

# Die Lösung des Einstein-Kausalitätsproblems: Das AHK Theorem

von

Peter M. Kaiser

Sowie man Begriffe und Kategorien wie „Kausalität“ oder „Zufall“ in eine wissenschaftliche Debatte wirft, wird man sich damit abfinden müssen, daß dies keineswegs physikalische, noch weniger biologische Begriffe sind. Es sind vielmehr philosophische Begriffe, wenn nicht Kategorien, und selbst wenn sie in beiden Sphären, der allgemeinsten Wissenschaft vom Denken der Menschen und in vielen Einzelwissenschaften vorkommen, so bedeuten sie doch Verschiedenes. Daraus resultieren grandiose Mißverständnisse, gerade weil man häufig nicht merkt, daß oder wann man sich auf der jeweils anderen Ebene befindet. Kürzlich war in der FAZ sinngemäß von der Physik und den Einzelwissenschaften die Rede. Da sind nun die Ebenen völlig falsch definiert. Seit wann ist die Physik eine Universalwissenschaft und alle anderen Einzelwissenschaften? Anscheinend ist diese besondere Art von Reduktionismus und gleichzeitige Hypertrophierung der Physik aber weit verbreitet, ja, laut Michael Esfeld, Professor für Wissenschaftsphilosophie an der Universität Lausanne, erklärt die Physik – nicht unbescheiden – sogar „die Welt“.<sup>1</sup>

Welches sind die resultierenden Mißverständnisse konkret und wie äußern sie sich?

Es fing damit an, daß eine Kategorie wie z.B. der scheinbar vertraute Begriff Kausalität beim Entstehen der Quantenphysik Anfang des 20. Jahrhunderts weiter in seiner „alten“ Bedeutung verwendet wurde. Diese „alte“ Bedeutung leitete sich vom mechanischen Determinismus her, demzufolge kausal angeblich bedeutete, in einem Ursache-Wirkungs-Szenario müsse ja wohl die Ursache bekannt und daher auch die Wirkung exakt vorausszusehen sein. Ein Zufall war ausgeschlossen, da dieser ja unvorhersehbare Reaktionen hätte hervorrufen müssen. Einer, der zu den Epigonen dieser Auffassung gezählt wird und als Kronzeuge für das mechanisch-deterministische Weltbild von fast allen Wissenschaftlern bis heute immer wieder aufgeführt wird, ist der bedeutende französische Mathematiker und Astronom des 18./19. Jahrhunderts Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Das entsprechende Zitat von Laplace über den „Weltgeist“, den später so genannten Laplaceschen Dämon, lautet folgendermaßen: „Wir müssen den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren Zustands einerseits und als Ursache des darauffolgenden andererseits betrachten. Eine Intelligenz, die für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennen würde..., könnte in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen, nichts wäre für sie ungewiß und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen... Alle Anstrengungen in der Suche nach Wahrheit streben danach, den menschlichen Geist dieser Intelligenz zu nähern, der er aber immer unendlich ferne bleiben wird... Die Wahrscheinlichkeitsrechnung bezieht sich zum Teil auf diese Unwissenheit und zum Teil auf unsere Kenntnisse.“<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Also auch die menschliche Gesellschaft. Siehe Michael Esfeld und Christian Sachse, Kausale Strukturen. Einheit und Vielfalt in der Natur und den Naturwissenschaften, Berlin 2010, S. 2; vgl. auch M. Esfeld, Naturphilosophie als Metaphysik der Natur, Berlin 2008.

<sup>2</sup> Pierre-Simon Laplace, Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit, Frankfurt a. Main 1996, Einleitung

Laplace spricht im Konjunktiv bzw. Irrealis, d.h. er selbst glaubte gar nicht daran, daß es eine solche Welterkenntnis mit exakt vorauszusehenden Reaktionen geben könne. Dem Menschen ist sie verschlossen, er bleibt ihr „immer unendlich ferne“.

