

Seminar über philosophische Aspekte der Physik

Referat: *Moritz Schlick*, Naturgesetz und Kausalität

Referent: Jan Thies

Literatur: »Gesetz, Kausalität und Wahrscheinlichkeit«, Gerold & Co. Wien, S. 1 - 38¹

1. Einleitung

In seinem Aufsatz „Naturgesetz und Kausalität“ versucht Moritz Schlick zu klären, auf welche Art zwischen Ordnung und Unordnung zu differenzieren ist und was der Begriff der Kausalität bedeutet.

2. Kausalität

2.1 Hintergrund

Der Philosoph Moritz Schlick war in den 1920er und 1930er Jahren Angehöriger des sogenannten Wiener Kreises, zu dem u. a. auch G. Bergmann, F. Waismann oder R. Carnap gehörten. Gemein war dem Kreis die Kritik der Metaphysik, das Verständnis der Philosophie als Sprachanalyse und das Prinzip der Verifikation.

2.2 Kausalität

Was meinen wir, wenn wir den Begriff der Kausalität verwenden? Der Wissenschaftler spricht von Kausalität, wenn er Abhängigkeiten von Ereignissen meint. Wichtig ist es, in diesem Zusammenhang von „Ereignissen“ zu sprechen, denn die moderne Physik baut die vierdimensionale Wirklichkeit aus Ereignissen auf, während der Begriff „Dinge“ lediglich eine dreidimensionale Bedeutung hat. Die Abhängigkeit von Ereignissen meint jedoch nichts anderes, als dass eine Gesetzmäßigkeit zwischen ihnen besteht. Die Bedeutung des Kausalitätsprinzips ist, dass alles in der Welt gesetzmäßig geschieht. Dies ist gleichbedeutend mit der Begrifflichkeit des Determinismus.

¹ Zuerst veröffentlicht unter: *Moritz Schlick*, Gesammelte Aufsätze 1926-1936, Gerold & Co. Wien.

Für das Verständnis des Kausalprinzips müssen wir uns aber zunächst verdeutlichen, was wir mit „Abhängigkeiten“ meinen. Wann spricht man von Abhängigkeiten? Dazu sollte der Kausalitätsbegriff differenziert werden nach seiner Bedeutung und nach seiner Gültigkeit.

2.3 Bedeutung des Kausalitätsbegriffs

Ein Naturvorgang wird in der Physik dargestellt als „Verlauf von Werten bestimmter physikalischer Größen“ (ebd., S. 7). Um diesen Vorgang überhaupt messen zu können, müssen wir die Vergleichbarkeit von „Weltbezirken“ (ebd., S. 7) voraussetzen. Wir müssen wir sagen können, dass eine bestimmte Größe, beispielsweise „ x “, an einem Ort den Wert f_1 und an einem anderen Ort den Wert f_2 hat.

Für unsere Betrachtung dürfen wir voraussetzen, dass die Menge der gemessenen Werte bereits eine natürliche Ordnung besitzt, und zwar die Ordnung in Raum und Zeit. Jeder Wert nimmt eine ganz bestimmte Stelle in Raum und Zeit ein.

Welche Eigenschaft muß erfüllt sein, um von einem gesetzmäßigen Verlauf zu sprechen?

Diese Eigenschaft kann nichts anderes sein, als eine zeitartige Ordnung. Es muß ein Aufeinanderfolgen von Ereignissen geben, denn bei gleichzeitigen Ereignissen – d. h. bei einer raumartigen Ordnung – sprechen wir nicht von Kausalität, sondern von Koexistenz. Wir können festhalten, dass der Kausalitätsbegriff eine zeitartige Ordnung, welcher Art auch immer, der Dinge beinhaltet. Davon abzugrenzen ist das Chaos, die Unordnung, das gänzlich regellos ist.

Das führt uns zu der Frage nach der Bedeutung des Begriffs Ordnung. Wie ist es möglich, zwischen Ordnung und Unordnung zu unterscheiden?

