

Lothar Kolditz

Leukipp und der Zufall

Von dem Vorsokratiker *Leukipp*, der im 5. Jh. v.u.Z. lebte, einem Schüler des *Parmenides*, stammt der Lehrsatz

„Nichts geschieht zufällig, sondern alles aus einem Grund und mit Notwendigkeit.“

Dieser Lehrsatz bedarf der Diskussion, und ich will dies aus naturwissenschaftlicher Sicht tun. Über den Zufall ist viel geschrieben worden, in der Antike nach *Leukipp* von seinem Schüler *Demokrit*, später von *Aristoteles* und *Epikur*, bis hin zur Neuzeit. Das ständige Wiederaufgreifen des Themas zeigt, dass erschöpfend abschließende Antworten nicht gefunden wurden und verschiedene Meinungen herrschen.

Die große Beteiligung an der Diskussion, die zu allen Zeiten angehalten hat, hängt zusammen mit der allgemeinen Betroffenheit von der Erscheinung des Zufalls, zumal dessen Auftreten auf Vorgänge zurückgeht, die im konkreten Fall nicht einfach zu erfassen sind. *Herbert Hörz* hat in einem Plenarvortrag in der Leibniz-Sozietät die Grundzüge einer dialektischen Theorie des Zufalls behandelt (vgl. Hörz 2012). Er hat außerdem eine sehr gute Zusammenstellung des Gebietes geliefert in seinem Buch „Zufall. Eine philosophische Untersuchung“ (vgl. Hörz 1980), wobei vor allem der Umgang mit dem Zufall und seine verschiedenen Charaktere eine Rolle spielen.

Grenzen

Ein absoluter Zufall, der auf keine ursächliche Auslösung zurückginge, würde dem Determinismus entgegenstehen. Der kausale Ablauf von Prozessen ist bei Herrschaft des absoluten Zufalls in Frage gestellt. Ein absoluter Determinismus wiederum unterbindet die Freiheit des Willens. Daraus wird deutlich, dass auch auf diesem Gebiet eine differenzierte Betrachtung von Nöten ist und absolute Standpunkte wenig geeignet sind, komplizierte Verhältnisse erfolgreich zu beschreiben. Weder der absolute Zufall noch der absolute Determinismus sind mit dem realen Geschehen vereinbar.

Voraussetzung

Es soll in diesem Beitrag, der sich auf meinen in „Leibniz-Online“ veröffentlichten ausführlicheren Vortrag „Zufall – eine Betrachtung aus naturwissenschaftlicher Sicht“ bezieht (vgl. Kolditz 2012), eine mit möglichst wenigen Voraussetzungen versehene naturwissenschaftliche Analyse des Zufalls erfolgen. Dazu ist es in diesem Zusammenhang nicht notwendig, auf verschiedene Arten des Zufalls einzugehen. Es wird vielmehr nur Bezug genommen auf die wie folgt definierte Grundeigenschaft des Zufalls.

Kennzeichnend für ein zufälliges Ereignis ist, dass es nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden kann. Diese Feststellung wird allgemeine Zustimmung finden, was sich aber ändert, sobald nach dem Grund für die Unsicherheit der Voraussage gefragt und aus dieser Betrachtung verschiedene Deutungen des Zufalls gegeben werden.

Für die hier angestellten Überlegungen wird eine einzige Voraussetzung zu Grunde gelegt, nämlich die, dass im Ereignisbereich des Zufalls die zuständigen Naturgesetze uneingeschränkt gelten.

Würfelvorgang

Wir wenden uns zunächst dem klassisch physikalisch-mechanischen Ereignisgebiet zu und betrachten mit dieser Voraussetzung als praktisches Beispiel die Verhältnisse beim Würfeln. Es wird ein idealer Würfel angenommen. Die Sicherheit, mit einem Wurf eine bestimmte Zahl zu erhalten, ist gering. Je mehr Würfe unternommen werden, umso näher kommt die relative Häufigkeit – das ist die Anzahl der aufgetretenen positiven Ereignisse im Vergleich zur Gesamtzahl an Würfeln – dem Wahrscheinlichkeitswert $1/6$.

