese mit der einer anderen zu vergleichen. Laplace hatte mithilfe der Infinitesimalrechnung bewiesen, dass sich ein riesiges Spektrum an Möglichkeiten auf eine einzige Schätzung reduzieren lässt. Das heißt, wenn wir nichts über einen Kontext, über den wir eine Vorhersage machen wollen, wissen, dann bestimmt die erwartete Wahrscheinlichkeit den Rahmen, der definiert werden soll.

In einem der von mir geführten Interviews wird das Modellieren mit bayesscher Wahrscheinlichkeit als Festlegen einer Art wahrscheinlichsten Wahrscheinlichkeit beschrieben. Das im Interview beschriebene Fallbeispiel bezieht sich auf das Modellieren kognitiver Wahrnehmung für das Erkennen eines Kippbildes, auf dem manche eine junge Frau sehen, andere eine alte Frau, einige beide hintereinander, aber niemals können die alte und die junge Frau gleichzeitig gesehen werden. Für die Programmierung eines Computermodells dieses kognitiven Vorgangs wird nun die Wahrscheinlichkeit für die Information, die von den Neuronalen Netzen erkannt wird, auf diese beiden Variablen festgelegt, da sie, vom Ergebnis her gedacht, am wahrscheinlichsten eintreten.

> Take a Bayesian model of, why you see an old woman or a young woman. And the Bayesian may say, that's because that is most probable, that's the most probable interpretation given by the data. The data is just the black and white pixels, and they say, but why is it not a house? It could be a house, but the probability that that is a house is very low given the configuration of the dots, but there is a good probability that it is an old woman, there is also a good probability that it is a young woman. Bayesian would tend to model in terms of probabilities and make probabilistic inferences. […] Not all Bayesians take that view, but there is also a big group of Bayesians who commit that Bayesians models are both normative and descriptive and they may say this is why cognition is Bayesian because probably evolution optimized us to be so. (Interview 5, 42 Min.)

Die bayessche Anwendung von Wahrscheinlichkeit ist heute in vielen Bereichen, die mit Statistik arbeiten, vor allem aber in Computermodellen und Simulationen verbreitet. »Over the past decades we have seen the rise of probabilistic, mostly Bayesian, epistemology. And in statistics, due to conceptual advantages but possibly also due to improved computing power, the use of Bayesian statistics has become more mainstream.« (Hacking 2016, ix) Die Verbreitung des bayesschen Wahrscheinlichkeitsverständnisses hat einiges an weiterer Forschung an der Schnittstelle von Statistik, Logik und Erkenntnistheorie nach sich gezogen. Bayes' Verwendung eines durchaus subjektiven Zugangs zur numerischen Berechnung von Vorhersagen ist in der

Mathematik höchst umstritten, findet aber breiten Anklang in den Modellierungen Neuronaler Netzwerke und ist somit ein wichtiger Bestandteil der Computational Neurosciences.

In der Stochastik und der Probabilistik greifen mathematische und Computermodelle auf verschiedene Ausprägungen von Wahrscheinlichkeit zurück, die wiederum darüber entscheiden, welche auf Vorhersagen beruhende Entscheidungen in die stochastischen Prozesse eingeschrieben werden. Aber auch die statistische Mittelung der gaußschen Normalverteilung wird weiterhin in den Computermodellen der Neuronennetzwerke angewendet:

> Qualities in the natural world often conform to Gaussian (normal) distributions in which measured values are symmetrically clustered around a mean value. Adding variation to model parameters can be done by adding Gaussian noise, drawn from a *Gaussian distribution* with zero mean and a specified variance, to the mean parameter value. (Sterratt et al. 2014, 343; Hervorh. im Orig.)

Diese Mittelung unterscheidet sich dabei von der bayesschen Wahrscheinlichkeit, die nicht statistisch mittelt, sondern aus Erfahrungen und Kontexten Bezüge heranzieht, um über die ›Intuition‹ zu den Bedingungen einer wahrscheinlichsten Wahrscheinlichkeit zu kommen.

3.2 Probabilistik = Stochastik

Die Probabilistik verweist schon in ihrem Namen auf die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie, um statistische Zufallsverteilungen und Vorhersagen anhand der Einstufung von Ereignissen nach dem Grad ihrer Gewissheit vorzunehmen. Durch Anwendung wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlagen formalisiert, modelliert und untersucht die Probabilistik das Verhalten von Zufallsverteilungen.

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, ist es die Wahrscheinlichkeitstheorie mit ihren konkreten Berechnungsweisen, die die Erfolgsgeschichte der modernen Naturwissenschaft, später auch der Geistes- und Sozialwissenschaften, begründet. Die probabilistische Revolution (Krüger/Daston/Heidelberger 1987) stellt das statistische Denken auf völlig neue Füße, die leise Revolution drückt sich zunächst nicht in neuen technischen Entdeckungen aus, sondern bringt einen grundlegenden Wandel epistemologischer Bedingungen hervor, der einen allumfassenden Einsatz von Statistik und Stochastik in der Wissensproduktion nach sich zieht.

Die klassischen wissenschaftlichen Gesetze beschränkten sich auf lineare Verbindungen zwischen diskreten Elementen, deren Wechselwirkungen auf der Grundlage ihrer individuellen Eigenschaften vorhergesagt werden konnten. Die Thermodynamik beendete die newtonsche Ära des mechanischen Determinismus und brachte nicht lineare, komplexe Systeme mit gänzlich neuen Bedingungen hervor. Die Gesetze komplexer Systeme beziehen sich auf größere Einheiten mit mehreren Elementen, deren Verhalten nicht mehr aus sich selbst heraus erklärt werden kann, sondern in der Wechselwirkung mit den anderen Einheiten eines Systems. Probabilistik berechnet nun das (Entscheidungs-)Verhalten dieser Einheiten mithilfe von Zufallsvariablen. Das einzelne Verhalten der Einheiten komplexer Systeme kann nicht mehr deterministisch festgelegt werden, sondern muss mithilfe von Wahrscheinlichkeitsgesetzen formalisiert werden. Wahrscheinlichkeitsgesetze bestimmen die Verteilung von Zufallsvariablen, wobei sich die Bedeutung der Begriffe wie Zufall, Kausalität und Zeitlichkeit mit Eintreten der mathematisch-statistischen Logik in die Wissensproduktion deutlich von ihrer alltäglichen oder philosophischen Verwendung unterscheidet. Zufall ist keinesfalls auf die Nichtverfügbarkeit vollständiger Informationen oder auf die Abwesenheit von Notwendigkeit zurückzuführen.

Probabilistik ist wie die Stochastik ein Anwendungsgebiet der Wahrscheinlichkeitstheorie, beide Begriffe werden in diesem Buch synonym verwendet. Beide beschreiben die Errungenschaften, die aufgrund der Wahrscheinlichkeitstheorie in die statistische Analyse experimenteller Daten integriert werden konnten. Die Mathematisierung der Analysewerkzeuge führte, neben der statistischen Mechanik von Ludwig Boltzmann und der Biometrik von Karl Pearson, zu einem grundlegenden Perspektivenwechsel in den Laborwissenschaften: zu einer »Objectivation of Observation« (Swijtink 1987, 261).

4 Neue Zeitlichkeit

Anhand des Wandels von vorchristlichen, zyklischen Vorstellungen von Welt hin zu einer Implementierung christlich, ewiger Ordnung im Universum lässt sich die neue Zeitlichkeit verdeutlichen. Obwohl Namensgeberin für die Ewigkeit, steht die in Rom verehrte Gottheit Aeternitas (lat. »Ewigkeit«)