In den 1920er Jahren erzwang dann aber die Entwicklung der Quantenmechanik, sich mit der Erscheinung des objektiven Zufalls zu beschäftigen, denn anders ließen sich bestimmte Effekte in der atomaren Sphäre nicht bezeichnen. Die Idee vom objektiven Zufall verträgt sich natürlich nicht mit dem mechanischen Weltbild, in dem alles vorhersehbar ist. Diese Deutung von Zufall, dem keine Ursache vorausgeht, schien den Begriff Kausalität zu verletzen, weil diese ja – ganz unnötigerweise – mit deterministischer Voraussage und exakter Berechenbarkeit verknüpft war. Statt jetzt den Begriff Kausalität angesichts des Zwangs zur Anerkennung von objektiven Zufallsprozessen neu und konsistent zu definieren, wurde ein neuer Dämon herbeizitiert, nämlich der Maxwellsche. Die entsprechende Aussage des wichtigsten Physikers und Philosophen des 19. Jahrhunderts, James Clerk Maxwell (1831-1879) wurde nun höchst ungenau interpretiert, um die eigentlich obsolet gewordene Vorstellung von einem „Kausalgesetz“ im Unterschied zum „Kausalitätsprinzip“ beibehalten zu können.<sup>3</sup> Man führte (keiner weiß genau, wer wann was zum ersten Mal geschrieben hat) die Unterscheidung in „starke“ und „schwache“ Kausalität ein und sprach von Verletzung derselben, um auch zufällige Prozesse erklären zu können, die gleichwohl gesetzmäßig ablaufen, wie z.B. in der Chaos-Forschung bekannt<sup>4</sup>, und zum Beispiel in der fraktalen Geometrie der Apfelmännchen sich zu den schönsten Formen entwickeln.<sup>5</sup>

Aber schon in der sogenannten „klassischen“ Physik, die keineswegs ausschließlich mechanisch-deterministische Bewegungen und Prozesse kennt, kamen Zufallsereignisse vor, die eben nicht exakt vorhersehbar waren.<sup>6</sup> Man führte also folgende Definitionen ein:

„Starke Kausalität“ sollte bedeuten: *ähnliche Ursachen rufen ähnliche Wirkungen hervor*; „schwache Kausalität“ sollte diejenige sein, nach der *gleiche Ursachen immer gleiche Wirkungen hervorbringen*.

Abgesehen davon, daß Maxwell damit überinterpretiert ist, lassen diese Definitionen eine gewisse Sprach- bzw. Aussagelogik vermissen. Maxwell hatte lediglich geschrieben: „Es ist eine metaphysische Doktrin, daß gleiche Ursachen gleiche Wirkungen nach sich zögen. Niemand kann sie bestreiten. Ihr Nutzen aber ist gering in einer Welt wie dieser, in der gleiche Ursachen niemals wieder eintreten und nichts zum zweiten Mal geschieht. Das daran anlehrende physikalische Axiom lautet: *Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen*. Dabei sind wir von der Gleichheit übergegangen zu Ähnlichkeit, von absoluter Genauigkeit zu mehr oder weniger grober Annäherung“.<sup>7</sup>

---

<sup>3</sup> Man hatte im 19. Jahrhundert bis Anfang des 20. Jahrh. diese beiden Begriffe streng unterschieden. Typisch kommt dies in den Arbeiten eines Rechtsphilosophen zu Ausdruck, der 1904 schrieb: „Kausalgesetz und Kausalbegriff sind streng auseinander zu halten. Das Kausalgesetz sagt, daß nichts in der Welt zufällig geschieht, daß jedes Geschehen mit einem anderen Geschehen in unabänderlichem Zusammenhang steht, demnach gleiche Ursache gleiche Wirkungen oder richtiger – da sich niemals absolut gleiche Umstände wieder efinden – daß ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen haben. Dieses Gesetz ... wird allseitig anerkannt und steht auch für uns unumstößlich fest“. (Ludwig Träger, Der Kausalbegriff im Straf- und Zivilrecht, Marburg 1904, S. 13).

