



Universität
Basel

PHILOSOPHISCHES SEMINAR

SEMINARARBEIT

Macht die Quantenphysik das Kantsche Kausalprinzip obsolet?

Benedikt Schmidt

benedikt.schmidt@stud.unibas.ch

Helvetiaplatz 26, 4055 Basel

4. Semester

14-932-057

Eingereicht bei Prof. Dr. Maarten J.F.M. Hoenen

September 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Terminologie	6
2.1	Naturgesetze	6
3	Kausalität in der Physik	9
3.1	Klassische Physik	9
3.2	Quantenphysik	10
3.2.1	Resultate der Quantenphysik	10
3.2.2	Nicht-Lokalität und Indeterminismus	11
3.2.3	Nichtseparabilität	12
3.2.4	Bell-Experimente	12
4	Philosophische Konzepte von Kausalität	14
4.1	Hume's Analyse der Kausalität	14
4.1.1	Tatsachen und Beziehungen zwischen Ideen	14
4.1.2	Kausale Inferenzen: Ursache und Wirkung	15
4.1.3	Probabilistisches Denken	16
4.1.4	Das Problem der Induktion	17
4.2	Kants Analyse der Kausalität	17
4.2.1	Logische und reale Gründe	18
4.2.2	Synthetische a priori Urteile	19
4.2.3	Wahrnehmungsurteile und Erfahrungsurteile	19
4.2.4	Kantsche Kategorien	20
4.2.5	Kants Antwort auf Hume	20
5	Kantsche Kausalität und Quantenphysik	22

5.1	Von Weizsäckers Vorschlag	22
5.2	Synthese von Quantenphysik und kantscher Kausalität	23
5.2.1	Analogien	24
5.2.2	Kompatibilität	25
6	Konklusion	26
7	Erklärung zur wissenschaftlichen Redlichkeit	28
	Bibliographie	29

1 Einleitung

In seinen Aufsätzen über Quantentheorie und Philosophie (Heisenberg und Busche 1979) widmet sich Heisenberg dem Begriff der Kausalität. Im Abschnitt Quantenmechanik und Kantsche Philosophie berichtet er von einem Gespräch mit der Philosophin Grete Hermann und Carl Friedrich von Weizsäcker über das Kantsche Kausalgesetz. Zur Zeit dieses Gesprächs befand sich die Erforschung der Quantenphysik in einer Blütenphase. Hochbegabte Menschen aus verschiedensten Ländern begaben sich nach Deutschland, um daran teilzuhaben. Die meisten von ihnen hatten einen Hintergrund in Physik, wenige in Philosophie. Eine davon war Grete Herrmann. Sie kam, um sich mit Atomphysikern über die Gültigkeit des Kantschen Kausalgesetzes zu unterhalten. Diese Gültigkeit wurde durch die Quantenphysik vermehrt in Frage gestellt.

Dieses Gespräch soll mir als Anlass dienen, im Folgenden genauer auf den Begriff der Kausalität einzugehen. Im Zentrum steht die Frage, ob quantenphysikalische Fortschritte die Analyse der Kausalität von Immanuel Kant obsolet machen.

Als Grundlage werden zu Beginn in Kapitel 2 die Begriffe Natur, Naturgesetz (deterministisch und statistisch) definiert. Kausalität ist ein wichtiges Konzept in der klassischen Physik. Kapitel 3 behandelt einerseits Dimensionen eines klassischen Kausalitätsbegriffs. Andererseits wird gezeigt, inwiefern Resultate der Quantenphysik wie Nicht-Lokalität, Nicht-Separabilität und Indeterminismus diese Dimensionen verletzen. Kapitel 4 beschäftigt sich mit philosophischen Konzepten von Kausalität. Zum einen wird Hume's Ansatz, wonach Kausalität durch Gewohnheit aus wiederkehrender, gleichartiger Erfahrung etabliert wird, nachvollzogen. Als Antwort auf diesen skeptischen Ansatz wird die Kantsche Analyse der Kausalität dargestellt. Kant sieht

Kausalität als Konzept des Verstandes, die Erfahrung überhaupt erst möglich machen. Kants Vorstellung von Kausalität scheint auf den ersten Blick in Widerspruch zu quantenphysikalischen Resultaten stehen. Kapitel 5 schliesslich stellt eine Möglichkeit vor, wie Kantsche Kausalität und quantenphysikalische Resultate kompatibel gedacht werden können.

2 Terminologie

Um terminologische Klarheit zu schaffen, seien zu Beginn einige grundlegende Begriffe definiert. Die folgenden Definitionen entstammen Detel (Detel 2014, S. 61 - 71). Natur wird in der allgemeinen Fassung als Reich der Naturgesetze aufgefasst. Sie umfasst alle Ereignisse, die durch Naturgesetze miteinander verbunden sind.

2.1 Naturgesetze

Der Begriff des Naturgesetzes ist schwieriger zu definieren. Konsens herrscht darüber, dass Naturgesetze regelmässige Folgen von Ereignistypen sind und sich durch synthetische Allsätze beschreiben lassen. Aber nicht alle empirischen Korrelationen beschreiben naturgesetzliche Zusammenhänge. Beispielsweise klingelt morgens um 7.00 immer nicht nur mein Wecker, sondern auch der Wecker vieler anderer Menschen. Deshalb sind nicht alle empirischen Regularitäten auch Naturgesetze. Wir wollen uns an folgende Definition halten:

Definition 2.1 (Naturgesetz). Naturgesetze sind allgemeine, konstante empirische Regularitäten, gemäss denen sich Zustände S von Gegenständen x unter bestimmten Bedingungen entweder stets auf eine bestimmte Weise Q verändern oder stets mit anderen Zuständen R von x korreliert sind.

