

Einleitung Originaldokument

Zufall und Risiko, Krisen und neue Chancen bestimmen unser Leben. Zufällig nennen wir ein Ereignis, das ohne Grund eintritt oder dessen Grund wir nicht kennen. Unvorhergesehene Unfälle und glückliche Wendungen gab es immer schon. Launenhaft scheint dann die Göttin Fortuna das Glücksrad des Lebens zu drehen. In einer überschaubaren und berechenbaren Welt bleiben aber plötzliche Zufälle die Ausnahme. In einer immer komplexer und unübersichtlicher werdenden Welt der Globalisierung wird die Zukunft jedoch immer schwieriger kalkulierbar. Naturkatastrophen, Wirtschafts- und Finanzkrisen globalen Ausmaßes, deren Gründe wir nur ahnen, aber nicht beherrschen, scheinen wie biblische Heuschreckenplagen und Hungersnöte über uns hereinzubrechen. Frühere Generationen verfügten noch über langfristige Perspektiven mit verlässlichen sozialen und beruflichen Sicherungssystemen. Heute sehen sich Menschen aller Altersstufen heftigen Zufallsschwankungen und Fluktuationen von Angebot und Nachfrage auf den globalen Arbeitsmärkten ausgesetzt, auf die sie reagieren und die Initiative ergreifen müssen. Viele sehen hier auch ihre Chance. Ohne Zufall und Einfall gibt es keine Veränderung und Innovation. Zufall ist auch der Katalysator für Kreativität. In diesem Sinn handelt dieses Buch vom «kreativen Zufall» in Natur und Gesellschaft.

Tatsächlich ist die Vorstellung einer deterministischen Welt mit eindeutig bestimmter Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft eine Fiktion, die in der heutigen Naturwissenschaft nur noch als vereinfachte Approximation verwendet wird. Fehlerrechnungen in Astronomie und Satellitenforschung zeigen, dass selbst die klassische Himmelsmechanik statistische Schwankungen und zufällige Abweichungen von den idealen Keplerschen Planetenbahnen berücksichtigen muss. Zufall erweist sich als das zentrale Thema der modernen Natur- und Sozialwissenschaften.

Die mathematischen Gesetze von Zufallsprozessen untersuchen Wahrscheinlichkeitstheorie, Stochastik und Informatik. Wie das einfache Beispiel des Münzwurfs bereits zeigt, weisen Zufallsprozesse durchaus Gesetzmäßigkeiten auf: Wiederholt man ein Zufallsexperi-

ment oft genug, geht der Mittelwert gegen einen erwarteten Wert. Der russische Mathematiker Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow stellte daher fest, dass «der Erkenntniswert der Wahrscheinlichkeitstheorie auf der Tatsache beruht, dass zufällige Ereignisse, die man gemeinsam und in großem Maßstab betrachtet, eine nichtzufällige Regelmäßigkeit hervorbringen».¹ Der Zufall erweist sich als Voraussetzung für die Entstehung von Ordnung. Zufallsschwankungen in komplexen Systemen mit vielen Elementen erzeugen unter geeigneten Bedingungen z.B. Strömungsbilder in der Thermodynamik, Verkehrsströme im Straßenverkehr oder Trendbilder bei Meinungsumfragen. Mutationen können zufällige Veränderungen des Erbguts sein, die erst neue Arten in der Evolution des Lebens entstehen lassen. Zufallsrauschen der Gehirndynamik ermöglicht plötzliche Einfälle, die zu Innovationen führen.

Grundlegend für alle diese Prozesse sind die Zufallsschwankungen der Quantenwelt. Hier treffen wir auf elementarste Zufallsergebnisse des Universums, die prinzipiell grundlos eintreten. Einstein war darüber so betroffen, dass er den Quantentheoretikern den berühmten Ausspruch entgeschleuderte: «Gott würfelt nicht.»² Statistische Berechnungen über mögliche Aufenthaltsorte von Elementarteilchen schienen ihm bestenfalls als vorläufige Approximationen tauglich, die durch das Unwissen über die wahren («deterministischen») Gesetze gerechtfertigt sind. Tatsächlich führt aber die Annahme von verborgenen Vorbestimmungen der Quantenereignisse zu Widersprüchen mit Messergebnissen. Quantenzufälle sind also objektiv und treten unabhängig vom Stand menschlichen Wissens ein.