Eine Möglichkeit wäre, den physikalischen Weg ein zu schlagen und mathematische Gesetzmäßigkeiten zu finden. Mathematische Formeln, die den Ablauf von Ereignissen beschreiben. Aber würde das reichen? Es ist möglich, für jede beliebige Verteilung von Werten eine mathematische Formel zu finden, die die Verteilung beschreibt. Wird aber jedwede Verteilung von Werten durch eine mathematische Formel beschrieben, so ist per Definition kein Chaos mehr möglich. Das Kriterium, eine Abgrenzung zwischen Ordnung und Unordnung allein durch das Finden einer mathematischen Formulierung zu treffen, reicht offenbar nicht, denn so würde jeder

Verteilung respektive jedes Ereignis als Ordnung gelten. Es gäbe keine Unordnung. Das kann noch nicht reichen!

Wir müssen also eine weitere Anforderung an das Charakteristikum der Ordnung finden. Der nächste Schritt wäre, wir stellen an die mathematische Funktion bestimmte Anforderung, damit sie eine Gesetzmäßigkeit beschreibt. Es wäre denkbar zu fordern, eine Gesetzmäßigkeit liegt genau dann vor, wenn die mathematische Funktion „einfach“ ist. Aber was heißt „einfach“? Heißt es, Zeitabhängigkeiten durch nur linear vorkommen? Oder heißt es, es dürfen keine Brüche auftauchen? Es ist offensichtlich, das damit „der Willkür Tür und Tor geöffnet“ (ebd., S. 10). Dies führt in eine Sackgasse, eine einwandfreie Trennung zwischen Ordnung und Unordnung können wir so nicht sicherstellen.

Schlick weist in seinem Aufsatz zwei Wege aus dieser Sackgasse. Ein Ausweg ist der Maxwellsche Ansatz zur Definition der Kausalität. Er forderte, dass eine mathematische Formel keine explizite Zeit- und Ortsabhängigkeit enthalten dürfe, wenn sie eine Gesetzmäßigkeit beschreiben soll. Diese Anforderung erfüllen unter anderem Gesetze wie das Gravitationsgesetz und die HEISENBERGsche Unschärferelation – die Liste ließe sich fortführen. Jedoch ist dieses Kriterium ein wenig problembehaftet. Wir haben zwar heute eine große Anzahl von mathematischen Funktionen, die allesamt das Maxwellsche Kriterium erfüllen und von uns gemeinhin als Naturgesetze verstanden werden, jedoch können wir uns mittels Gedankenexperimenten Fälle ausmalen, in denen mathematische Formeln entgegen dem Kriterium eine explizite Zeit- respektive Ortsabhängigkeit enthalten. So könnte man sich zum Beispiel eine zeitlich schwankende Änderung der Elementarladung vorstellen, diese wäre mit Hilfe einer expliziten Zeitabhängigkeit mathematisch beschreibbar, würde aber das Maxwellsche Kriterium nicht erfüllen – dennoch würden wir in diesem Fall nicht von Akausalität oder Chaos sprechen. Es ist offensichtlich, dass das Maxwellsche Kriterium nicht ausreichend ist, um zwischen Ordnung und Unordnung zu unterscheiden, es ist zu eng.

Vielleicht sollten wir die Anforderung nochmals überdenken. Im obigen Gedankenexperiment haben wir uns eine zeitlich schwankende Elementarladung vorgestellt und gesagt, dass eine mathematische Beschreibung möglich wäre. Diese Beschreibung aber könnte durchaus sehr kompliziert werden, was zu der Idee Anlaß geben könnte, Kausalität bzw. Gesetzmäßigkeit über den Einfachheitsbegriff zu definieren – und hier gelangen wir wieder zu einem Punkt zurück, den wir zu Beginn bereits angesprochen haben: ein Kriterium für Ordnung an die mathematische

Funktion zu stellen, bedeutet nichts anderes als Belieben. Wie läßt sich Einfachheit charakterisieren? Ist die Funktion $F=ma$ einfach? Ist das Gravitationsgesetz einfach? Oder die Schrödingergleichung?

Es zeigt sich, dass der hier gewählte Ansatz zur Differenzierung von Ordnung und Unordnung viel zu vage ist, um uns eine zufriedenstellende Antwort zu geben. Wenn wir keine zufriedenstellende Antwort erhalten können, ist jedoch möglicherweise die Fragestellung unangemessen oder irreführend?