Der Ablauf des Würfelvorgangs setzt sich komplex aus zahlreichen miteinander und hintereinander wirkenden Vorgängen zusammen, die aber alle den im Ereignisbereich geltenden Naturgesetzen unterliegen, also im Einzelnen determiniert sind. Dass nach einem Wurf die gerade erhaltene Zahl nicht mit Sicherheit ein zweites Mal zu erreichen ist, hängt mit der geringen Wahrscheinlichkeit zusammen, genau die gleichen Bedingungen und Abfolge von Bedingungen wie beim vorhergehenden Wurf einzuhalten, was bei geringfügigen Änderungen in Verbindung mit der Komplexität aller ablaufenden Vorgänge ein abweichendes Resultat ergibt. Eine Rolle spielen dabei die Haltung der Würfelhand, die Würfelhöhe, Luftverhältnisse, der dem Würfel mitgeteilte Impuls, Drehimpuls, die Beschaffenheit der Würfelauf-treffstelle, der genaue Kontakt mit der Würfeloberfläche und das Abrollen.

Also halten wir fest: Jeder einzelne Vorgang im Würfelablauf ist naturgesetzlich determiniert. Nur wegen der Komplexität der aufeinander folgen-

den Abläufe ist es nicht möglich, eine sichere Voraussage des Ergebnisses zu machen. Die Eingrenzung von Würfelergebnissen auf bestimmte Vorgaben kann nur im Rahmen einer Wahrscheinlichkeitsaussage erfolgen, die sich mit steigender Anzahl an Würfeln asymptotisch einem Grenzwert nähert.

Die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit für ein zufälliges Ereignis ist die allein zur Verfügung stehende Möglichkeit der Eingrenzung und zahlenmäßigen Erfassung des Zufalls. Analoges gilt für die Ziehungseinrichtung von Lottozahlen. Alle Einzelabläufe sind naturgesetzmäßig determiniert. Wegen der Komplexität des Gesamtablaufes kann aber nur eine Wahrscheinlichkeitsangabe für das Ergebnis gemacht werden, die natürlich einen umso geringeren Wert annimmt, je mehr Ergebnisse für die Voraussage gefordert werden, z.B. sechs bestimmte Lottozahlen.

Überschneidung von Ereignisketten und freier Wille

Bisher haben wir einfache Ereignisketten betrachtet, deren Teilvorgänge kausal determiniert sind. Die komplexe Entwicklung der laufenden Vorgänge in Ereignisketten mit ausschließlich anorganischen Materialien, wie bei der Ziehung von Lottozahlen, beinhaltet viele hintereinander und auch mit gleichzeitigen Verzweigungen ablaufende Vorgänge, die von außen nach Starten der Ziehung nicht mehr beeinflusst werden können, aber alle im Einzelnen kausal sind.

Wir betrachten nun zwei verschiedene Ereignisketten, die nicht direkt voneinander abhängen. Als Beispiel nehmen wir zwei Autofahrer, die an verschiedenen Orten im gleichen Zeitraum starten und deren Bahn sich begegnen. Wann und wo dieser Begegnungspunkt eintritt, hängt unter anderem von den Startbedingungen, Geschwindigkeiten, Straßen- und Verkehrslagen ab, als Zufall zunächst wenig bemerkenswert. Dramatisch aber wird der Vorgang, wenn der Kreuzungspunkt an unübersichtlicher Stelle liegt, einer der Fahrer z.B. riskant überholt und es zum Zusammenstoß kommt. Auch dieser Zufall hat keinen absoluten Charakter, sondern hängt von Bedingungen in der Ereigniskette ab. Beginn und Ablauf der beiden Ereignisketten hängen nicht direkt voneinander ab. Die Startzeitpunkte werden aber auf bestimmte Ursachen zurückzuführen sein. Der Beginn der Ketten muss im gleichen Ereignisbereich liegen und auch zeitlich vergleichbar sein. Auch wenn hier keine direkte Abhängigkeit festgestellt werden kann, so muss doch eine bedingte formuliert werden. Die Fahrtgestaltung unterliegt Vorgaben, wird aber auch von den Eigenschaften der Fahrer beeinflusst. Im Rahmen

des Fahrplanes wird sie vom Willen der Fahrer gesteuert. Dieser Wille ist bedingt frei.

So zeigt dieses Beispiel, dass Determiniertheit und freier Wille nicht diametral entgegenstehen. Determiniertheit einerseits schließt andererseits den freien Willen nicht aus. Bemerkenswert ist, dass in jedem Fall die Bedingtheit zutrifft.