Naturgesetze sind *wesentlich* allgemein, sie stellen nicht bloss eine logische Konjunktion aus endlich vielen singulären Sätzen dar. Zudem sind sie *unbeschränkt* allgemein: Ihre Gültigkeit ist nicht auf Raum-Zeit-Intervalle beschränkt. Schliesslich sind sie *hypothetisch* allgemein, was bedeutet, dass sie kontrafaktische Bedingungssätze ermöglichen. Ein Beispiel dafür ist die Aussage "Falls b ein Mensch wäre, dann wäre b auch ein Säugetier". Besonders

wichtig ist die Unterscheidung zwischen deterministischen und statistischen Naturgesetzen.

Definition 2.2 (deterministisches Naturgesetz). Ein Naturgesetz heisst deterministisch, wenn es die ausnahmslose Verbindung zweier Typen von Tatsachen repräsentiert.

Allgemein gesprochen sind deterministische Naturgesetze Konditionalsätze des Typs «Alles, was P ist, ist auch Q ». Mit Symbolen der Logik ausgedrückt: $\forall x(P(x) \supset Q(x))$. Daraus folgt, dass Sätze des Typs «Es gibt ein x , das P und nicht Q ist» ($\exists x(P(x) \wedge \neg Q(x))$), deterministischen Naturgesetzen widersprechen. Fundamental unterschiedlich sind statistische Naturgesetze zu betrachten. Ihnen liegt ein Wahrscheinlichkeitsbegriff zugrunde, eine Art objektive physikalische Wahrscheinlichkeit, die sich als Grenzwert von Folgen von Häufigkeiten konstituiert. Davon abzugrenzen sind logische oder subjektive Wahrscheinlichkeiten.

Definition 2.3 (statistisches Naturgesetz). Ein Naturgesetz heisst statistisch, wenn es die Wahrscheinlichkeit für die Verbindung zweier Typen von Tatsachen repräsentiert.

Ein statistisches Naturgesetz beinhaltet folglich eine Wahrscheinlichkeitsaussage folgenden Typs: «Die Wahrscheinlichkeit p , dass ein Ding, das G ist, auch F ist, beträgt r » (dies wird notiert als $P(G|F) = r$). Dies ist die Struktur einer bedingten Wahrscheinlichkeit. Der Extremfall $r = 1$ entspricht einem deterministischen Naturgesetz. Im Gegensatz zu deterministischen Naturgesetzen widersprechen Sätze der Form «Es gibt ein x , das P und nicht Q ist» statistischen Naturgesetzen nicht. Ein Beispiel für ein statistisches Naturgesetz ist, dass die Wahrscheinlichkeit einer 6 bei einem regulären Würfel $1/6$ beträgt. Wenn in den ersten 10 Würfeln keine 6 erscheint, widerspricht dies

dem statistischen Gesetz nicht. Das kommt daher, dass die Wahrscheinlichkeit $1/6$ als Grenzwert von Häufigkeiten zustande kommt.

Mit diesen grundlegenden Begriffen können wir nun Dimensionen der Kausalität in der klassischen Physik untersuchen und nachvollziehen, inwiefern diese durch quantenphysikalische Resultate verletzt werden.

3 Kausalität in der Physik

3.1 Klassische Physik

Der allgemeine Naturbegriff aus Definition 2.1 kann auf klassische Vorstellungen zugespitzt werden. Dies führt zum Begriff der klassischen Naturvorstellung:

Definition 3.1 (klassische Naturvorstellung). Natur ist das Reich jener Tatsachen, die durch deterministische Naturgesetze miteinander verbunden sind. Die deterministischen Naturgesetze erlauben es, alle Ereignisse und Prozesse sicher vorherzusagen, wenn alle Randbedingungen bekannt sind.

Generell herrscht keine Einigkeit über eine auf nichtkausale Begriffe zurückführende Definition von Kausalität in der Physik. Vielmehr setzte sich die Ansicht durch, dass es sich um einen „Familienbegriff“ handelt, d.h. es ist möglich, verschiedene Dimensionen des Kausalbegriffs anzugeben, nicht aber notwendige und hinreichende Bedingungen. Im Folgenden sind einige zentrale, begrifflich voneinander unabhängige Aspekte des Alltagsbegriffs Ursache aufgelistet (Frisch 2012, S. 413):

1. Asymmetrie: Wenn a eine Ursache von b ist, ist b keine Ursache von a .
2. Zeitasymmetrie: Wirkungen gehen ihren Ursachen nicht zeitlich voraus.
3. Lokalität: Ursachen und Wirkungen lassen sich räumlich und zeitlich lokalisieren; Ursachen sind mit ihren räumlich oder zeitlich entfernten Wirkungen durch kontinuierliche Kausalketten verbunden; Wirkungen pflanzen sich nicht beliebig schnell fort.
4. Determinismus: Ursachen bestimmen ihre Wirkungen.

5. Vagheit: Die Relata der Kausalbeziehung sind vage und nicht präzise bestimmt. Dies steht im Gegensatz zu den präzisen Grössen, die durch physikalische Gesetze in Beziehung gesetzt werden.
6. Hervorbringung: Ursachen haben die „Kraft“, ihre Wirkungen hervorzubringen, und sind somit „verantwortlich“ für das Eintreten ihrer Wirkungen.

3.2 Quantenphysik

Die Quantenphysik entstand im frühen 20. Jahrhundert und beschäftigt sich mit einer Mikrowelt unterhalb der Ebene von Atomen. Die Quantenphysik unterscheidet sich nicht nur in ihrer mathematischen Struktur grundlegend von der klassischen Physik. Sie verwendet Begriffe und Konzepte, die sich der Anschaulichkeit entziehen und auch einigen Prinzipien widersprechen, die in der klassischen Physik als fundamental und selbstverständlich angesehen werden.

3.2.1 Resultate der Quantenphysik

Grundlegende Resultate der Quantenphysik sind (Detel 2014, S. 88 - 91):

- Die Natur ist *nicht* stetig, d.h. eine Strahlung kann nur in Form von diskreten Paketen emittiert und absorbiert werden.
- Elektronen werden durch 4 Eigenschaften beschrieben, die sogenannten Quantenzahlen. Elektronen mit denselben Quantenzahlen treten nicht im selben Atom auf und sind ununterscheidbar (*fehlende Individualität* der elementarsten Bausteine der Natur).