Es sollte geklärt werden, was unter dem Kausalitätsprinzip zu verstehen ist. Wir können uns in einem Gedankenexperiment vorstellen, ein physikalisches System sei vollkommen determiniert und alle seine wesentlichen Zustandsgrößen seien durch Beobachtung festgelegt. Dann ist es möglich, zu jedem Zeitpunkt eine exakte Prophezeiung über die zukünftige Entwicklung des Systems zu machen und die Vergangenheit des Systems exakt zu beschreiben. In diesem Fall wäre das Kausalitätsprinzip unter allen denkbaren Zuständen erfüllt. Aber es hätte für uns keinerlei Erkenntniswert, es würde eine Tautologie darstellen, „es wäre zwecklos, [es] aufzustellen“ (ebd., S. 17). Wenn der Kausalsatz Inhalt haben soll, dann reicht es nicht, mathematische Funktionen zu finden, explizite Zeit- und Ortsabhängigkeiten zu verbieten oder die Einfachheit der Gleichungen zu fordern. Wir haben gesehen, dass eine mathematische Formel allein nicht die Unterscheidung zwischen Ordnung und Unordnung liefern kann und dass spezielle Anforderungen an die Formel wie das Verbot von expliziten Zeit- und Ortsabhängigkeiten oder die Forderung der Einfachheit zu eng bzw. zu beliebig sind, als das sie von uns Nutzen sein könnten.

2.4 Gültigkeit des Kausalprinzips

Eine Abgrenzung zwischen Ordnung und Unordnung ist uns über die begriffliche Analyse des Kausalbegriffs bislang nicht gelungen. Wir haben ebenfalls gesehen, dass das Auffinden einer mathematischen Funktion zur Beschreibung einer beliebigen Werteverteilung keinen Raum für das Chaos lässt.

Wir haben unter 2.2 gesehen, dass Kausalität nichts anderes ist, als die Abhängigkeit zwischen Ereignissen, konnten aber nicht weiter erklären, wann Ereignisse chaotisch sind und wann nicht.

Führen wir uns an dieser Stelle die Arbeitsweise eines Naturforschers vor Augen. Er versucht für bestimmte beobachtete Verläufe in der Welt eine Formel zu finden, die

ihm den Vorgang beschreibt. Ist diese Formel gefunden, versucht der Forscher, andere Vorgänge mit ihrer Hilfe zu beschreiben oder eine Vorhersage zu treffen. Gelingt dies mit der Formel nicht, so wird sie meistens verworfen. Nichts anderes machten die Physiker mit dem BOHRschen Atommodell.

Was der Naturforscher macht, ist nichts anderes, als die Verifikation. Er versucht zu ergründen, ob die gefundene Beschreibung – und diese kann jedweder Art sein, denn auch die Mathematik ist nur eine Sprache – zutreffend ist. Dies geschieht auf dem Wege der Vorhersage. Es wird versucht, mit einer gefundenen Gesetzmäßigkeit Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu treffen. Ist dies möglich, trifft die Voraussage ein, so spricht man von einer Verifikation.

2.5 Resümee

Das begriffliche Fassen des Kausalitätsbegriffs gelingt uns nur, wenn wir die Frage nach der Gültigkeit einer Gesetzmäßigkeit beantworten können. Erst wenn wir eine Verifikation durchführen können, dann liegt Kausalität vor. Aber gerade die Forderung nach einer Verifikation führt uns auf ein weiteres Problem, denn eine endgültige Verifikation bleibt uns verwehrt. Heute gefundene Kausalitäten können sich in 1.000 Jahren als falsch herausstellen, sie könnten heute lediglich zufällig die Wirklichkeit beschreiben. Wir entnehmen daraus, dass eine Kausalbehauptung streng genommen keine Aussage darstellt, sondern vielmehr eine „Anweisung zur Bildung von Aussagen“ (ebd., S. 23) ist, wie es Ludwig WITTGENSTEIN bereits formuliert hat.

Das paradox anmutende an diesem Gedanken ist, dass das Kausalitätsprinzip selbst nur eine Anweisung ist, um Aussagen zu treffen, selbst aber gar keine Aussage ist! Das Kausalitätsprinzip ist vergleichbar mit den Regeln beim Schachspiel, bei denen sich auch die Frage nach Verifizierbar- respektive Falsifizierbarkeit nicht stellt. Diese Erkenntnis ist essentiell, gerade unter Berücksichtigung der Quantentheorie.

3. Kausalität auf dem Prüfstand: Quantenmechanik

Zu Beginn des letzten Jahrhunderts erblickte neben der Relativitätstheorie Albert Einsteins eine weitere fundamental neue Theorie das Licht der Welt: die Quantentheorie. Sie stellt mit der HEISENBERG'schen Unschärferelation neue Anforderungen an das Kausalitätsprinzip. BORN bzw. HEISENBERG selbst sahen mit der Unschärferelation das Kausalitätsprinzip als leer bzw. als ungültig an.