Quantensysteme sind zudem die elementarsten Träger von Informationen. Quantenzustände von Elementarteilchen mit alternativen Eigenschaften wie z.B. Spins realisieren Bits, die sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik wie Wellen überlagern können. Dadurch werden Gesamtzustände («Superpositionen») von vielen Bits möglich, die von Quantencomputern gleichzeitig mit einer gigantischen Steigerung der Rechengeschwindigkeit gegenüber herkömmlichen Computern bearbeitet werden könnten. Allerdings liefert eine Quantenmessung immer nur zufällige Ergebnisse über alternative Informationen. Andererseits erlaubt nur der objektive Zufall von Quantenereignissen die Erzeugung eines absolut sicheren Schlüssels zur Codierung von Nachrichten. Jedes konventionelle Computerprogramm stellt nämlich Pseudo-Zufallsfolgen her, da seine Regeln für die Decodierung verwendet werden könnten. Merkwürdigerweise ist

es also gerade der absolute Zufall, der absolute Sicherheit garantiert. Das sind nur einige Beispiele der technischen Innovationen, die durch zufällige Quantenfluktuationen in der Quanteninformatik möglich werden. Der Zufall wird wieder Anstoß für kreative Innovationen.

Allgemein, so wird dieses Buch zeigen, stehen Zufallsfluktuationen an der Wiege neuer Strukturen – von Quantensystemen und molekularen Verbindungen über Organismen und Gehirne bis zu Wirtschafts- und Gesellschaftssystemen. Allerdings gibt es nicht «den» Zufall, sondern Grade von Zufallsmustern und Zufallsprozessen unterschiedlicher Komplexität, die in der Evolution entstanden sind. Ebenso wenig gibt es aber «das» intelligente Gesamtdesign, in dem die Abfolge dieser evolutionären Entwicklungsschritte von vornherein festgelegt wäre. Dahinter steht die naive anthropomorphe Vorstellung, wonach ein menschlicher Handwerker oder Programmierer intelligenter sein muss als sein Werk oder Programm, um vorher alle Details festlegen zu können. Ein überholtes historisches Beispiel war das mechanistische Weltbild, wonach ein Mechanikergott diese Welt wie eine Maschine gebaut hatte. Auch bei der Entwicklung des Menschen stellte man sich in der Zeit vor Darwin aus denselben Gründen kleine fertige Homunculi vor, die sich aus dem menschlichen Samen wie russische Puppen herauschälten. Daher galten auch Maschinen, die sich selber erzeugen, von vornherein als ausgeschlossen. Alle diese Vorstellungen sind heute mathematisch und naturwissenschaftlich widerlegt.

Den Durchbruch liefert die moderne mathematische Systemtheorie: Nach den Gesetzen der Selbstorganisation komplexer dynamischer Systeme können aus den Wechselwirkungen der Systemelemente neue kollektive Strukturen entstehen, die in den Systemelementen noch nicht vorgesehen sind. Man spricht in dem Zusammenhang von der Emergenz neuer Strukturen. Am Anfang des Universums stehen zufällige Quantenfluktuationen, deren Wechselwirkungen nach den Gesetzen der Quantenmechanik die Entstehung kosmischer Strukturen ermöglichen. Dass in einem Meer von quantenmechanischen Zufallsfluktuationen dieses Universum oder vielleicht sogar noch viele andere entstanden, ist nach den Gesetzen der Quantenphysik prinzipiell nicht vorbestimmt. Die Annahme einer Vorbestimmung würde in der Quantenmechanik sogar zu Widersprüchen führen. Ebenso wenig war die Evolution des Lebens auf diesem Planeten vorbestimmt. Molekulare Zufallsfluktuationen ermöglichten vielmehr unter geeigneten Nebenbedingungen die Entstehung mole-

kularer Vererbungsmechanismen mit Mutation und Selektion. In der Sprache der Informatik musste der Vererbungsalgorithmus erst durch die Zusammenwirkung mit anderen Algorithmen erzeugt werden. Probabilistische Algorithmen, die neue Algorithmen schreiben, die wiederum neue Algorithmen erfinden etc., sind aber längst bekannt und werden in der Technik genutzt. In diesem Sinn müssen Gesetze nicht vorgegeben sein, sondern können selber entstehen.

