

Das Kausalproblem in der gegenwärtigen Physik.

Von Prof. Dr. HANS REICHENBACH, Berlin.

(Eingeg. 25. März 1929.)

Der Gedanke, daß die strenge Geltung des Kausalgesetzes in der Physik einmal erschüttert werden würde, ist nicht so neu, wie es demjenigen scheinen mag, der bei Gelegenheit der gegenwärtigen Erörterungen zur Quantenmechanik zum erstenmal von diesen Dingen hört. Vielmehr ist seit der statistischen Begründung des zweiten Wärmesatzes wiederholt der Gedanke ausgesprochen worden, daß es möglicherweise einmal das Schicksal aller strengen Naturgesetze sein würde, auf eine bloß statistische Geltung beschränkt zu werden, daß also die von uns beobachtete Regelmäßigkeit der Natur im Großen nicht ins Kleine übertragen werden könne, und sich der genaueren Betrachtung als die Durchschnittsgesetzmäßigkeit eines molekularen Chaos enthüllt. Die Meinungen hierüber gingen hin und her; die einen verfochten, besonders im Anschluß an die Philosophie Kants, den Gedanken, daß eine derartige Vorstellung unzulässig sei, daß an der Geltung des strengen Kausalprinzips im Kleinen unter gar keinen Umständen gezweifelt werden dürfe, während die anderen darauf hinwiesen, daß wir hinreichend genaue Kenntnisse über das molekulare Geschehen im einzelnen nicht besitzen, und ein Analogieschluß vom Großen aufs Kleine nicht unbedingt verpflichtend sei. Eine dritte Auffassung endlich hielt die Frage für grundsätzlich unentscheidbar: nach ihr würde nur eine direkte Beobachtung molekularer Vorgänge den Entscheid liefern können, während uns Menschen in Wirklichkeit immer nur ein Erschließen molekularen Geschehens aus makroskopischen Beobachtungen möglich ist.

Das Problem wurde jedoch zunächst von physikalischer Seite nicht weiter verfolgt, da es nicht unmittelbar in den Interessenkreis physikalischer Problemstellungen fiel. Es waren philosophisch gerichtete Untersuchungen, die diese Frage zunächst weiterführten, und zwar gingen diese von einer Analyse des Wahrscheinlichkeitsbegriffs aus. Dieser Begriff war in der vorhergehenden erkenntnistheoretischen Diskussion niemals in seiner zentralen Bedeutung erkannt worden. Man hatte ihn mehr oder weniger mit der menschlichen Unvollkommenheit in Parallele gesetzt, also in der bloß wahrscheinlichen Geltung von Naturaussagen einen Ausfluß menschlicher Unwissenheit gesehen, die ein ideales Erkenntnisvermögen vermeiden könnte. Dazu schien besonders das Auftreten des Wahrscheinlichkeitsbegriffs in seinem eigentlichen Heimatgebiet, in den Glücksspielen, Grund zu bieten. Daß etwa beim Würfelspiel jeder einzelne Wurf durch seine Anfangsbedingungen, also Anfangslage, Stoßkraft des Spielers usw., völlig streng bestimmt sei, daran wurde kaum ernstlich gezweifelt; wenn wir uns trotzdem damit begnügen, an Stelle einer genauen Vorausberechnung einen Wahrscheinlichkeitsansatz zu machen, und jede Würfelseite gleich wahrscheinlich nennen, obwohl nur eine einzige grundsätzlich vorausbestimmte Seite auftreten wird, so erscheint dies lediglich als eine Ausflucht menschlicher Unwissenheit, dadurch bedingt, daß eine genaue Untersuchung der Anfangsbedingungen unserer Experi-

mentiergenauigkeit verschlossen bleibt. Laplace hat diesem Gedanken ein klassisches Bild geschaffen in seiner Vorstellung einer übermenschlichen Intelligenz, die den Ablauf eines Glücksspiels in genau derselben Weise vorausberechnen würde, wie die Astronomen den Lauf der Planeten vorausberechnen. Man nennt diese Auffassung die subjektive Wahrscheinlichkeitstheorie; sie führt zum Determinismus, zu der Lehre also, daß alles Naturgeschehen nach lückenlosen Gesetzen verläuft und alle Unsicherheit der Vorausberechnung nur aus menschlichem Unvermögen entspringt.