In diesem Zusammenhang sei auf einen Abschnitt in meinem Vortrag „Deterministisches Chaos und Gesellschaft“ hingewiesen (vgl. Kolditz 2011), wo zum Problem Genveranlagung und freier Wille Stellung bezogen wurde. Genveranlagung bedeutet keineswegs vorbestimmtes Verhalten, das nicht zu beeinflussen ist. Ausschalten des freien Willens durch Genveranlagung ist eine irreführende Schwarz-Weiß-Darstellung, vergleichbar mit der abzulehnenden Formulierung, dass Determiniertheit und freier Wille einander ausschließen.

Ausgehend von der Betrachtung zweier sich überschneidender Ereignisketten erfolgt die Erweiterung auf eine große Anzahl solcher Ketten. Ereignisketten ohne Überschneidung können ausgeklammert werden, da sie keine registrierten Zufallsereignisse verursachen. Es sind dabei verschiedene Kategorien von Ereignisketten anzunehmen, die sich in ihrer Häufigkeit unterscheiden. Im Einklang mit der großen Zahl an Vorgängen tritt eine statistische Verteilung ein, deren weitere Erschließung durch Abschätzen von Wahrscheinlichkeiten vorzunehmen ist. Je häufiger eine Kategorie auftritt, umso größer sind die Überschneidungsmöglichkeiten, was die Wahrscheinlichkeitsangaben zu ihrem Eintreten beeinflusst. Alle Ereignisketten sind in ihren Abschnittsabläufen determiniert. In allen Fällen erfolgt deutliche Annäherung an die Wahrscheinlichkeitsgrenzwerte bei genügend großer Anzahl an Einzelvorgängen.

Der Zufall wird mit dem jeweiligen Beginn der voneinander unabhängigen, sich aber überschneidenden Ereignisketten wahrscheinlich und hat keinen absoluten, sondern einen bedingten Charakter.

Radioaktivität

Verlassen wir das klassisch-physikalische Gebiet und gehen zu Vorgängen im Quantenbereich über. Der oft herangezogene Ereignisbereich in diesem Zusammenhang ist die Radioaktivität. Als konkretes Beispiel wird die Radioaktivität des Kaliumisotops 40 erläutert.

Das Element Kalium kommt in der Natur in verschiedenen Atomsorten als Gemisch der Isotope mit den Massenzahlen 39, 40 und 41 vor. Alle ha-

ben 19 positiv geladene Protonen im Kern, die der Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente entsprechen. Die Isotope unterscheiden sich durch eine verschiedene Anzahl an ungeladenen Neutronen, nämlich 20, 21 und 22. In der Elektronenhülle des neutralen Kaliumatoms kompensieren jeweils 19 negative Elektronen die Kernladung.

Unser Körper enthält die natürliche Kaliumisotopen-Mischung, und zwar neben ^{39}K (93,26%) und ^{41}K (6,73%) einen Anteil von 0,01% ^{40}K . Dieses Kaliumisotop zeigt zwei radioaktive Zerfallsarten:

- Einen β -Zerfall zu 89,3%, bei dem unter Aussendung von Elektronen aus dem Kern die Ordnungszahl im Periodensystem um eine Einheit ansteigt, es entsteht ^{40}Ca . Das aus dem Kern ausgesendete Elektron bildet sich bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton.
- Einen K-Einfang zu 10,7%, bei dem ein Elektron aus der Elektronenhülle vom Kern aufgenommen wird.¹ Dabei erniedrigt sich die Ordnungszahl. Aus einem Proton wird durch Vereinigung mit dem eingefangenen Elektron ein Neutron gebildet. Das Ergebnis ist das Edelgas ^{40}Ar , das in statu nascendi mit einer Lücke im tiefsten energetischen Niveau der Elektronenschale entsteht. Beim Auffüllen dieser Lücke aus höheren Elektronen-Niveaus tritt die charakteristische Röntgenstrahlung von Argon auf.

Beide Vorgänge haben spezifische Halbwertszeiten, d.h. von einem genügenden Vorrat an Atomen zerfällt nach Ablauf der Halbwertszeit jeweils die Hälfte. Die Summe der Halbwertszeiten für beide radioaktiven Vorgänge bei ^{40}K beträgt

$$1,27 \times 10^9 \text{ a,}$$

was umgerechnet mit dem Gehalt an ^{40}K für eine etwa 70 kg schwere Person eine Aktivität von 5.550 Becquerel (Zerfälle pro Sekunde) bedeutet. Das hat die Menschheit seit jeher ausgehalten, und dies ist nur ein Teil der übrigen Strahleneinwirkung, denen wir einschließlich der kosmischen Strahlung ausgesetzt sind. Für andere Lebewesen trifft Analoges zu.