Auch der weitere Ablauf der Evolution auf diesem Planeten war keineswegs vorbestimmt. Die Entwicklung hätte sich im Gleichgewicht einzelliger Organismen stabilisieren können. Zufallsfluktuationen und Umweltbedingungen lösten einen neuen Schub zu komplexen Organismen aus. Damit war aber die Entwicklung von Intelligenz und Bewusstsein nicht vorbestimmt. Auch hier haben Zufallsereignisse und Wechselwirkungen von Populationen mit ihrer Umwelt mitgewirkt, die keineswegs bereits über die Information zur Erzeugung von Intelligenz verfügten. Intelligenz und Bewusstsein sind vielmehr emergente kognitive Strukturen, die erst durch die neuronale Gehirndynamik möglich wurden. Zufallsprozesse der Quantenmechanik und die Theorie komplexer dynamischer Systeme zeigen also, dass wir uns grundsätzlich von der überholten Vorstellung verabschieden müssen, wonach Neues nur aus einem vorbestimmten Plan entstehen könne. Kreation neuer Strukturen in der Evolution bedarf ebenso wenig eines vorbestimmten «intelligenten» Designs wie Kreativität und Innovation in der Gesellschaft einer vorbestimmten Planwirtschaft. Mathematische Gesetze liefern nur die Rahmenbedingungen, in denen solche Entwicklungen möglich werden.

Im Folgenden sollen die Gesetze der Zufallsprozesse in Wahrscheinlichkeitstheorie und Informatik, Quanten- und Evolutionstheorie, Chaostheorie und Selbstorganisationstheorie komplexer dynamischer Systeme untersucht werden. Wir beginnen in *Kapitel I* mit dem *Zufall in frühen Weltbildern*, der durch mythologische Vorstellungen, erste Prinzipien der Philosophie und praktische Erfahrungen im Glücksspiel geprägt war. Solche Ansätze sind nicht nur von historischem Interesse, sondern wirken häufig noch unbewusst in unseren Alltagsvorstellungen über zufällige Ereignisse nach.

In *Kapitel II* fahren wir fort mit *Zufall, Wahrscheinlichkeit und Information*. Nach einer kurzen historischen Einführung von Zufallsanalysen bei Bernoulli und Pascal bis Laplace und Gauß werden Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie vorgestellt. Bemerkenswert sind die Grade des Zufallsrauschens, die sich wahrschein-

lichkeitstheoretisch unterscheiden lassen. Häufig wird nämlich das «weiße» Rauschen einer Gaußverteilung («Glockenkurve») als allgemeingültige «Normalverteilung» betrachtet, deren Zufallsschwankungen im Rahmen kleinerer Abweichungen bleiben. Tatsächlich steht die Normalverteilung nur am Anfang einer Hierarchie von Zufallsmustern wachsender Komplexität, die vom «weißen» über «pinkfarbiges» und «rotes» Rauschen bis zum «schwarzen» Rauschen reicht. Anschaulich kann man auch von mehr oder weniger «mildem» oder «wildem» Rauschen sprechen, das sich in Graden wachsender Abweichungen der Zufallsschwankungen zeigt und charakteristische Struktureigenschaften der Verteilungsmuster bestimmt. Dazu gehören z. B. fraktale Musterbildungen, die sich auf allen Skalierungsstufen wiederholen, oder die mehr oder weniger ausgeprägte Neigung, das einmal erzeugte Zufallsmuster mit einer Art von Gedächtnis langfristig nachwirken zu lassen. Zufall und Wahrscheinlichkeit hängen zudem eng mit dem Informationsbegriff zusammen. Verlust an Information und wachsende Unbestimmtheit führen nämlich zu stärkerem Zufallsrauschen. Wir sprechen in dem Zusammenhang auch von Informationsentropie.

Damit sind die Voraussetzungen gelegt, um Zufallsprozesse in der Physik zu untersuchen. In *Kapitel III* geht es zunächst um *Zufall und Thermodynamik*. Im Zentrum steht der Entropiebegriff, mit dem sich der Grad der Zufälligkeit in einem molekularen System bestimmen lässt. Physikalisch misst Entropie den Wärmeaustausch eines Systems bei vorgegebener Temperatur. Boltzmann deutete makroskopische Wärmeerscheinungen durch statistische Fluktuationen von Molekülen. Die Zunahme der Entropie nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik bedeutet danach wachsende statistische Unordnung bis zum Zerfall aller Korrelationen von Ordnungsmustern und bis zur zufälligen Wahrscheinlichkeitsverteilung von Molekülen im thermischen Gleichgewicht. Boltzmanns Ziel ist die Ableitung der Gesetze der Thermodynamik aus der statistischen Mechanik und mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie. Einstein folgt diesem Ansatz und berechnet erstmals die Wahrscheinlichkeit von molekularen Zufallsschwankungen (Brownsche Bewegung) auf der Grundlage von Entropiemessungen. Damit verhilft er zwar der Vorstellung von Zufallsprozessen in der Mikrophysik zum Durchbruch. Statistische Berechnungen sind für ihn allerdings nur Näherungsverfahren, da die im Prinzip deterministischen Wechselwirkungen gigantisch vieler Moleküle unserem Wissen verschlossen bleiben.