Die philosophischen Kritiker des Wahrscheinlichkeitsbegriffs — es handelt sich hier vor allen Dingen um Arbeiten von J. v. Kries, E. Zilsel und dem Verfasser¹⁾ — haben dagegen eingewandt, daß eine subjektive Theorie niemals die objektive Geltung der Wahrscheinlichkeitsansätze für die Wirklichkeit zu rechtfertigen vermöge, wie sie sich in den Häufigkeitsgesetzen der Statistik ausdrückt. Es ist in der Tat nicht einzusehen, warum zum Beispiel beim Würfelspiel unter 600 Würfen jede Würfelseite in nahezu 100 Fällen darankommt, wenn die Gleichwahrscheinlichkeit der Würfelseiten nur menschlicher Unkenntnis entspricht; man kann sich nicht vorstellen, daß die Natur in derartig weitgehendem Maße auf menschliches Unvermögen Rücksicht nimmt. Dieser Einwand ist entscheidend gegen die subjektive Wahrscheinlichkeitstheorie, und es wurde deshalb eine objektive Wahrscheinlichkeitstheorie begründet, welche versucht, die Geltung der Wahrscheinlichkeitsgesetze in gleichem Sinne als eine objektive Tatsache des Naturgeschehens hinzustellen, wie sie die Geltung der Kausalgesetze bedeutet. Danach bedeutet die Regelmäßigkeit statistischer Vorgänge, wie z. B. der Molekül-Gesamtheiten, einen selbständigen Grundzug des Naturgeschehens, dessen Gesetze zu erfassen ebenso Aufgabe der Naturwissenschaft ist, wie dies für die Kausalgesetze gilt. Auch erscheint es danach sinnlos, in der Benutzung statistischer Gesetze etwas bloß Vorläufiges zu sehen; auch der Laplace-sche Übermensch würde — so hat in den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts übrigens bereits der französische Mathematiker Cournot bemerkt — auf die Benutzung der statistischen Gesetze nicht verzichten, sondern bei seiner genauen Berechnung sämtlicher einzelnen Würfe des Würfels zum Schlusse auch wieder herausbekommen, daß durchschnittlich jede Seite gleich oft darankommt.

Die Vereinigung dieses objektiven Wahrscheinlichkeitsbegriffs mit dem Kausalbegriff ist dann vom Verfasser vollzogen worden. Danach muß die Behauptung der Kausalität in wesentlich vorsichtigerer Weise formuliert werden, als es bisher geschah. Es ist nicht so, daß wir strenge Gesetze unmittelbar in der Natur finden; vielmehr ist jede einzelne Naturaussage nur mit einer beschränkten Genauigkeit, also nur mit einem

¹⁾ Die Literatur ist in dem Artikel „Ziele und Wege der physikalischen Erkenntnis“ des Verfassers im Handbuch der Physik, Bd. IV, Ziffer 22, Verlag Springer, Berlin 1929, ausführlich zitiert.

Wahrscheinlichkeitsanspruch zu machen, und an Stelle der Behauptung von der strengen gesetzlichen Bestimmtheit des Geschehens tritt eine bescheidenere Aussage, welche sich auf die Steigerungsfähigkeit der Genauigkeit bezieht. Der approximative Charakter aller Naturerkenntnis wird also grundsätzlich in den Vordergrund gestellt, und die Kausalbehauptung wird in eine Limesaussage verwandelt, die nur durch eine Beschreibung des Konvergenzvorgangs erschöpfend präzisiert werden kann.

Wie haben wir den Konvergenzvorgang zu formulieren? Der bisher üblichen Kausalauffassung der klassischen Physik entspricht die Konvergenzaussage: zu jeder erreichbaren Genauigkeitsstufe gibt es eine höhere derart, daß die Wahrscheinlichkeit der Vorausberechnung beliebig nahe an 1 gesteigert werden kann. Dies ist in der Tat alles, was die klassische Physik behaupten kann; wenn man an Stelle der Konvergenzaussage in abgekürzter Sprechweise den Limes selbst benutzt und davon spricht, daß im objektiven Naturgeschehen alles mit Gewißheit auseinander hervorgehe, so setzt man sich mit dieser Idealisierung der Gefahr aus, gewisse Fehlschlüsse über den Zusammenhang der Natur zu machen. Es sind ähnliche Fehlschlüsse, wie sie etwa bei dem Begriff des Differentialquotienten gemacht werden, wenn man diesen als das Verhältnis zweier unendlich kleiner Größen definiert. Insbesondere entstehen Fehler für die Auffassung des Zeitbegriffs, der ja mit dem Kausalbegriff aufs engste zusammenhängt; doch kann darauf an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Man muß aber die Frage aufwerfen, ob die genannte Konvergenzaussage für das Verhalten der Natur überhaupt zutreffend ist. Es könnte nämlich sein, daß die Steigerung in der Wahrscheinlichkeit der Vorausberechnung zwar sehr weit, aber nicht beliebig weit getrieben werden kann, daß also für die Wahrscheinlichkeit der Vorausberechnung eine Grenze auftritt, die vor der Gewißheit liegt. Gerade hieran sieht man die Notwendigkeit einer scharfen Formulierung des Konvergenzvorgangs; für die idealisierte Aussage wird die Möglichkeit einer solchen Erweiterung kausaler Bestimmtheit von vornherein abgeschnitten. Dies ist eine große Gefahr, denn es muß als eine grundsätzlich empirische Frage angesehen werden, welcher Art der Konvergenzvorgang ist. Mit Rücksicht auf diese Möglichkeit ist vom Verfasser²⁾ eine Theorie des Kausalzusammenhangs entwickelt worden, in welcher der Determinismus aufgegeben worden ist und durch einen Wahrscheinlichkeitszusammenhang der Welt ersetzt wird; das Geschehen in der Welt ist danach nicht mehr einem abschneurrenden Uhrwerk vergleichbar, sondern viel eher einem ständigen Würfelspiel verwandt, derart, daß jeder Schritt des Geschehens einen neuen Wurf bedeutet.