- Der Zustand eines Quantenobjekts ist abhängig von Ort und Zeit. Messbar ist lediglich die Wahrscheinlichkeit, das Quantenobjekt zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort zu finden.
- Für einige quantenmechanische Messgrößen gilt die *Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation*. Auf diese Weise sind statistische Verhältnisse tief in die Natur eingebaut.
- Viele quantenmechanische Vorgänge sind nicht raumzeitlich deutbar. Raum und Zeit sind bloss abgeleitete Kategorien.
- Quantenobjekte sind nach Abschluss einer Interaktion nicht separabel (*Nicht-Lokalität*).
- Quantenobjekte vereinigen den Wellenaspekt und den Teilchenaspekt in sich. Die beiden Aspekte werden überlagert.

3.2.2 Nicht-Lokalität und Indeterminismus

Genau wie die klassische Physik macht auch die Quantenphysik Vorhersagen, allerdings solche, die Wahrscheinlichkeitscharakter haben. Im Allgemeinen lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, welche Eigenschaft des betrachteten physikalischen Systems zu einer beliebigen Zeit vorgefunden wird, wenn zu einer bestimmten Zeit bestimmte Eigenschaften bekannt sind. Jedoch lässt sich eine genaue, empirisch überprüfbare Wahrscheinlichkeit angeben. Dies steht im Widerspruch zum Determinismus (4), weil die Wirkungen nicht definitiv bestimmt sind (Held 2012, S. 72) und auch zur Lokalität (3).

Die Quantenphysik ist also indeterministisch und nichtlokal: Ereignisse, die an Punkten stattfinden, die durch einen raumartigen Abstand von den genannten Punkten getrennt sind, fließen in die Wahrscheinlichkeiten für das, was an diesen Punkten geschieht, ein (Esfeld 2012, S. 91-92).

3.2.3 Nichtseparabilität

Ein weiteres zentrales Merkmal in der Quantenphysik ist die Nichtseparabilität: Auch wenn zwei Quantensysteme durch beliebigen räumlichen Abstand voneinander getrennt sind, bleiben sie durch bestimmte Relationen miteinander verbunden. Diese Relationen sind durch keine Eigenschaften festgelegt, die jedem der beiden Quantensysteme unabhängig vom anderen System zukommen (Esfeld, 2013, S. 94). Die Nichtseparabilität verträgt sich schlecht mit der Asymmetrie (1) und der Zeitasymmetrie (2).

3.2.4 Bell-Experimente

Ein weiteres Problem ergibt sich durch die Interpretation von sogenannten Bell-Experimenten. Dabei werden zwei Beobachtende betrachtet, die in zwei räumlich getrennten Laboren unabhängig voneinander Experimente mit verschränkten Systemen durchführen. Dabei ist es möglich, dass die Wirkungen der beiden Experimente auf eine Weise miteinander korreliert sind, welche in klassischen kausalen Modellen nicht vorgesehen ist. Solche quantenmechanischen Korrelationen sind aber im Widerspruch zur Konjunktion der folgenden drei Postulate (Frisch 2020):

- Relativistische Kausalität: Die kausale Vergangenheit eines Ereignisses ist sein vergangener Lichtkegel.
- Freie Wahl: Die Messungsbedingungen können frei gewählt werden und haben somit keine Ursachen im zu beobachtenden System.
- Reichenbachs Prinzip der gemeinsamen Ursache: Korrelation zwischen Ereignissen, die nicht in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen, wird durch eine gemeinsame Ursache in deren gemeinsamen Vergangenheit erklärt.

Wenn nun die quantenmechanischen Voraussagen, die empirisch bestätigt sind, akzeptiert werden sollen, muss mindestens eines der drei Postulate fallen gelassen werden. Wird die freie Wahl fallen gelassen, impliziert das einen Superdeterminismus. Wird relativistische Kausalität fallen gelassen, führt das zu retro-kausalen Beziehungen. Dabei würden Messungen den früheren Zustand der Messquelle beeinflussen. Reichenbachs Prinzip der gemeinsamen Ursache (Hitchcock und Rédei 2021) stellt eine Verbindung zwischen kausaler Struktur und probabilistischen Korrelationen her. Dadurch wird kausale Inferenz von beobachteten Korrelationen ermöglicht. Wird es fallen gelassen, stehen wir vor dem Problem, wie Kausalität und Korrelation zusammenhängen. Folglich sind alle drei Optionen unbefriedigend.

Dieser Kurzüberblick über quantenphysikalische Resultate zeigt, dass diese sich besonders schlecht mit kausalen Begriffen vertragen. Kausalität im klassischen Sinne hat in der Quantenphysik keinen Platz.

Nun wollen wir uns Konzepten von Kausalität in der Philosophie zuwenden, nämlich denjenigen von Hume und Kant.

4 Philosophische Konzepte von Kausalität

4.1 Hume's Analyse der Kausalität

Kants Theorie der Kausalität entstand im Wesentlichen als Antwort auf Hume's skeptische Analyse der Kausalität. Als Basis sei Hume's Analyse der Kausalität (Hume und Wunderlich 2016) in ihren Grundzügen vergegenwärtigt (Morris und Brown 2021). In der Debatte über Kausalität war für lange Zeit eine Unterscheidung grundlegend, die auf Aristoteles zurückgeht: Die Unterscheidung zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis (griech. *scientia*) und Überzeugung (griech. *opinio*).