Zufall führt nicht nur zu Zerfall und Chaos. Fern des thermischen Gleichgewichts organisieren sich zufällige Wechselwirkungen von Molekülen unter geeigneten Randbedingungen zu hochkomplexen Strukturen in Festkörper-, Flüssigkeits- und Aerodynamik, die in der modernen Nanotechnologie und Materialforschung gezielt genutzt werden. Ohne Zufallsfluktuationen wären thermodynamische Selbstorganisation und Synergetik komplexer Systeme nicht möglich. Auch hier lassen sich Klassen wachsender Komplexität unterscheiden, die von regulären Gleichgewichtsstrukturen über Oszillationen und periodische Schwankungsmuster bis zu irreversiblen Strukturen wie Chaos reichen. Die Grade des Zufallsrauschens, die sich in der Wahrscheinlichkeitstheorie unterscheiden lassen, sind mit der Strukturbildung komplexer Systeme eng verbunden. Ein Beispiel sind fraktale Strukturen, die unabhängig von der Größenskalierung ähnliche Muster aufzeigen und einen ersten Hinweis auf Chaos und «wildes» Zufallsrauschen liefern.

In *Kapitel IV* folgt der *Zufall in der Quantenwelt*. Für zukünftiges Verhalten von Quantensystemen können nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden. Die Interferenzmuster von Lichtteilchen (Photonen) ebenso wie von Materieteilchen entsprechen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die als Wellenfunktionen gedeutet werden. So beruhen Licht- und Materiewellen letztlich auf Zufallsfluktuationen der Quantenwelt. Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation sagt prinzipiell Streuungen von z.B. Impulsmessungen voraus, wenn man versucht, den Ort eines Teilchens genauer zu messen. Ähnliche Effekte beobachten wir bei Zeit- und Energiemessungen. Keine Verbesserung der Messtechnik hilft hier weiter. Dennoch glaubte Einstein an eine streng deterministische Kausalität der subatomaren Quantenwelt, für die wir nur noch nicht den adäquaten mathematischen Formalismus kennen und daher auf vorläufige statistische Beschreibungen zurückgreifen. Eigenschaften von Objekten sollten wie in der klassischen Physik des Alltags unabhängig von der Beobachtung und vor jeder Messung bestimmt sein und sich nicht erst per Zufall durch den Messakt realisieren, wie die Quantenmechanik behauptet. Diese Merkwürdigkeit der Quantenwelt zeigt sich insbesondere bei verschränkten Zuständen von Quantensystemen, die voneinander räumlich entfernt ohne physikalische Wechselwirkung sind. Eine tiefeschürfende philosophische Auseinandersetzung zwischen Einstein und Bohr führte schließlich zu den EPR-Experimenten, in denen Zufall und Wahrscheinlichkeit in der Quantenwelt bestätigt wurden.

Die Quantenmechanik hat im 20. Jahrhundert die Grundlagen für die moderne Physik gelegt – ebenso wie das vom 17. bis 19. Jahrhundert die klassische Mechanik für die klassische Physik getan hat. Die Quantenkosmologie erklärt die Entstehung physikalischer Wechselwirkungen und entsprechender Elementarteilchen nach den Prinzipien der Quantenfeldtheorien. Der Urzustand des Universums setzt eine Vereinigung dieser Grundkräfte mit der Gravitation voraus, die nach der deterministischen allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wird. In dieser Vereinigungstheorie müssen also Zufall und Determinismus wie Feuer und Wasser zusammengebracht werden.