Es ist nun von großer Bedeutung, daß diese ursprünglich aus philosophischen Untersuchungen hervorgegangene Konzeption in der neuesten Physik ihre Realisierung findet, denn man muß die neuerdings von Heisenberg und Bohr begründete sogenannte Ungenauigkeitsrelation als eine Ausfüllung des geschilderten begrifflichen Rahmens ansehen, wie dies neuerdings auch von Born³⁾ erkannt worden ist. Wir wollen auf den hier in Frage stehenden physikalischen

²⁾ Die Kausalstruktur der Welt und der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft, Ber. d. Bayer. Akad. math.-phys. Kl. 1925, S. 133.

³⁾ Naturwiss. 17, 117 [1929].

schen Sachverhalt kurz eingehen. Die Probleme, um die es sich hier handelt, sind erwachsen aus der sogenannten Quantenmechanik. Die Schwierigkeiten und Widersprüche, welche die Bohrsche Theorie des Atoms trotz ihrer großen Erfolge mit sich gebracht hatte, führten zu zwei unabhängig voneinander entstandenen neuen Theorien des Atominnern. In der auf Heisenberg zurückgehenden und von ihm in Gemeinschaft mit Born und Jordan entwickelten Matrizenmechanik wurde ein mathematischer Apparat geschaffen, welcher die Gesetzmäßigkeiten des Atomaufbaus unter Verzicht auf ein Modell, auf ein anschauliches Bild also, zu erfassen vermochte. Der zweite, von Schrödinger gefundene Weg, die sogenannte Wellenmechanik, versuchte dagegen, das Innere des Atoms durch Wellenvorgänge zu beschreiben, und gelangte damit ebenfalls zu Gesetzmäßigkeiten, die mit den empirischen Befunden hervorragend übereinstimmten. Merkwürdigerweise jedoch konntedie Deutung, welche Schrödinger ursprünglich seinem Ansatz gab, nicht aufrechterhalten werden. Er hatte an Stelle des den Kern umkreisenden punktförmigen Elektrons die elektrische Ladung auf ein größeres Raumgebiet in der Umgebung des Kerns verteilt gedacht und glaubte, daß wellenförmige Schwingungen dieser elektrischen Wolke das Wesen des Atominnern ausmachten⁴⁾). Diese Vorstellung stieß auf Schwierigkeiten bei der Ausdehnung auf Atome mit mehreren Elektronen, also auf alle Elemente vom Wasserstoff aufwärts, weil sich diese Wellenvorgänge nicht im dreidimensionalen Raum, sondern in höherdimensionalen Parameterräumen abspielen sollten. Da sich trotz dieser begrifflichen Schwierigkeiten die Schrödingerischen Formeln hervorragend bewährten, wurde von Born eine neue Deutung der Schrödingerischen Wellenvorgänge gegeben: danach betreffen diese nicht Schwankungen der elektrischen Dichte, sondern Schwankungen einer Wahrscheinlichkeit. Es ist sehr merkwürdig, wie hier die Schrödingerische Funktion ψ (bzw. die aus ihr abgeleitete Größe $\psi \cdot \bar{\psi}$), die ursprünglich einem realen Ding, einer elektrischen Dichte, zugeordnet wurde, jetzt zur quantitativen Erfassung eines begrifflichen Gebildes, einer Wahrscheinlichkeit, verwandt wird; das hierin zum Ausdruck kommende Herantasten an die Naturzusammenhänge, das Experimentieren mit Begriffen sozusagen, ist charakteristisch für die gegenwärtige Arbeitsweise der Physik. Nach Born soll also das Elektron seine körnchenartige Natur behalten, und nur die Wahrscheinlichkeit, mit der es einen Ort in der Umgebung des Kerns erreicht, wird durch die Schrödingerische Wellenfunktion dargestellt. Die neuen Wellengesetze erscheinen also mit einemmal als statistische Gesetze; und so ist der Begriff des statistischen Gesetzes, wie man ihn vorher, in der kinetischen Theorie der Materie, nur für Makrovorgänge benutzte, plötzlich in die Mikrovorgänge eingedrungen.