4.1.1 Tatsachen und Beziehungen zwischen Ideen

Hume orientiert sich nicht an dieser traditionellen Unterscheidung. Er teilt „alle Objekte des menschlichen Verstands oder menschlicher Untersuchung“ in zwei exklusive und erschöpfende Kategorien ein: Tatsachen (*matters of fact*) und Beziehung zwischen Ideen (*relations of ideas*) (Hume und Wunderlich 2016, S. 45). Letztere umfassen alle Propositionen, die von intuitiver oder demonstrativer Gewissheit sind. Diese können durch reine Tätigkeit des Denkens entdeckt werden. Es handelt sich also um *a-priori* Erkenntnisse. Als Beispiel nennt er den Satz des Pythagoras. Im Gegensatz dazu sind Propositionen, die Tatsachen betreffen, abhängig von der realen Welt. Das Gegenteil jeder Tatsache bleibt immer möglich und deren Negation impliziert niemals einen Widerspruch. Zu behaupten, die Hauptstadt der Schweiz sei Basel, ist falsch, aber nicht widersprüchlich.

4.1.2 Kausale Inferenzen: Ursache und Wirkung

Üblicherweise ziehen wir als Quelle für die Erkenntnis von Tatsachen unsere Wahrnehmung oder Erinnerung heran. Neben diesen beiden gibt es einen einzigen dritten Weg, den Weg der kausalen Inferenz. Beim Etablieren von kausalen Inferenzen wird vorausgesetzt, dass eine Art von Verbindung zwischen gegenwärtigen Tatsachen (*Ursachen*) und dem, was daraus abgeleitet wird (*Wirkungen*), besteht. Hume stellt sich den beiden folgenden Fragen: Was ist diese Verbindung und wie wird sie etabliert?

Wenn die Verbindung durch Vernunft etabliert wird, muss sie entweder Beziehungen zwischen Ideen oder Tatsachen beinhalten. Hume schliesst aus, dass diese Verbindung Beziehungen zwischen Ideen beinhalten könnte. Sein Argument dafür ist folgendermassen aufgebaut: Wirkungen sind von ihren Ursachen verschiedenen Ereignisse. Deshalb ist es logisch widerspruchsfrei möglich, dass eine Ursache vorkommen kann, ohne dass deren Wirkung eintritt. Wenn wir a-priori schlussfolgern, betrachten wir die Idee eines Objekts als Ursache, uns zwar unabhängig von unseren Beobachtungen desselben Objekts. Diese Idee des Objekts kann nicht die Idee eines weiteren Objekts, wie beispielsweise dessen Wirkung, enthalten. Deshalb kann die Idee uns keine notwendige Verknüpfung zwischen dem Objekt und seiner Wirkung offenbaren. Wer beispielsweise a-priori über alkoholische Getränke nachdenkt, ohne in Kenntnis über deren Wirkungen zu sein, kann schwerlich diese Wirkungen erdenken. Deshalb kommt Hume zum Schluss, dass a-priori Denken, also Beziehungen zwischen Ideen, nicht die Quelle für die Verbindung von Ursache und Wirkung sein können.

Damit verbleibt als einzige Möglichkeit, dass kausale Inferenzen Tatsachen beinhalten und damit Erfahrung. Wenn ein Ereignis *A* räumlich und zeitlich immer auf ein Ereignis *B* folgt, denken wir deren Beziehung alltäg-

lich als Ursache und Wirkung. Unser Geist etabliert eine kausale Inferenz, um diese Korrelation zu greifen. Objekt *A* ist die Ursache, Objekt *B* die Wirkung. Das hält Hume für unzulässig. Unsere Erfahrung in der Vergangenheit gibt uns nur Informationen über Objekte, wie sie in der Vergangenheit waren. Unsere gegenwärtige Erfahrung bezieht sich nur auf die Objekte, die wir jetzt erfahren. Kausale Inferenzen projizieren vergangene Erfahrungen in die Zukunft. Dafür ist aber eine Verbindung irgendwelcher Art zwischen Vergangenheit und Zukunft notwendig. Demonstratives Denken bezieht sich auf Beziehungen zwischen Ideen und kommt daher nicht infrage.

4.1.3 Probabilistisches Denken

Also bleibt nur auf Wahrscheinlichkeit beruhendes Denken. Dann geraten wir allerdings in einen Zirkel: Wir sind gezwungen, eine Art Uniformitätsprinzip anzunehmen, wonach die Zukunft uniform zur Vergangenheit ist. Dieses Uniformitätsprinzip ist aber weder intuitiv noch beweisbar. Folglich müssten wir durch probabilistisches Denken die Voraussetzung zum Beweis der Gültigkeit von wahrscheinlichem Denken beweisen, was einem Zirkelschluss gleichkäme. Deshalb kommt Hume zum Schluss, dass kausale Inferenzen nur durch Erfahrung und somit niemals mit vollständiger Sicherheit zu haben sind. Sie entstehen durch Gewohnheit. Letztere sieht er auch als Ursache des zuvor behandelten Uniformitätsprinzips. Zusammenfassend lautet Hume's These: Wenn wir sagen, dass ein Objekt notwendig verknüpft mit einem andren ist, meinen wir, dass die Objekte in unseren Gedanken assoziiert sind. Die notwendige Verknüpfung ist nicht in den Dingen. Dadurch etablieren wir eine kausale Inferenz.

4.1.4 Das Problem der Induktion

Die Humesche Ablehnung von Kausalität sticht ins Herz der Methodik der naturwissenschaftlichen Forschung, namentlich der Induktion. Induktive Argumente zeichnen sich dadurch aus, dass die Wahrheit der Prämissen die Wahrheit der Folgerung wahrscheinlicher macht (Hübner 2015, S. 33). Sie gehen von Aussagen über eine Stichprobe aus und erweitern die Aussagen auf eine allgemeine Form (Hübner 2015, S. 33). Üblicherweise wird in den Naturwissenschaften von Beobachtung induktiv auf allgemeine Modelle geschlossen, die dann durch erneute Beobachtungen geprüft werden. Nach Hume sind induktive Schlüsse nicht gültig. Diese These wurde berühmt unter dem Namen *Problem der Induktion*¹ (Henderson 2020): Mit welcher Begründung gelangen wir zu unseren Überzeugungen über das Unbeobachtete auf Basis von induktiven Inferenzen? Im Übergang von den Prämissen zur Konklusion einer induktiven Inferenz sieht Hume folgendes Dilemma: Es gibt zwei mögliche Arten von Argumenten, demonstrativ und wahrscheinlichkeitsbasiert, aber beide sind untauglich. Ein demonstratives Argument führt zur falschen Art von Konklusion, denn induktive Schlüsse sind per Definition nicht demonstrativ. Ein wahrscheinlichkeitsbasiertes Argument ist aufgrund der oben geführten Diskussion über ein allfälliges Uniformitätsprinzip zirkulär.