<sup>4</sup> Offenbar eine der ersten waren die Chaos-Forscher Uli Deker und Harry Thomas, Die Chaos-Theorie. Unberechenbares Spiel der Natur, Bild der Wissenschaft Heft 1, 96-75 (1983). Diese haben es in Maxwell hineininterpretiert. Joachim Schlichting, ein Physiklehrer (Physik – zwischen Zufall und Notwendigkeit, Praxis der Naturwissenschaften – Physik 42, 35ff. [1993]), schreibt es sogar Max Born zu, bei dem sich allerdings nirgends eine solche Aussage findet. Hernach wurde dieses Schema, das bei Deker und Thomas graphisch dargestellt wird, immer weiter kolportiert und man kann es in nahezu jeder Vorlesung, jeder Hausarbeit und in zahllosen Artikeln und Büchern von philosophierenden Naturwissenschaftlern beinahe wortwörtlich übereinstimmend wiederfinden. Offenbar ist niemandem aufgefallen, daß die Logik der Begriffe vollkommen inkonsistent ist.

<sup>5</sup> Benoît B. Mandelbrot, Die fraktale Geometrie der Natur, Heidelberg 1991

<sup>6</sup> Z.B. Pohlisches Pendel, Magnetpendel, gekoppeltes Pendel u.v.a.

<sup>7</sup> J.C. Maxwell, Matter and motion, London 1920

Ganz klar hatte Maxwell also die Vorstellung, daß es jemals gleiche Ursachen für dieselbe Reaktion zu einem anderen Zeitpunkt geben könne, ins Reich der Metaphysik verwiesen. Damit hatte er die Theorie der Irreversibilität aller realen Prozesse genial vorweggenommen. Noch wichtiger ist die Schlußfolgerung, daß es „schwache Kausalität“ (gleiche Ursachen – gleiche Wirkungen) gar nicht gibt. Etwas, das es nicht gibt, kann aber auch nicht verletzt werden. (!?)

Um nun die neuen Effekte in der Quantenwelt erklären zu können, die von diesen Definitionen der beiden ‚Kausalitätsarten‘ nicht vollständig erfaßt werden, führte man noch die Möglichkeit der Verletzung dieser beiden ein, anstatt den Begriff Kausalität endlich richtig zu definieren.

Was ist an all denjenigen Definitionen falsch, die Kausalität mit einem Adjektiv versehen und die von Verletzung derselben reden? Falsch ist anzunehmen, ein Prinzip, denn das Kausalitäts*prinzip* ist der richtige Begriff, nicht Kausal*gesetz*, könne verletzt werden. Ein Prinzip kann nicht verletzt sein, denn dann wäre es keins. Ein Prinzip ist ein oberster Grundsatz. Er kann nur erkannt werden, er ist wie ein Axiom zu verstehen, man kann ihn naturwissenschaftlich weder herleiten noch beweisen.<sup>8</sup>

Wie ist dann aber „objektiver Zufall“ zu verstehen? Bekanntlich tat sich Einstein schwer, seine Existenz überhaupt anzuerkennen und er wollte unbedingt am Determinismus festhalten, während die Quantenmechaniker sich wiederum schwer taten, angesichts zufälliger Ereignisse noch von kausalen Prozessen zu reden. Unglücklicherweise hatten sie Hegel nicht gelesen. Versuchsweise wurde von vielen Naturwissenschaftlern eine Art „probabilistische“ Kausalität eingeführt, ein Begriff, der eine *contradictio in adjectu* darstellt. Heisenberg z.B. sprach ständig von Kausalität und meinte Vorhersagen, war also in der „alten“ Definition gefangen.<sup>9</sup> Klugerweise vermied er aber Begriffe wie „statistische“ oder „probabilistische“ Kausalität.