3.1 HEISENBERG'sche Unschärferelation (HUR)

Betrachten wir die Relation in ihrer mathematischen Form: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$. Mit anderen Worten: sie bedeutet nichts anderes, als dass die Unsicherheit in der Ortsbestimmung („ Δx “) multipliziert mit der Unsicherheit des Impulses („ Δp “) die Größenordnung vom Planckschen Wirkungsquantum hat.

Die Ergebnisse der bisherigen Analyse des Kausalitätsbegriffs zeigen uns, dass es sich bei der HEISENBERG'schen Unschärferelation um ein Naturgesetz handelt. Sie ist eine mathematische Funktion und sie erfüllt das Maxwellsche Kriterium, nach dem keine explizite Zeit- und Ortsabhängigkeit vorliegen darf. Zudem würden wir intuitiv davon sprechen, dass sie eine einfache Struktur besitzt.

3.2 Kausalitätsprinzip ungültig?

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels angesprochen, sahen namhafte Physiker mit der HUR das Kausalitätsprinzip als widerlegt an. BORN zum Beispiel legte dar, dass „die Unmöglichkeit, alle Daten eines Zustandes exakt zu messen, ... die Vorherbestimmung des weiteren Ablaufs [verhindert]. Dadurch verliert das Kausalitätsprinzip in seiner üblichen Fassung jeden Sinn“ (ebd., S. 27).

Gesetzt den Fall, es würde so sein, stellte das Kausalitätsprinzip eine Tautologie dar. Aber genau das wollten wir vermeiden, als wir über die Bedeutung des Kausalitätsbegriffs diskutiert (siehe Kapitel 2.3) haben. Wir haben gesehen, dass wir den Kausalitätsbegriff über seine Gültigkeit fassen müssen, dass er also „dem Richtersprüche der Erfahrung irgendwie“ (ebd., S. 33) unterliegen muss.

In diesem Falle liegt es nahe, zu dem Schluss zu kommen, zu dem HEISENBERG gelangte, als er sagte: „so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt“ (ebd., S 29). Diese Interpretation drängt sich fast auf, wenn wir über unsere früheren Betrachtungen reflektieren. Aber wir haben erkannt, dass Naturgesetze sich niemals endgültig verifizieren lassen, also nur Anweisungen darstellen, um weitere Aussagen zu treffen. Das Kausalitätsprinzip selber lässt sich nicht auf seine Richtigkeit überprüfen, sondern ist in Analogie zu einer Spielregel beim Schach zu verstehen. Wenn wir diese Tatsachen berücksichtigen, gelangen wir zu der Einsicht, dass das Kausalprinzip brauchbar oder unbrauchbar ist, zweckmäßig oder unzweckmäßig sein kann, aber nicht wahr oder falsch. Das Kausalprinzip ist, so zeigt es die moderne Physik, in der Quantenmechanik unzweckmäßig – in gewissen Grenzen. Von einer Ablehnung respektive der Leerheit des Determinismus oder des Kausalitätsprinzips durch neuere physikalische Theorien kann aber nicht die Rede sein, hier müssen wir BORN und HEISENBERG widersprechen.

4. Zusammenfassung

Unter Kausalität versteht Moritz Schlick die Abhängigkeit von Ereignissen, die Ausdruck findet in einem Gesetz. Die begriffliche Analyse der Kausalität schlägt jedoch fehl und ist nicht ohne die Betrachtung der Gültigkeit von Kausalaussagen möglich. Die vorgeschlagenen Anforderungen an die mathematischen Funktionen unterliegen der Willkür oder sind zu eng und können durch Gedankenexperimente widerlegt werden. Wichtig ist die Verifikation von Kausalaussagen, die aber nicht endgültig vorgenommen werden kann. So stellen Naturgesetze streng genommen keine Aussagen dar, sondern sind nur Anweisungen. Mit dem Kausalitätsprinzip verhält es sich ähnlich. Es mutet zwar paradox an, aber das Kausalitätsprinzip ist als brauchbar oder als unbrauchbar anzusehen, nicht jedoch als Gesetzmäßigkeit, die sich verifizieren lässt.