4.2 Kants Analyse der Kausalität

Kants Theorie der Kausalität ist als Antwort auf Hume's skeptische Analyse der Kausalität entstanden. Zentral für diese Antwort ist Kants revolutionäre Idee der Entstehung von Erfahrung. Dabei spielen a priori Konzepte und

¹Hume's Argument zum Problem der Induktion ist eines der berühmtesten philosophischen Argumente. Das Problem der Induktion soll hier nicht vertieft werden. Details dazu finden sich in (Henderson 2020).

Prinzipien des Verstands eine Rolle, aber auch synthetische a priori Urteile. Um das Gedankenkonstrukt, dessen integrale Bestandteile die zuvor genannten Entitäten sind, zu verstehen, soll im Folgenden Kants Überlegungen aus verschiedenen Werken zusammengefasst werden (nach De Pierris und Friedman 2018).

4.2.1 Logische und reale Gründe

In *Attempt to Introduce the Concept of Negative Magnitudes into Philosophy* (Kant, Walford und Meerbote 1992) führt Kant eine Unterscheidung zwischen *logischen* Gründen und *realen* Gründen ein. Beide bezeichnen eine Art Verbindung zwischen einer Ursache und einer Wirkung. Im Falle von logischen Gründen sieht Kant diese Verbindung als Ausprägung des Identitätsprinzips. Eine Wirkung wird durch eine Ursache hervorgerufen, weil die Wirkung durch Analyse der Konzepte von Ursache und Wirkung schon in der Ursache enthalten ist. Die Wirkung ist dann teilweise identisch mit der Ursache. Das Urteil, dass die Wirkung aus der Ursache folgt, ist in diesem Falle analytisch.

Im Falle von realen Gründen entsteht eine Wirkung aus einer Ursache ohne Übereinstimmung mit dem Identitätsprinzip. Das Urteil, dass die Wirkung aus der Ursache folgt, ist nicht analytisch. Während für Kant der erste Fall keinerlei Erklärung bedarf, gestaltet sich der zweite komplizierter. Wie kann es sein, dass weil etwas ist, etwas anderes ist? Beispielsweise kann ein bewegter Körper *A* einen anderen, unbewegten Körper *B* in Bewegung versetzen. Die Bewegung von *A* ist etwas und die Bewegung von *B* ist etwas anderes. Trotzdem wird Letztere von Ersterer verursacht. Dieses Beispiel führt Hume zur Illustration seiner These, wonach Ursache und Wirkung komplett unterschiedliche Ereignisse sind, an. Kant postuliert, dass die Beziehung zwischen

einem realen Grund und dessen Konsequenz nur durch Erfahrung etabliert werden kann. Dieser Ansatz des frühen Kants der 1760er Jahre aus *Dreams of a Spirit-Seer Explained by Dreams of Metaphysics* (Kant, Walford und Meerbote 1992) gleicht demjenigen von Hume.

4.2.2 Synthetische a priori Urteile

Später jedoch (ab ca. 1780), ändert Kant seine Ansicht. Kant glaubt nicht mehr, dass die allgemeine Beziehung zwischen Ursache und Wirkung durch Erfahrung abgeleitet werden kann. Vielmehr sieht er das Problem der Kausalität als Teil des neuen Problems von *synthetischen a priori Urteilen*. Dieses Problem entsprang aus der früher diskutierten Vorstellung von realen Gründen. Bei realen Gründen ist die Wirkung nicht in der Ursache enthalten. Das Urteil, dass die Wirkung aus der Ursache folgt, nennt er *synthetisch* (im Gegensatz zu analytisch). Ein synthetisches a priori Urteil ist ein Urteil, dass unsere Erkenntnis ausweitet, ohne auf Erfahrung zurückzugreifen und nicht analytisch ist. Wichtig für die Diskussion der Kausalität bei Kant ist folgende Unterscheidung: Zum einen gibt es das *allgemeine* Prinzip der Kausalität, zum anderen gibt es *spezielle* Kausalgesetze. Das allgemeine Prinzip der Kausalität bezeichnet die universelle Struktur von Ursache und Wirkung. Spezielle Kausalgesetze beschreiben konkrete Fälle, wie beispielsweise die Erwärmung eines Gegenstands durch die Sonne.

4.2.3 Wahrnehmungsurteile und Erfahrungsurteile

Kant präsentiert seinen Vorschlag zur Lösung des Problems der Kausalität in § 29 der *Prolegomena*. Er unterscheidet zwischen *Wahrnehmungsurteilen* und *Erfahrungsurteilen*. Objektive empirische Urteile sind Erfahrungsurteile, subjektive empirische Urteile sind Wahrnehmungsurteile. All unsere Urteile sind

zuerst einmal Wahrnehmungsurteile, sie gelten nur für das Subjekt. Wenn solch ein Wahrnehmungsurteil in Beziehung zu einem Objekt gesetzt wird und mit diesem übereinstimmt, wird es objektiviert zu einem Erfahrungsurteil. Das Urteil ist gültig zu allen Zeiten und für alle Wahrnehmenden.

