

Als Manuskript gedruckt

## Kausalität und Physik\*

Von Armin Uhlmann

Ich möchte in aller Kürze von einigen Seiten des Problems „Kausalität und Physik“ sprechen. Es ist klar, daß dies nur eine subjektiv bedingte Auswahl von Problemen dieser Art sein kann. Selbstverständlich ist ebenfalls, daß durch lediglich physikalische Betrachtungen keine einzige philosophische Frage voll entschieden werden kann.

Die Anwendungen der Kategorie „Kausalität“, die ich hier im Auge habe, sind im Prinzip sehr einfach, wenn auch ihre mathematische Formulierung, über die ich hier fast nichts sage, keineswegs trivial ist. Sie gehen von dem Zusammenhang zwischen der Struktur von Raum und Zeit einerseits und den kausalen Zusammenhängen andererseits aus.

Wenn wir zwei materielle Erscheinungen  $E_1$  und  $E_2$  betrachten, so wissen wir ohne eingehende Untersuchung ihrer Struktur und aller Erscheinungen, die „zwischen“ ihnen liegen, selbstverständlich nicht, ob etwa  $E_1$  Ursache von  $E_2$  ist. In gewissen Fällen ist es aber möglich, die Frage, ob zwischen  $E_1$  und  $E_2$  ein kausaler Zusammenhang überhaupt möglich ist, mit einem Minimum an Kenntnis über  $E_1$  und  $E_2$  zu beantworten.

Das einfachste Beispiel ist das folgende: Wenn das Ereignis  $E_1$  mit großer Genauigkeit am Ort  $x_1, y_1, z_1$  und z. Z.  $t_1$  stattfindet, das Ereignis  $E_2$  aber am Ort  $x_2, y_2, z_2$  und z. Z.  $t_2$ , so kann  $E_1$  nur dann Ursache von  $E_2$  sein, wenn ein Prozeß (also eine Art Kausalkette oder Kausalnetz) existiert, der die Wirkung von  $E_1$  auf  $E_2$  vermittelt. Diese Vermittlung geht mit einer gewissen Geschwindigkeit  $v$  vor sich, die noch örtlich und zeitlich variabel sein wird. Ist aber  $S$  der Abstand der beiden Raumpunkte, an denen  $E_1$  und  $E_2$  stattfindet, und  $T = t_2 - t_1$  das Zeitintervall zwischen ihnen, so ist jedenfalls  $v \geq S/T$ . Da aber in der Natur eine universelle Grenzgeschwindigkeit für alle realen Prozesse existiert, nämlich die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , ist  $v \leq c$ .

Damit also zwischen  $E_1$  und  $E_2$  ein kausaler Zusammenhang existieren kann, muß  $S/T < c$  sein. Ist diese Ungleichung nicht erfüllt, so sagen wir, die beiden Ereignisse liegen raumartig zueinander. Zwischen zwei Ereignissen in zueinander raumartiger Lage existiert also keinerlei kausaler Zusammenhang. Dieses Resultat kann auf Erscheinungen ausgedehnt werden, die nicht „punktförmig“ sind, sondern in einem endlichen Raum-Zeit-Bereich lokalisiert sind.

\* Vortrag auf dem Symposium „Determinismus und Gesetzmäßigkeit in der modernen Naturwissenschaft“ der Abteilung Philosophische Probleme der modernen Naturwissenschaft des Instituts für Philosophie der Humboldt-Universität (Berlin, 11. bis 13. Oktober 1962).

Die Anwendung dieser einfachen Überlegung in der Quantentheorie geschieht wie folgt: Wird an einem quantalen System die Messung einer physikalischen Größe  $A$  vorgenommen, so ändert das System in der Regel seinen Zustand. Im allgemeinen ist nämlich die physikalische Größe  $A$  ein Begriff, der kein exaktes Spiegelbild irgendeiner Eigenschaft des betreffenden Zustandes ist. Durch die Messung von  $A$  wird der Zustand nach gewissen statistischen Regeln so in einen neuen Zustand überführt, daß für den entstehenden Zustand  $A$  eine exakte Abbildung einer dem neuen Zustand zukommenden Eigenschaft ist. Wenn wir nun zwei Observable  $A$  und  $B$  betrachten, so wird in der Regel das Ergebnis der Messung von  $A$  und  $B$  von deren Reihenfolge abhängen. Sie werden, wie man sagt, nicht gleichzeitig meßbar sein; denn dann gibt es sicherlich keinen Meßapparat, der  $A$  und  $B$  gleichzeitig zu messen imstande wäre und umgekehrt.