Wie ist das Dilemma nun zu lösen?

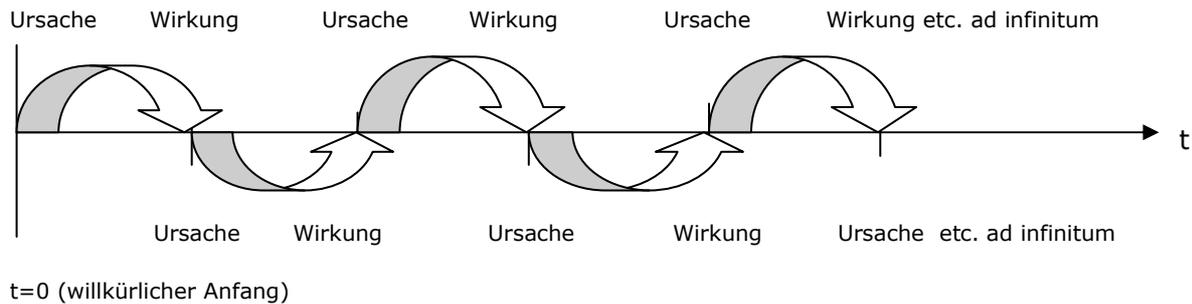
Zunächst müssen wir genauer definieren, was kausale Reaktionen (im Gegensatz zu nur korrelierten) eigentlich sind und wann bzw. unter welchen Umständen überhaupt Zufallsereignisse auftreten.

Kausale Reaktionen können nur solche sein, die unmittelbar materiell zusammenhängen, auf der gerichteten Zeitachse ablaufen und bei denen Anfang und Ende hinreichend genau bekannt sind oder erforscht werden können. D.h. nur Einzelreaktionen können kausal verknüpft sein. Bei einer Reaktionskette einer Vielzahl von Einzelreaktionen kann eine kausale Verknüpfung nur zwischen den konkreten Einzelreaktionen definiert werden. Eine Kausalität vom Anfang der Kette bis zum Ende ist nicht definierbar, gerade weil einige der Reaktionen zufällig sind und daher in keiner Weise von weit vorhergehenden Ursachen beeinflusst werden können. Dies ist das Hauptargument gegen den sogenannten Schmetterlingseffekt: der Schmetterling kann nur seine unmittelbare Umgebung kausal beeinflussen, meist passiert dann weiter nichts. Erst wenn der Effekt sich aufschauelt, werden weiter entfernte Reaktionen stattfinden können, aber auch nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die absolut gar nichts mehr mit der Anfangsreaktion zu tun haben. Alle Einzelreaktionen der Kette, von einem Glied zum nächsten, sind gleichwohl kausal bedingt (Abb. 1).

---

<sup>8</sup> Auch ein Gesetz läßt keine Ausnahmen zu, sonst wäre es kein Gesetz mehr. Ausnahmen kann es nur von Regeln geben; man kann daher in erster Näherung auch sagen, ein Gesetz ist eine Regel ohne Ausnahme.

<sup>9</sup> Werner Heisenberg, *Der Teil und das Ganze – Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, München 1981, besonders das Kapitel „10. Quantenmechanik und Kantsche Philosophie“, S. 141ff.



**Abb. 1** Ursache-Wirkungskette ( $t = \text{Zeit}$ ). Wie schon bei Hegel notiert, ist eine Wirkung immer auch gleichzeitig die Ursache für eine nächste oder andere Wirkung usw. Der Anfang der Kette ( $t = 0$ ) ist willkürlich gewählt; die Zeitachse ist nur zur Vereinfachung als Gerade dargestellt, in Wirklichkeit müßte sie dreidimensional im Sinne einer verzweigten Zeitlogik angenommen werden. Dies ist allerdings auf einer zweidimensionalen Ebene nicht darstellbar.