4.2.4 Kantsche Kategorien

Hier kommen nun die berühmten Kantschen Konzepte des Verstands ins Spiel. Diese Konzepte werden auch *Kategorien* genannt. Deren Funktion besteht darin, subjektive Wahrnehmungen in objektive Erfahrungen zu konvertieren. Eines dieser Konzepte, die alle a priori durch die Logik gegeben sind, ist die Form eines bedingten Urteils. Dieses Konzept erlaubt, eine bestimmte Erkenntnis als Ursache und eine andere als Wirkung einzustufen. Wenn nun in der Wahrnehmung eine bestimmte Regel auftaucht, wonach eine bestimmte Erscheinung konstant einer bestimmten anderen Erscheinung folgt, kann das Konzept des bedingten Urteils darauf angewendet werden. Wenn beispielsweise ein Gegenstand hinreichend lange von der Sonne erleuchtet wird, erwärmt er sich. Das ist in erster Linie ein Wahrnehmungsurteil. Wenn aber diese Erwärmung durch Beleuchtung notwendig ist und universal gültig, wird das Wahrnehmungsurteil zum Erfahrungsurteil. Die Transformation zum Erfahrungsurteil geschieht durch ein weiteres a priori Konzept des Verstandes, namentlich durch das Prinzip der allgemeinen Kausalität.

4.2.5 Kants Antwort auf Hume

Die Konzepte des Verstandes werden nicht aus Erfahrung abgeleitet. Es ist umgekehrt, die Erfahrung wird aus den Konzepten abgeleitet (*Prolegomena* § 30). Die Kategorien werden durch unseren Geist beigetragen, nicht durch die Erfahrung. Hier besteht der fundamentale Unterschied zu Hume, der Kausa-

lität als aus der Erfahrung entstehend begreift. Kant ist der Ansicht, dass das allgemeine Konzept der Kausalität sinnlos wäre, würde es nur aus zeitlicher Korrelation von Ereignissen und damit aus Erfahrung abgeleitet. In Kants Terminologie ist die Verbindung zwischen Ursache und Wirkung synthetisch *a priori*. Spezielle Kausalgesetze hält er aber für synthetisch *a posteriori* – also nicht analytisch aber durch Erfahrung abgeleitet. Auf den ersten Blick ähnelt das der Humeschen Position. Jedoch ist zu unterscheiden zwischen *empirischen Regeln* (Erwärmung folgt immer auf Beleuchtung) und *echten objektiven Gesetzen* (Die Sonne ist durch ihr Licht die Ursache von Wärme). Im Gegensatz zu Ersteren wird bei Letzteren das allgemeine Prinzip der Kausalität durch den menschlichen Geist hinzugefügt. Dadurch werden sie von induktiven Regeln zu Gesetzen transformiert.

Daraus ergibt sich auch Kants Antwort auf das Problem der Induktion. Die Konzepte der Kausalität und der Notwendigkeit entstehen durch die Operationen unseres Verstandes. Dadurch wird der Übergang zur Universalität ermöglicht. Dieser Prozess des Übergangs von einem subjektiven zu einem objektiven Urteil ist induktiv. Die Kantsche Antwort liefert also ein Argument für die Gültigkeit von induktiven Schlüssen.

5 Kantsche Kausalität und Quantenphysik

Die Dimensionen eines klassischen physikalischen Kausalitätsbegriffs sind in der Quantenphysik nicht gegeben. Gleich mehrere davon sind verletzt. Für die Logik unseres Denkens ist Kausalität zentral. Kausalität fühlt sich für Menschen sehr intuitiv an. Sie erlaubt es, das Denken zu strukturieren und verschiedene Ereignisse oder Erscheinungen miteinander in Beziehung zu setzen. Diese Intuition widerspiegelt sich vermutlich im kantschen Ansatz, wo Kausalität als eine Kategorie, als ein Konzept des Verstandes vorkommt, dass die Erfahrung erst ermöglicht. Kausalität ist dann eine Kategorie der Relation. Weiter unterscheidet Kant Kategorien der Qualität, der Quantität und der Modalität. Umso kontraintuitiver wirken da die Resultate der Quantenmechanik. Es soll ununterscheidbare Objekte geben? Objekte können nicht-lokal sein?

5.1 Von Weizsäckers Vorschlag

Dies führt uns zurück zum Gespräch zwischen Hermann, Heisenberg und von Weizsäcker. Hermanns Bedenken sind also gut begründet. Heisenberg antwortet mit einer theoretischen Erläuterung des Zerfalls eines Radium B-Atoms: „[...] darin äussert sich eben ein gewisses Versagen des Kausalgesetzes, beim einzelnen Radium B-Atom keine Ursache dafür angeben, dass es gerade in dieser Richtung und nicht in einer anderen das Elektron aussendet.“ (Heisenberg und Busche 1979, S. 65).

Von Weizsäcker und Hermann diskutieren dann die Kantsche Unterscheidung zwischen dem Ding *an sich* und dem physikalischen Gegenstand. Über das Ding an sich können wir gar nichts wissen, weil es schlicht nicht in Erscheinung tritt. Bloss der physikalische Gegenstand ist für uns wahrnehmbar

und wird auch Objekt genannt. Objekte sind die Voraussetzung für objektive Wissenschaft. Was Objekte sind, wird durch die Kategorien Substanz, Kausalität usw. bestimmt. Von Weizsäcker glaubt, dass die Quantentheorie eine neue Art, Wahrnehmungen zu objektivieren, anwendet. Nämlich kann das Ergebnis der Wahrnehmungen nicht mehr klassisch objektiviert werden. Alles hängt von der Beobachtungssituation ab. Allerdings glaubt er, diese Gegebenheiten mit der kantschen Analyse vereinbaren zu können. Zwar setze Kant Anschauungsformen wie Raum, Zeit und Kausalität absolut. Dies widerspricht dem quantenmechanischen Resultat, dass Raum und Zeit bloss abgeleitete Kategorien sind. Zudem widerspricht es der Relativitätstheorie.