Betrachten wir nun die Messung von  $A$  als Ursache einer Veränderung des Zustandes: Die Messung erfolge in einem gewissen Raum-Zeit-Gebiet I, d. h. in einem gewissen Raumbereich während eines bestimmten Zeitintervalls. Analog sei die Messung von  $B$  im Raum-Zeit-Gebiet II möglich. Wenn der Fall vorliegt, daß die beiden Gebiete I und II raumartig zueinander liegen, dann kann die von der Messung  $A$  ausgehende Störung, die den Zustand des Systems verändert, das Gebiet II gar nicht erreichen. Eine Messung  $A$  kann also keinen Einfluß auf das Resultat der Messung von  $B$  haben und umgekehrt, d. h.  $A$  und  $B$  sind gleichzeitig meßbare Eigenschaften. Hieraus ergeben sich wichtige Schlußfolgerungen für die mathematische Struktur der relativistischen Quantentheorie.

Dem eben genannten Beispiel ließen sich eine Reihe weiterer aus der klassischen Physik bzw. der Informationstheorie kommender Probleme zufügen, bei denen das gleiche Prinzip Anwendung findet: Damit zwischen zwei Ereignissen eine kausale Beziehung existiert, ist es notwendig (wenn auch nicht hinreichend), daß sie eine bestimmte raum-zeitliche Lage zueinander einnehmen. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so gibt es zwischen ihnen keinen kausalen Zusammenhang.

Nachdem wir nun den Fall betrachtet haben, daß es zwischen gewissen Ereignissen oder Ereigniskomplexen keinen kausalen Zusammenhang gibt, wenden wir uns dem entgegengesetzten Fall zu.

Am einfachsten liegen die Dinge in der klassischen Mechanik. Sind die in und an einem mechanischen System wirkenden Kräfte während der betrachteten Zeitdauer hinreichend bekannt, so determiniert der Zu-

stand des Systems an einem gegebenen Zeitpunkt den Zustand desselben Systems zu jeder anderen in diesem Zeitbereich liegenden Zeit, d. h. die Kette der Zustände, die das System im Laufe seiner zeitlichen Veränderung realisiert, ist eindeutig durch die wirkenden Kräfte (das Kraftgesetz) bestimmt, determiniert. Dabei können wir unter „Zustand eines Systems“ die Gesamtheit seiner qualitativen und quantitativen Eigenschaften zum fraglichen Zeitpunkt verstehen. Aus dieser objektiven Gesetzmäßigkeit leitet sich die Sprechweise ab, daß wir die Veränderung des Systems vorhersagen können. Die Vorhersagbarkeit ist eine abgeleitete, gewissermaßen sekundäre Folge der objektiv gegebenen Determination.

Bekanntlich führt dieses Prinzip in die Irre, wenn man es auf nicht genau genug begrenzte bzw. nicht wohldefinierte Systeme (z. B. Weltall) anwendet („Laplacescher Dämon“). Aber dies schließt nicht aus, daß hier eine fundamentale Gesetzmäßigkeit vorliegt. Das zeigt sich auch hier in der Quantentechnik. Wenn wir als Zustand hier ebenso die Gesamtheit der objektiven, real vorhandenen Eigenschaften eines quantenmechanischen Systems verstehen, so werden diese Eigenschaften nach Focks These von den realen Quantenzuständen alle in der Struktur der Wellenfunktion (allgemein des Zustandsvektors) begründet sein. Die Veränderung der Wellenfunktion (des Zustandsvektors) unterliegt aber einer der klassischen Mechanik genau analogen Determination: Die verschiedenen Zustandsvektoren, die die Struktur des quantalen Systems zu unterschiedlichen Zeiten widerspiegeln, sind durch die allgemeine Systemstruktur und durch den Zustand zu irgendeiner einzigen Zeit vollkommen bestimmt.

Damit ist aber noch kein Abschluß erreicht. Die Diskussion um die strenge Begründung der relativistischen Quantenfeldtheorie führte Haag vor etwa 5 bis 6 Jahren zu einem Kausalitäts- bzw. Determinismusaxiom, das als genaue Verallgemeinerung des eben beschriebenen Determinismus anzusehen ist. Wir wollen es (etwas vereinfacht) darlegen.

In der folgenden Skizze (Raum-Zeit-Diagramm) sind zwei Raum-Zeit-Bereiche I und II herausgegriffen, die in einer bestimmten Relation zueinander stehen.

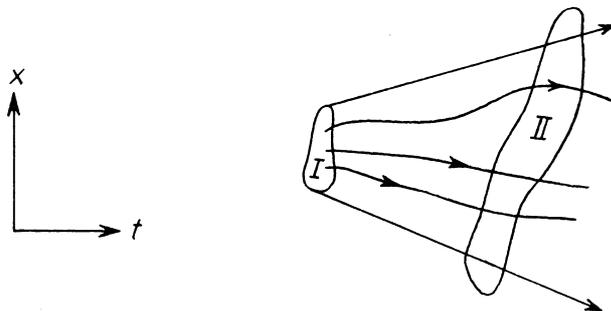


Abb. 1

Weiter sehen wir einige Kurven, die von I ausgehen. Sie sollen hier repräsentativ für alle Wege  $x = x(t)$  stehen, die von I ausgehen und längs denen, auf Grund ihrer Beschaffenheit, Wirkungen von I weggetragen werden könnten. Es sind also alle diejenigen Wege, die in I beginnen und für die  $v = dx/dt \leq c$  ( $c$  = Lichtgeschwindigkeit) ist. Das Gebiet II hat die Besonderheit,

daß alle solcherart von I ausgehenden Wege das Gebiet II schneiden.