Zufall und Unbestimmtheit der Quantenwelt bleiben aber nicht nur Gegenstand grundlagentheoretischer Debatten. Seit den 1990er Jahren zeichnet sich mit Quanteninformation und Quantencomputern eine revolutionäre Technologie ab, die Rechenleistungen der bisherigen Informations- und Computertechnologien in den Schatten stellen wird. *Kapitel V* behandelt den *Zufall in der Computerwelt*. Mit Berechenbarkeits- und Algorithmentheorie lässt sich der Grad der Zufälligkeit bestimmen, mit dem binäre Symbolfolgen aus den Ziffern 0 und 1 gebildet werden. Als Bits sind sie die kleinsten Informationseinheiten, die alternativen Schalterzuständen in Computern entsprechen. Die Art ihrer technischen Realisation spielt für die mathematische Theorie des Zufalls keine Rolle. Für die Komplexitätsmessung von Symbolmustern wird daher eine Turingmaschine zugrunde gelegt, die eine entsprechende binäre Symbolsequenz ausdrucken kann. Bei einem langen regulären Muster reichen wenige Maschinenbefehle zu ihrer Erzeugung aus. Bei einer zufälligen und irregulären Folge von 0 und 1 ist die kürzeste Beschreibung häufig die ausgedruckte Folge selber. Es liegt daher nahe, die Länge des kürzesten Maschinenprogramms zur Erzeugung einer Binärfolge als ihr algorithmisches Komplexitätsmaß zu wählen. Zufälligkeit wäre dann am Ende der Skala, wenn es kein kleinstes Programm mit einer kleineren Länge als die der ausgedruckten Folge selber gibt. Mit anderen Worten gibt es in diesem Fall keine kürzere Beschreibung der Symbolfolge als ihr Ausdruck selber. Leider lässt sich aber prinzipiell nicht entscheiden, ob ein solches Programm das kürzeste ist. Hier spielen grundlegende Sätze der Logik und Berechenbarkeitstheorie wie der Gödelsche Unvollständigkeitssatz und Turings Halteproblem eine zentrale Rolle. Zudem können Computerprogramme keine echten Zufallsfolgen erzeugen, da sie immer auf Regeln beruhen. Solche versteckten Regularitäten könnten von einem hinreichend leis-

tungsstarken Computer für die Entschlüsselung einer Nachricht verwendet werden. Die Sicherheit von Nachrichten, die mit solchen Pseudo-Zufallsfolgen verschlüsselt wurden, hängt offenbar von den Rechenleistungen von Computern ab. Nur Quantensysteme führen zu objektiven Zufällen, die nach den EPR-Argumenten jede Vorbestimmung prinzipiell ausschließen. Daher werden in der Quantenkryptographie Zufallsfolgen zur Verschlüsselung benutzt, die von Quantensystemen erzeugt werden: Der absolute Zufall garantiert erst absolute Sicherheit.

Jede Struktur codiert im Prinzip Informationen über die Zusammensetzung eines Systems. Quantensysteme sind kleinste Informationsträger, deren Zustände Quanteninformationen repräsentieren und von Zufallsschwankungen abhängen. Ebenso codieren molekulare Verbindungen Informationen über den Aufbau molekularer Strukturen, die von Zufallsfluktuationen abhängen können. Im *VI. Kapitel* geht es um *Zufall, Leben und Gehirne*. Mutationen sind molekulare Zufallsschwankungen, die in den genetischen Algorithmen der Evolution des Lebens eingebaut sind. Ohne sie wäre keine Emergenz und Selektion neuer Arten möglich. Evolutionäre Algorithmen kamen aber nicht fertig vorbestimmt in die Welt, sondern sind selber erst in der präbiotischen Evolution entstanden. In diesem Sinne entstanden die Gesetze des Lebens, die wir heute kennen. Unterschiedliche Zufallsmuster waren Katalysatoren bei der Entstehung erster molekularer Verbindungen des Lebens. Erst im Nachhinein können wir feststellen, dass sie zu DNS-Strukturen führten. Vorbestimmt war das nicht. Auf jeder Entwicklungsstufe wären auch andere Entwicklungswege chemisch möglich gewesen. Nach der thermodynamischen, chemischen und genetischen Selbstorganisation folgte die neuronale Selbstorganisation der Nervensysteme und Gehirne. Neuronale Netze feuender Nervenzellen benutzen Lernalgorithmen, deren binäre Zustände an die Informationsverarbeitung von Computern erinnern. Daher lässt sich das Gehirn als komplexes System neuronaler Informationsverarbeitung verstehen. An die Stelle von Quantenfluktuationen und molekularen Zufallsschwankungen tritt nun neuronales Zufallsrauschen feuender Neuronen, das den Hintergrund aller Gehirnaktivitäten bildet. Zufall führt auch zum Einfall. Denken, Fühlen und Bewusstsein sind mit neuronalen Verschaltungsmustern als Ergebnissen neuronaler Selbstorganisation korreliert. Mit Sprache und Kommunikation wird Information symbolisch repräsentierbar und codierbar.