Genau das gleiche gilt für den Zufall, für Zufallsreaktionen. Auch diese passieren nur an *einer* Stelle in der (gedachten) Reaktionskette. Zufall heißt hier aber keineswegs, diese Reaktion sei „akausal“, das gibt es nämlich nicht, denn dann wäre wieder das Kausalitätsprinzip verletzt. Das *Ergebnis* der Reaktion ist *unvorhersehbar*; es ist aber auch nicht willkürlich, so daß es sich verbietet, von absolutem Zufall zu reden. Wahrscheinlich war genau darauf der Widerwillen Einsteins zurückzuführen, den objektiven Zufall anzuerkennen, er sah darin unglücklicherweise reine Willkür. Physiker unterscheiden daher heute genau zwischen den Begriffen Reaktion und Ereignis: „Ein Vorgang, dessen Ausgang nur vom Zufall abhängt, heißt ein *Zufallsexperiment* und die möglichen Ergebnisse eines Zufallsexperimentes heißen *Ereignisse*.“<sup>10</sup> Wir müssen also Ergebnisse von deterministischen Experimenten, bei denen wir das Ergebnis hinreichend gut kennen (d.h. mit kleinen und kleinsten Fehlern, die für die menschliche Praxis keine Rolle spielen), demzufolge *Reaktionen* nennen.

Und nun lösen wir das Geheimnis des objektiven Zufalls unter Beibehaltung des Kausalitätsprinzips. Erst so ergibt sich eine philosophische Konsistenz der Begriffe und Kategorien. Zwischen Physik und Philosophie gibt es dann und nur dann keinen unauflösbaren Widerspruch mehr.

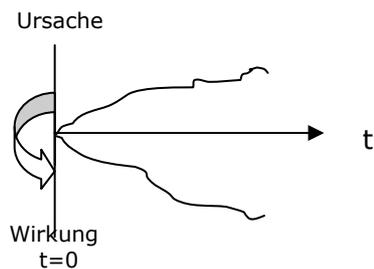
Wir nehmen uns dafür das Lieblingsbeispiel aller Physiker vor, an dem sie die vermeintliche Ohnmacht des Kausalitätsprinzips wieder und wieder meinen demonstrieren zu können: den radioaktiven Zerfall. Hatte es Einstein noch maßlos irritiert, daß beim photoelektrischen Effekt das vom UV-Licht aus einer Metallfolie im Hochvakuum herausgeschlagene Elektron den Zeitpunkt und die Richtung, in der es davonfliegen würde, selbst bestimmen sollte (eben objektiv zufällig), so beunruhigt die meisten Physiker heute noch beim radioaktiven Zerfall, daß keiner weiß, welches Atom zuerst zerfällt und – wiederum – in welche Richtung sein Impuls es lenkt. Das ist aber keineswegs eine Fragestellung, aus der man das Gesetz des radioaktiven Zerfalls herleiten könnte, denn 1. ist dies ein irreversibler Prozeß, so daß 2. bei jedem erneuten

<sup>10</sup> Habbo Hait Heinze, Die Permanente im thermodynamischen Viel-Bosonen-Pfadintegral sowie die Bestimmung von Phasenübergängen aus experimentellen Streuspektren atomarer Cluster, Diplomarbeit an der Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, Oldenburg 1998, S. 85. Die Ergebnisse eines Zufallsexperimentes, die mit Hilfe einer abstrakten Menge definiert werden, nämlich der *Menge der Elementarereignisse* in einem gegebenen *Stichprobenraum* oder auch *Ereignisraum*, bilden die Grundlage für Monte-Carlo-Rechenverfahren. Darauf kann hier nicht näher eingegangen werden. Monte-Carlo-Verfahren werden im allgemeinen dazu benutzt, abstrakte mathematische Zufallsexperimente numerisch zu simulieren. Mit solchen Zufallsexperimenten werden in der Regel unbekannte Größen  $\Theta$  berechnet, die mit Hilfe mathematischer Modelle als Erwartungswerte bestimmter Zufallsvariablen  $X$ , also  $\Theta = E(X)$ , interpretiert werden (ibd.). Monte-Carlo-Verfahren spielen auch eine große Rolle bei der quantenchemischen Berechnung von molekularen Elektronenstrukturen mit *ab-initio* Verfahren, die angeblich ohne empirische Parameter auskommen (vgl. z.B. Enrico Clementi, Ab initio computations in atoms and molecules, IBM Journal of Research and Development 44, 228-245 [2000]).