Jedoch müssen die Experimente in der Sprache der klassischen Physik beschrieben werden, also mit Angabe von Ort und Zeit. Sonst wäre es unmöglich, mitzuteilen, was gemessen wurde. Somit wird die Kantsche Analyse relativiert. Sie wird Teil eines umfassenderen Systems und keineswegs obsolet. Mit der historischen Entwicklung und durch wissenschaftliche Entdeckungen ändert sich die Struktur des menschlichen Denkens und mit ihr die Bedeutung des Worts „Verstehen“.

5.2 Synthese von Quantenphysik und kantscher Kausalität

Kant sieht Kausalität als transzendente Bedingung für die Möglichkeit von Erfahrung. Der Konflikt zwischen der kantschen Konzeption von Kausalität und quantenmechanischen Resultaten entsteht, weil Kant scheinbar davon ausgeht, dass alle Ereignisse in der Welt eine Ursache haben. Dies bestreitet die Quantenphysik. Jedoch könnte Kant auch etwas anderes meinen (Palmquist 2013): Unsere Erwartung, dass alles eine Ursache hat, ist notwendiger Bestandteil unseres empirischen Wissens. Dann wäre Kausalität etwas

Perspektivisches. Für die zweite Deutung spricht, dass Kant eine kohärente Theorie menschlicher Freiheit vertritt. Wäre Kausalität notwendig und nicht perspektivisch, könnte ein freier Wille nicht begründet werden. Deshalb sei im folgenden die zweite, perspektivische Deutung angenommen. Diese Deutung lässt Raum für andere wissenschaftliche Ansätze, beispielsweise auch solche, die weniger Fokus auf das Prinzip der Kausalität verlangen. Als Kategorie hat Kausalität keinerlei Relevanz für die Dinge an sich.

5.2.1 Analogien

Quantenphysik bezieht sich auf eine Mikrowelt. Kantische Philosophie hat zum Gegenstand die von Menschen wahrnehmbare Welt. In der Quantenphysik gibt es Konstanten, die Schranken für den beobachtbaren Bereich definieren, wie beispielsweise die Plancksche Konstante. Sie sind abhängig von Licht. Diese Schranken können als empirische Gegenstücke zu den transzendentalen Grenzen, die Kant zieht, gesehen werden. Beispielsweise ist Kausalität eine transzendente Bedingung, die alle konzeptuelle Erkenntnis beschränkt. Hier seien einige weitere Analogien zwischen kantscher Erkenntnistheorie und Quantenphysik erwähnt (Palmquist 2013): Aus transzendentaler Perspektive unterscheidet Kant das Ding an sich von der Erscheinung. Die Quantenphysik unterscheidet aus dieser Perspektive den Originalzustand eines Teilchens vom beobachtbaren Zustand. Aus empirischer Perspektive unterscheidet Kant die Substanz vom Akzidens. Die Quantenphysik unterscheidet eine statistische Approximation von der Messung des Teilchens bzw. der Welle (Welle-Teilchen-Dualismus).

5.2.2 Kompatibilität

Kantische Kausalität jedoch bezieht sich hauptsächlich auf die wahrnehmbare, phänomenale Welt, die mit Newtonscher Physik, also klassisch, beschrieben werden kann. Sie referiert nicht auf die physikalische Welt als solche, sondern auf die physikalische Realität die beobachtbar ist. Die quantenphysikalische Mikrowelt wurde erst anfangs des 20. Jahrhunderts entdeckt. Insofern können diese beiden Perspektiven als gleichmässig legitim betrachtet werden. Sie versuchen, die eine, selbe Realität zu beschreiben. Die Fortschritte in der Quantenphysik bedeuten daher nicht, dass die Kantsche Kausalität für unsere gewöhnliche, erfahrbare Welt obsolet ist. Denn nehmen wir an, dass Quantenereignisse tatsächlich radikal unbestimmt sind, dass also statistische Approximationen anstelle mechanischer Vorhersagen treten würden. Dann wäre eine Fehlermarge in der Quantenwelt, die in die wahrnehmbare Welt transferiert wird, dermassen klein, dass sie nicht festzustellen wäre. Zufällige Quantenereignisse wären dadurch immer noch beschränkt durch Kantische Kausalität in der erfahrbaren Welt. Die Klassische Physik ist in der Quantenphysik als Grenzfall enthalten. Das spricht ebenfalls für die perspektivische Deutung.

6 Konklusion

Wichtige Dimensionen eines klassischen Kausalitätsbegriffs sind unter anderen Asymmetrie, Zeitasymmetrie, Lokalität, Determinismus, Vagheit und Hervorbringung. Diese sind kompatibel mit unserer Intuition von Kausalität. In der klassischen Physik ist Kausalität zentral: Bei bekannten Randbedingungen können durch deterministische Naturgesetze Ereignisse vorausgesagt werden. Im frühen 20. Jahrhundert wurde durch die Entwicklung der Quantenphysik an diesen Vorstellungen gerüttelt. Mithilfe statistischer Naturgesetze wurden fortan Prognosen mit Wahrscheinlichkeitscharakter getroffen. Quantenphysikalische Resultate wie die Nicht-Lokalität, der Indeterminismus oder die berühmten Bell-Experimente verletzen grundlegende Dimensionen des klassischen Kausalitätsbegriffs.

Bereits 200 Jahre früher haben sich Hume und Kant intensiv mit Kausalität beschäftigt. Hume suchte die Verbindung zwischen Ursache und Wirkung. Weil er Vernunft als Möglichkeit ausschloss, folgerte er, dass kausale Inferenzen Tatsachen (in humescher Terminologie) beinhalten und damit Erfahrung. Kausalität sieht er bloss als geistiges Konstrukt, um zeitliche und räumliche Korrelation zu fassen. Sie entsteht durch Gewohnheit.