Nun aber zurück zur Zufallsbetrachtung. Wenn wir zehn Atome ^{40}K betrachten, so können wir nicht erwarten, dass in angemessener Zeit mit Sicherheit eines der Atome zerfällt. Die Wahrscheinlichkeit dazu ist bei der

1 Die Bezeichnung K-Einfang rührt von dem energetisch am tiefsten liegenden Elektronen-Niveau in der Elektronenhülle des Kerns her, das mit K-Schale nach dem *Bohrschen* Atommodell benannt wird.

Halbwertszeit von $1,27 \times 10^9$ a sehr gering und noch geringer natürlich bezüglich des Zerfalls von mehr als einem dieser zehn Atome.

Erst die Anwesenheit von zahlreichen radioaktiven Atomen gewährleistet die sichere Voraussage, dass in der Halbwertszeit die Hälfte des Vorrates zerfallen wird. Die dazu erforderliche Vorratsgröße steigt natürlich mit der Halbwertszeit.²

Wenn wir eine größere Menge Kaliumteilchen beobachten, können wir zwar mit Sicherheit erwarten, dass radioaktive Zerfälle eintreten, wissen aber nicht, bei welchen Kaliumteilchen dieses Ereignis abläuft.

An dieser Stelle ergibt sich ein wichtiger Unterschied zu der häufig vertretenen Meinung, der radioaktive Zerfall hätte einen objektiven Charakter im Gegensatz zum subjektiven Würfelbeispiel, da ein Grund für den Zeitpunkt des radioaktiven Zerfalls eines bestimmten Teilchens nicht vorhanden sei. Dies halte ich für eine nicht zutreffende Interpretation der Vorgänge.

Im Ereignisbereich des Kerns gelten die Quantengesetze der Kernkräfte als Naturgesetze. Diese sorgen für einen geregelten Ablauf der Vorgänge im Kern und für die damit verbundenen Kerneigenschaften. Ihre Erkundung ist noch keineswegs abgeschlossen. Aus einer gültigen Theorie müsste ableitbar sein, welche Kernzusammensetzungen zu den verschiedenen Radioaktivitätsarten mit entsprechenden Halbwertszeiten führen. Immer längere Halbwertszeiten ergeben schließlich praktisch stabile Kerne.

Meine hypothetische Annahme ist, dass Austauschvorgänge zwischen den Kernbestandteilen zu Schwingungen mit Energieverteilungen führen, die zu einer bestimmten radioaktiven Zerfallsbereitschaft in dem Maße führen, wie es mit der Halbwertszeit gemessen wurde. Die Zusammensetzung des ^{40}K -Kernes verursacht im Einklang mit dieser Annahme eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für Zustände mit unterschiedlichen Energieinhalten, die als besondere Schwingungskonstellationen verstanden werden können und die diesen Kern charakterisierende Radioaktivität auslösen.

Die Zuordnung von Schwingungsvorgängen im Kern beinhaltet auch für die Kernbestandteile einen Teilchen-Welle-Dualismus, wie er für die Elek-

2 Eine Abschätzung der im Körper vorhandenen Kaliumteilchen soll die Größenordnungen an radioaktiven Spezies verdeutlichen, die die Einhaltung einer Halbwertszeit von $1,27 \times 10^9$ a gewährleisten. Eine 70 kg schwere Person enthält im Schnitt 1,75 g Kalium, wobei es sich um 4,48 mol handelt, das sind $4,48 \times 6,02 \times 10^{23} = 2,70 \times 10^{24}$ Atome. Der Anteil an ^{40}K beträgt darin $2,70 \times 1.020$ Atome, was selbst die Sekundenanzahl der Halbwertszeit von $1,27 \times 10^9$ a, das sind $1,27 \times 10^9 \times 31,5 \times 10^6 = 4,00 \times 1.016$ Sekunden, um vier Größenordnungen übersteigt.

tronenhülle ohne weiteres akzeptiert wird. Für den Ablauf der Vorgänge ist außerdem die Möglichkeit des Tunneleffektes von Bedeutung.

Der Tunneleffekt ist die in der Quantenmechanik auf Grund der Schrödinger-Gleichung vorhandene Möglichkeit für ein Teilchen, eine Barriere zu überwinden, obwohl seine Energie nicht die Höhe der Barriere erreicht. Die Durchtunnelung der Barrierewand ist mit einer durch das Quadrat der Ψ -Funktion verknüpften Wahrscheinlichkeit verbunden.