Was werden wir erwarten? Was auch immer im Raum-Zeit-Gebiet I geschieht, die Wirkungen dieser Ereignisse sollten im Gebiet II ihren Niederschlag finden. Nichts sollte in I geschehen können, ohne eine Wirkung in der Zukunft und speziell im Gebiet II zu haben. Wir müßten bei einer genaueren Analyse der Ereignisse des Gebiets II auf alles Geschehene im Gebiet I rückschließen können.

Ist das alles möglich? Unter der Voraussetzung, daß „zwischen“ I und II keine Störung erfolgt, entspricht diese Ansicht den uns bekannten Tatsachen. Das Haagsche Axiom sagt etwa folgendes aus: Wir betrachten die Menge  $R_{II}$  aller Operatoren, die im Sinne der Quantentheorie beobachtbaren Größen zugeordnet und überdies im Gebiet II lokalisierbar sind. Eine physikalische Größe A, zu deren Messung nur das Raum-Zeit-Gebiet II notwendig ist, heiße dabei „im Gebiet II lokalisierbar“. Ist jetzt  $A'$  eine physikalische Größe, die im Gebiet I lokalisierbar ist, so fordert das Axiom, daß der zu  $A'$  gehörende Operator zu  $R_{II}$  gehört.

Kurz: Jede Beobachtung, die im Gebiet I gemacht werden kann, kann auch in II gemacht werden. Die Eigenschaften des Systems im Gebiet I sind sämtlich in den Eigenschaften des Systems im Gebiet II gleichsam konserviert.

Auch die Umkehrung gilt. Ist III ein Raum-Zeit-Gebiet, das wie folgt liegt:

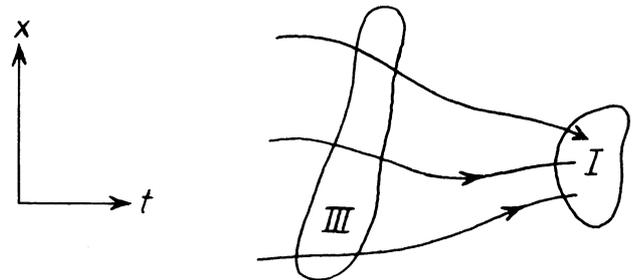


Abb. 2

III werde also von allen Wegen geschnitten, längs denen Wirkungen auf das Gebiet I übertragen werden könnten.

Das gilt, grob gesprochen: die Eigenschaften im Bereich II bestimmen die in I lokalisierbaren Eigenschaften vollständig. Für alles, was in I objektiv real vorhanden ist, müssen Ursachen in III zu finden sein.

Ich möchte, um bei diesen Formulierungen keinen Irrtum aufkommen zu lassen, ausdrücklich sagen, daß „Meßresultat der Größe A“ die Angabe der möglichen Werte und ihre statistische Verteilung beinhaltet und niemals den Ausgang einer einzigen Messung. Dies hat seinen Grund in der Tatsache, daß ein quantales System nicht eine Anzahl fest gegebener Eigenschaften besitzt, deren quantitative Bestimmung von Zustand zu Zustand variiert – dies entspräche gerade einem klassischen System –, sondern, daß für solche Systeme die

<sup>1</sup> Haags Axiom fordert die im folgenden genannte Beziehung für die diesen Bereich umfassende Klasse von Operatoren.

Eigenschaften vom Zustand abhängen, daß sie sich von Zustand zu Zustand qualitativ ändern. Wieso man trotz dieses Umstandes von wohldefinierten Quantensystemen sprechen kann, kann hier allerdings nicht mehr erörtert werden.

Zusammenfassung: Wir haben gesehen, wie das Kausalitätsprinzip in der Physik benutzt wird, um entweder die kausale Unabhängigkeit oder die totale Determination sehr allgemeiner physikalischer Strukturen zu postulieren, wenn sich diese in geeigneter Weise in ihrer Raum-Zeit-Lage unterscheiden.

Es versteht sich von selbst, daß vom Standpunkt der hier dargelegten Betrachtung solche Patentlösungen, wie die allgemeine Postulierung des zeitlichen Zusammenfallens von Ursache und Wirkung, abwegig sind. Für die dynamische Auffassung der Bewegung von der Ursache zur Wirkung ist jedenfalls nicht nur der erste Teil der schönen *Feuerbach*-These wahr: „Die Philosophen haben die Welt nur verschieden interpretiert, es gilt aber, sie zu verändern.“ (Eingegangen: 14. 12. 1962)

Verfasser: *Uhlmann, Armin*, Prof., Dr. rer. nat.,  
Institut für theoretische Physik der Karl-Marx-  
Universität Leipzig, Leipzig C 1, Linnéstr. 5.