Versuch ein anderes Atom zerfällt und 3. ist der Zeitpunkt immer ein anderer, an dem das erste Atom zerfällt. Es spielt deshalb überhaupt keine Rolle, ob man dies alles von einem einzelnen Atom weiß oder nicht. Und es spielt weiter deshalb keine Rolle, weil Atome einer Art ununterscheidbar sind, Elementarteilchen sowieso. Die Ursache für den radioaktiven Zerfall selbst ist sehr wohl bekannt: es ist die Instabilität dieser Atomart; deshalb zerfällt dieses Atom. Das Gesetz des Zerfalls hingegen wurde aus der Reaktion eines immens großen Kollektivs von zerfallenden Atomen hergeleitet, die man messen kann; es ist ein Zerfall erster Ordnung, er hat die geometrische Form einer E-Funktion mit negativem Exponenten, so daß man die Halbwertszeit und alle anderen Parameter der Reaktion berechnen kann. Dies ist alles, was man für eine praktische Anwendung wissen muß, sei es eine Atombombe, ein Atomkraftwerk oder ein Atom-U-Boot.

Wir sehen, zufällig heißt hier ganz präzise, man weiß einige Dinge nicht, sie sind nicht vorhersehbar, sie sind aber auch ganz unwesentlich für die Gesamtreaktion und für die Ableitung der Gesetzmäßigkeit. Nichts geschieht unkausal.

Die *philosophische* Lösung des Problems, was die Ursache für Zufall ist, ist folgende: dem Zufall geht auf der Zeitachse nichts voraus, er geschieht unmittelbar, instantan. Das bedeutet, Ursache und Wirkung fallen zusammen, und zwar bei  $t=0$ . Wieder ist das Kausalitätsprinzip gewahrt, denn, anders ausgedrückt, der Zufall ist seine eigene Ursache (Abb. 2).



**Abb. 2** Zufall als Ursache und Wirkung zugleich. Dem Zufall geht keine andere Ursache auf der Zeitachse voraus; die möglichen „Produkte“ der Zufallsreaktion sind stilisiert angedeutet.

Da dies schon Aristoteles<sup>11</sup> und annähernd 2000 Jahre später Hegel<sup>12</sup> präformuliert haben, nenne ich dies das Aristoteles-Hegel-Kaiser Theorem, oder kurz AHK Theorem.

<sup>11</sup> Aristoteles, Physik. Vorlesung über die Natur. Griechisch-deutsch, hrsg. von Hans Günther Zekl, Band 1: Buch I–IV. Meiner-Verlag, Hamburg 1986, Buch II, Capitel 4 und 5. Vgl. auch die vorzügliche Interpretation von Helene Weiss, Kausalität und Zufall in der Philosophie des Aristoteles, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt 1967.

<sup>12</sup> Georg Wilhelm Friedrich Hegel, Wissenschaft der Logik, Erster Teil. Die objektive Logik. Erster Band. Die Lehre vom Sein (1832). Nach dem Text von GW, Bd. 21 neu herausgegeben von Hans-Jürgen Gawoll mit einer Einleitung von Friedrich Hogemann und Walter Jaeschke. PhB 385. 2., verbesserte Auflage, Meiner: Hamburg 2008. Den gesamten Text findet man auch im Gutenberg-Projekt im Internet.