Bedeutet diese Tatsache zwar bereits einen Schritt vom kausalen zum statistischen Weltbild, eben weil der Mikrovorgang selbst als statistischer aufgefaßt wird, so bliebe hier grundsätzlich zunächst doch wieder der gleiche Ausweg offen, welcher in der Thermodynamik benutzt wurde. Die statistische Gesetzmäßigkeit des Atominnern könnte ein Provisorium sein und in späterer Zeit einmal durch strenge Gesetzmäßigkeit ersetzt werden. Das könnte sein; aber die oben gegebenen Erörterungen zum Kausalproblem lehren uns, daß dies nicht der Fall sein muß. Es ist vielmehr durchaus denkbar, daß der Steigerung der Wahrschein-

⁴⁾ Ztschr. angew. Chem. 41, 351 [1928].

lichkeit im Kleinen Grenzen gezogen sind, die vor der Gewißheit liegen. Freilich würde man das nicht behaupten dürfen, wenn man weiter keinen Anhaltspunkt hätte als das bisherige Fehlen einer genauen Theorie des Atominnern. Das Entscheidende ist aber gerade, daß in der Heisenberg'schen Matrizenmechanik nicht aus solchen negativen Gründen geschlossen wird, daß vielmehr positive Gründe für die Existenz einer Genauigkeitsgrenze im Kleinen angeführt werden.

Diese Gründe hängen mit den Erscheinungen zusammen, welche bei dem Zusammentreffen von Lichtwellen und Elektronen eintreten. Es ist ja bekannt, daß Lichtwellen und Elektronen ähnlich wie Massenteilchen zusammenstoßen und dabei Rückstoßerscheinungen auftreten, in welchen sich Geschwindigkeit des Elektrons und Frequenz des Lichtes ändern (Compton-Effekt). Da nun jede Ortsbestimmung eines Elektrons nur erfolgen kann, wenn das Elektron „gesehen“, also mit Lichtwellen bestrahlt wird, so wird jede Beobachtung des Elektrons von Stoßerscheinungen begleitet sein. Heisenberg erkannte, daß deshalb der folgende Zusammenhang gilt: Wählt man zur Beobachtung kurzwelliges Licht, so ist zwar die Ortsbestimmung genau, aber wegen des auftretenden starken Rückstoßes die Bestimmung des Impulses entsprechend ungenau; wählt man dagegen langwelliges Licht, so wird zwar die Impulsbestimmung genau, aber die Ortsbestimmung wegen der auftretenden Beugungerscheinungen entsprechend ungenau. Heisenberg formulierte diesen Gedanken als sogenannte Ungenauigkeitsrelation: man kann nur entweder den Ort oder den Impuls eines Teilchens mit beliebiger Genauigkeit bestimmen. Der Steigerung der Meßgenauigkeit sind also Grenzen gesetzt, die Genauigkeit im Kleinen bleibt auf Zellen im Parameterraum von der Größenordnung der Planck'schen Konstante h beschränkt, und der Konvergenzvorgang der kausalen Analyse findet eine Grenze, die vor der Gewißheit liegt.

Damit ist also der Fall eingetreten, den die erkenntnistheoretische Analyse des Kausalbegriffs als möglich vorausgesehen hatte. Die empirische Forschung lehrt, daß die erkenntnistheoretisch als möglich erkannten Grenzen kausaler Bestimmtheit in der Wirklichkeit vorliegen. Die Entscheidung zwischen kausalem und statistischem Weltbild ist zugunsten der Statistik ge-

fallen. Man kann nicht sagen, daß es ein Mangel an Kenntnissen wäre, der zu solchem Verzicht auf strenge Kausalität führt; es ist vielmehr ein sehr positives Wissen, die in der Quantenmechanik konzentrierten mathematischen und empirischen Zusammenhänge, die zu dieser Entscheidung geführt haben. Natürlich kann man nicht sagen, daß diese Entscheidung absoluten Charakter trüge; sie hat selbst nur empirischen Charakter, gilt also selbst nur mit Wahrscheinlichkeit. Darin liegt aber kein Widerspruch. Es ist eine logisch zulässige Aussage, wenn man behauptet: es gilt mit großer Wahrscheinlichkeit, daß strenge Kausalität im Kleinen nicht gilt.