Als Antwort auf diese skeptische Analyse sieht Kant Kausalität als a priori Konzept des Verstandes (Kategorie), welches Erfahrung erst möglich macht. Die Kategorien werden von unserem Geist beigetragen, nicht durch die Erfahrung. Sie sind eine Art logische Struktur, a priori im Verstand gegeben sind. Unsere Erfahrung basiert also auf der Struktur von Ursache und Wirkung. Damit macht Kant ein starkes Votum für die Existenz von Kausalität. Ebendiese wurde aber durch quantenmechanische Fortschritte stark in Frage gestellt.

Quantenphysik und Kantsche Kausalität unterscheiden sich voneinander.

Das bedeutet aber nicht, dass sie inkompatibel wären (Palmquist 2013). Ein Hindernis für diese Sichtweise ergibt sich aus Definition 3.1: Aus klassischer Sicht ist Kausalität eine Art Garantie für die sichere Voraussage von Ereignissen bei bekannten Randbedingungen. Diese Vorstellung wird aber durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation zerstört, wonach es unmöglich ist, jemals alle relevanten Aspekte eines Teilchens zu kennen. Dies muss aber nicht als Widerlegung von Kant Kausalprinzip interpretiert werden. Vielmehr sollte es als Absage an Reduktionismus gesehen werden: Was in der erfahrbaren Welt gilt, muss nicht zwingend im quantenphysikalischen Mikrokosmos gelten. Vielmehr werden bei genauer Betrachtung einige Analogien zwischen kantscher Erkenntnistheorie und Quantenphysik sichtbar. Das spricht dafür, dass wir eine andere Art, über Quantenereignisse zu sprechen, brauchen. In dieser Sprache sollte Kausalität weniger prominent, wenn auch nicht abwesend, sein. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Frage, wie aus quantenphysikalischen Phänomenen unser Denken entstehen kann, das strukturiert durch Kategorien wie Kausalität ist.

Es ist also möglich, Kantsche Kausalität und Quantenphysik kompatibel zu denken. Ihr Fokus unterscheidet sich, die Strukturen ähneln sich aber.

7 Erklärung zur wissenschaftlichen Redlichkeit

Ich bestätige hiermit, dass ich vertraut bin mit den Regelungen zum Plagiat der «Ordnung der Philosophisch-Historischen Fakultät der Universität Basel für das Bachelorstudium vom 25. Oktober 2018» (§21) bzw. der «Ordnung für das Masterstudium vom 25. Oktober 2018» (§25) und die Regeln der wissenschaftlichen Integrität gewissenhaft befolgt habe. Die vorliegende Arbeit ist ausserdem weder ganz noch teilweise an einer anderen Fakultät oder Universität zur Begutachtung eingereicht und/oder als Studienleistung, z.B. in Form von Kreditpunkten verbucht worden.

Basel, 18.09.2021



Benedikt Schmidt

Bibliographie

- De Pierris, Graciela und Michael Friedman (2018). “Kant and Hume on Causality”. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Hrsg. von Edward N. Zalta. Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Detel, Wolfgang, Hrsg. (2014). *Grundkurs Philosophie. Bd. 2: Metaphysik und Naturphilosophie / Wolfgang Detel*. 3., durchges. Aufl. Bd. 2. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 18469. Stuttgart: Reclam. 152 S. ISBN: 978-3-15-018469-1.
- Esfeld, Michael (2012). “Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung”. In: *Philosophie der Physik*. Erste Auflage. Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 2033. Berlin: Suhrkamp, S. 88–109. ISBN: 978-3-518-29633-2.
- Frisch, Mathias (2012). “Kausalität in der Physik”. In: *Philosophie der Physik*. Erste Auflage. Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 2033. Berlin: Suhrkamp, S. 411–426. ISBN: 978-3-518-29633-2.
- (2020). “Causation in Physics”. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Hrsg. von Edward N. Zalta. Fall 2020. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Heisenberg, Werner und Jürgen Busche (1979). *Quantentheorie und Philosophie: Vorlesungen u. Aufsätze*. Universal Bibliothek ; Nr. 9948. Stuttgart: Reclam. 125 S. ISBN: 978-3-15-009948-3.
- Held, Carsten (2012). “Das Messproblem der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung”. In: *Philosophie der Physik*. Erste Auflage. Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 2033. Berlin: Suhrkamp, S. 71–87. ISBN: 978-3-518-29633-2.

- Henderson, Leah (2020). “The Problem of Induction”. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Hrsg. von Edward N. Zalta. Spring 2020. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Hitchcock, Christopher und Miklós Rédei (2021). “Reichenbach’s Common Cause Principle”. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Hrsg. von Edward N. Zalta. Summer 2021. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Hübner, Johannes (2015). *Einführung in die theoretische Philosophie*. Stuttgart: Verlag J.B. Metzler. ISBN: 978-3-476-05427-2.
- Hume, David und Falk Wunderlich (2016). *An enquiry concerning human understanding: Englisch/Deutsch = Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand*. Übers. von Heribert Herring. [Nachdruck] 2021. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 18709. Ditzingen Stuttgart: Reclam. 504 S. ISBN: 978-3-15-018709-8.
- Kant, Immanuel, David Walford und Ralf Meerbote (1992). *Theoretical philosophy, 1755-1770*. OCLC: 899267110. ISBN: 978-0-511-84018-0. URL: <https://doi.org/10.1017/CB09780511840180> (besucht am 17. 09. 2021).
- Morris, William Edward und Charlotte R. Brown (2021). “David Hume”. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Hrsg. von Edward N. Zalta. Spring 2021. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Palmquist, Stephen R (23. Mai 2013). “Kantian Causality and Quantum Quarks: The Compatibility between Quantum Mechanics and Kant’s Phenomenal World”. In: *THEORIA. An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 28.2, S. 283–302. ISSN: 2171-679X, 0495-4548. DOI: 10.1387/theoria.1312. URL: <http://www.ehu.es/ojs/index.php/THEORIA/article/view/1312> (besucht am 17. 09. 2021).