Gehirne und Organismen sind nicht isoliert, sondern erzeugen durch Zusammenwirken, Handeln und Kommunizieren neue komplexe Systeme wie Völker, Staaten, Organisationen und Institutionen mit eigenen Gesetzen der Dynamik. Um die Evolution dieser sozialen Systeme geht es im *VII. Kapitel* unter dem Titel *Zufall in Kultur, Wirtschaft und Gesellschaft*. Zufallsfluktuationen stehen am Anfang von historischen Entwicklungsschüben, die auch in andere Richtungen hätten verlaufen können. Alte Ordnungen werden durch veränderte Systembedingungen in der Nähe von Instabilitätspunkten instabil, brechen zusammen, neue Ordnungen entstehen, die ebenfalls nur lokale Stabilität besitzen, bis auch sie neuen Ordnungsstrukturen Platz machen. Historiker sprechen im Nachhinein von Epochenwenden, Revolutionen oder schlicht einem Regierungswechsel.

Formal erinnert diese Dynamik an die Phasenübergänge neuer Ordnungsmuster in der Thermodynamik oder Mutationen und Selektionen neuer Arten in der biologischen Evolution. Die Ursachen der sozialen Dynamik und damit auch der sozialen Zufallsfluktuationen sind allerdings verschieden. Die wechselwirkenden Systemelemente komplexer sozialer Systeme sind nämlich keine Moleküle oder Zellen, sondern bewusstseinsbegabte Menschen. Sie werden nicht nur von Umweltbedingungen gestoßen und reagieren nicht nur wie zurückgeworfene Billardkugeln. Ihre Vorstellungen, Wünsche und Ziele beeinflussen ihr Handeln und schaffen soziale Realität. Das Zufallsrauschen sozialer Meinungstrends reflektiert unter Umständen die Hoffnungen und Ängste von Millionen von Menschen. Mit ihrem Glauben, wie die Zukunft sein wird oder sein soll, beeinflussen Menschen die tatsächliche Entwicklung des Systems. Populär wurde diese Rückkopplung von Zukunftsvorstellung und Wirklichkeit als «self-fulfilling prophecy». Mathematisch berechenbar wird sie in Finanz-, Aktien- und Börsenspekulationen, in denen letztlich der Glaube von Wirtschaftsagenten an Wirtschaftsentwicklungen bewertet und gemessen wird. In einer globalisierten Welt mit wachsenden Risiken werden Versicherungsunternehmen zu gewichtigen Kapitalgesellschaften, die uns gegen die Zufälle des Lebens absichern sollen. Wer in Finanzfragen ein zu mildes Zufallsrauschen annimmt, erlebt massiven Schiffbruch mit seinen sorgfältig kalkulierten Portfolios. Finanzturbulenzen können wild und gefährlich sein wie die Taifune des Pazifiks. Sie sind keineswegs die Ausnahmen, sondern nehmen wie die globalen ökologischen und sozialen Krisen seit den 1990er Jahren zu.

Der letzte Abschnitt spricht über die *Philosophie des Zufalls*. In der abendländischen Philosophie wurde der Zufall gerne verdrängt und in das Reich des Bösen abgeschoben. Wieviel schöner und tröstlicher erschien eine vernünftige und geordnete Welt, in der selbst Unglück und Leid ihren Grund haben. Wenn Zufall, dann sollte er höchstens als vorläufig nicht verstandene Ausnahme zugelassen sein. Tatsächlich, so zeigen die modernen Natur- und Sozialwissenschaften, schwimmen wir aber in Natur, Wirtschaft und Gesellschaft auf einem Meer des Zufallsrauschens, auf dem sich vorübergehend Inseln von Ordnung und Strukturen bilden können. Es kommt darauf an, die Zeichen und Muster des Zufallsrauschens zu erkennen, zu verstehen und zu nutzen. Beherrschen lässt es sich nicht. Zufall, der wie in der Quantenwelt nicht nur auf unserem unzureichenden Wissen beruht, zeigt uns aber auch, dass es eine Realität unabhängig von uns gibt. Das mahnt zur Vorsicht und warnt vor Machbarkeitswahn. Zufall kann Zerfall, Absturz und Untergang bedeuten, aber auch Einfall und die Entstehung von Neuem mit Kreativität und Innovation.