Hat diese Entscheidung für unser theoretisches Wissen von der Natur, für unser erkenntnistheoretisches Weltbild die allergrößte Bedeutung, so muß man sich doch darüber klar sein, daß sie für unser praktisches Verhalten der Natur gegenüber so gut wie gar keine Konsequenzen besitzt. Denn nur die Vorgänge im Kleinen sind in ihrer Wahrscheinlichkeit an Grenzen gebunden, die eine Vorausbestimmung ernstlich unmöglich machen; Massenvorgänge dagegen — und das sind alle makroskopischen Vorgänge — erfolgen durch die Häufung der Einzelfälle mit so großer Wahrscheinlichkeit der Vorausberechnung, daß für sie die praktisch übrigbleibende Unsicherheit nicht größer ist als bei jedem andern Auftreten des Wahrscheinlichkeitsbegriffs auch. Wir wissen, daß jährlich eine bestimmte Zahl von Eisenbahnunfällen eintritt, und fahren trotzdem getrost mit der Bahn; derart kleine Wahrscheinlichkeiten vernachlässigen wir im Leben stets. Die Quantenmechanik vermag in das makroskopische Geschehen nicht mehr Unsicherheit hineinzutragen, als sie schon in der kinetischen Gastheorie vorlag. Sie zwingt uns nur zum Verzicht auf das Ideal, daß hinter der wahrscheinlichkeitsgesteuerten Welt der beobachtbaren Erscheinungen die strenge Welt kausalbestimmter, nie ganz zu erkennender objektiver Abläufe steht. Aber diese verschlossene strenge Welt hat uns nie etwas genutzt, und wir dürfen sie aufgeben wie einen Traum, der wohl unser Gefühlsleben, nicht aber den Zusammenhang unserer Wahrnehmungserlebnisse je beeinflußt hat. Auf diesen Zusammenhang aber kommt es letztlich für uns an, und in ihn münden alle erkenntnistheoretischen Probleme ein.

[A. 45.]

Neuere Fragen der chemischen Kinetik.

Von Dr. GERTRUD KORNFELD, Privatdozent an der Universität Berlin.

(Eingeg. 15. März 1929.)

Die Grundlagen der Theorie des Ablaufs chemischer Reaktionen in verdünnten Systemen sind auch heute noch die von Guldberg und Waage¹⁾ 1867 zuerst ausgesprochenen und von van 't Hoff²⁾ systematisch weiterentwickelten Vorstellungen: Entsprechend den Ergebnissen der kinetischen Gastheorie muß die Wahrscheinlichkeit für eine Reaktion zwischen zwei oder mehreren Stoffen der Zahl der Zusammenstöße der reagierenden Partikel und mithin ihrer Konzentration proportional sein.

Wenn man etwa die Bildung von Jodwasserstoff aus seinen Elementen betrachtet: $J_2 + H_2 = 2HJ$, so lautet die Formel, die die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Konzentration in jedem Augenblick darstellt:

$$\frac{dx}{dt} = k(a-x)(b-x).$$

¹⁾ Ostwalds Klassiker Nr. 104.

²⁾ Studien zur chemischen Dynamik, 1896.

Hierin bedeutet x die Konzentration des gebildeten Jodwasserstoffs zur Zeit t , dx/dt die Änderung dieser Konzentration in einem kleinen Zeitraum, a und b sind die Anfangskonzentrationen der reagierenden Gase, k ist eine Proportionalitätskonstante, die Konstante der Reaktionsgeschwindigkeit. Dieser Gleichung für bimolekulare Reaktionen analog ist die Gleichung für monomolekulare Reaktionen, etwa für den Zerfall des Stickstoffpentoxyds

$$\frac{dx}{dt} = k(a-x).$$

Das bedeutet, daß ein bestimmter Bruchteil des Gases in der Zeiteinheit zerfällt, daß also die absolute Konzentrationsänderung der jeweiligen Konzentration proportional ist. Die Gleichungen für tri- und höermolekulare Reaktionen enthalten entsprechend die Abhängigkeit von den Konzentrationen von drei und mehr Stoffen, doch gibt es nur wenige bekannte Fälle, für die sie gelten. Wird nun der Umsatz bei einer Reaktion messend