Die Wahrscheinlichkeit für die Durchdringung der den Kern zusammenhaltenden Energiebarriere wird umso größer, je höher sich der energetische Zustand einzelner Kerne im Lauf der Austausch- bzw. Schwingungsvorgänge einstellt. Dies sind alle Bedingungen, die den radioaktiven Zerfall regulieren, sich also nicht mit dem Kriterium eines absoluten Zufalls vereinbaren lassen.

Diese Betrachtung entspricht wieder dem Erscheinungsbild des Zufalls bei genügend hoher Anzahl an Möglichkeiten. Mit steigender Anzahl erfolgt eine ständige Annäherung an den durch die Halbwertszeit bestimmten Wert. Es ist aber zugleich ein Hinweis darauf, dass auch die Quantengesetze der Kernkräfte das Einzelgeschehen deterministisch in den für diesen Ereignisbereich geltenden Regeln bestimmen und die ablaufenden Ereignisketten beherrschen. Andernfalls wäre eine feste Halbwertszeit nicht zu erwarten.

Schlussbemerkung

Als Resümee zu den hier gegebenen Ausführungen soll auf die Einhaltung der am Anfang gemachten Voraussetzung hingewiesen werden. Für alle Ereignisbereiche gilt, dass die zutreffenden Naturgesetze bestimmend für das Geschehen sind. Die Naturgesetze beschreiben die in den Bereichen herrschenden Kräfte und die mit ihnen verbundenen Wechselwirkungen. Der Charakter der Gesetze kann sich von Ereignisbereich zu Ereignisbereich ändern, auch der Charakter der Determiniertheit von Einzelereignissen (vgl. z.B. die Möglichkeit des Tunneleffektes im quantenmechanischen Bereich). Das Auftreten eines gesetzlosen Bereiches gibt es nicht, weder im Mikro- noch im Makrokosmos. Er wäre mit dem von uns wachzunehmenden geregelten Abläufen im gesamten Kosmos nicht zu vereinbaren.

In diesem Lichte stellt sich der gesamte Mikro- und Makrokosmos zwar nicht als ein durch eine einzige Weltformel zu erfassendes Gebilde, sondern in ganzheitlicher Betrachtung mit befriedigender Wahrnehmung als eine harmonisch funktionierende Einheit dar.

Im Beitrag war nicht die Frage Gegenstand, ob es den Zufall gibt, sondern vielmehr wurde versucht, den Charakter des Zufalls aus einer naturwissenschaftlichen Sicht zu bestimmen. Ein zufälliges Ereignis ist nicht mit Sicherheit vorauszusagen, jedoch sind die einzelnen Vorgänge, die zum Ereignis führen, in ihrem Ablauf determiniert. Überschneidungen von Ereignisketten sorgen neben Verzweigungen für das Ansteigen der Komplexität, was die sichere Voraussage des eintretenden Ereignisses verhindert, dessen Eingrenzung nur mit einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung näher zu erfassen ist, wobei die Annäherung an einen Wert umso stärker ist, je mehr Vorgänge gleichen Charakters ablaufen. Der Ablauf ist gesteuert durch ein deterministisches Chaos.

Es gibt keinen absoluten Zufall. Der Zufall ist immer Bedingungen unterworfen und mit Beginn und Ablauf sich überschneidender nur bedingt unabhängiger Ereignisketten verbunden.

Mit dieser Betrachtung gehe ich in allen Ereignisbereichen von dem eingangs formulierten Lehrsatz des *Leukipp* aus, erweitere ihn aber mit den Erkenntnissen der Neuzeit durch die Wörter absolut und bedingt:

„Nichts geschieht absolut zufällig, sondern alles aus bedingten Gründen und mit Notwendigkeit.“

Literatur

- Hörz, H. (1980): Zufall. Eine philosophische Untersuchung. Berlin
- Hörz, H. (2012): Ist der Zufall erkenn- und beherrschbar? Grundzüge einer dialektischen Theorie des Zufalls. In: Leibniz Online. Zeitschrift der Leibniz-Sozietät, Nr. 14. – URL: https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2013/01/01_H%C3%B6rz.pdf
- Kolditz, L. (2011): Deterministisches Chaos und Gesellschaft. In: Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 110, S. 107–122
- Kolditz, L. (2012): Zufall – Betrachtung aus naturwissenschaftlicher Sicht. In: Leibniz Online. Zeitschrift der Leibniz-Sozietät, Nr. 14. – URL: https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2013/01/02_Kolditz.pdf