

46. Band. 1. Heft.

Beiträge zum Kausalproblem.

(5 Aufsätze.)

Von Dr. G. Kahl-Furthmann.

Einleitung.

Die vorliegende Aufsatzfolge hat die Aufgabe, einige Beiträge zur Klärung des Kausalproblems zu liefern. Das Interesse, das die Untersuchungen leitet, ist ein philosophisches. Da aber in neuerer und neuester Zeit im Lager der Physiker das Kausalproblem heiß umstritten worden ist, soll in diesen Aufsätzen auch dieser Kampf mit in Betracht gezogen werden. Die Philosophie muß auf die Ergebnisse der Forschungen auf anderen Gebieten Bezug nehmen und versuchen, sich mit ihnen auseinanderzusetzen. Die Tatsache liegt vor, daß bedeutende Physiker in neuester Zeit die Geltung des Kausalgesetzes angetastet, ja, daß sie in ihren Untersuchungen den Kausalgedanken völlig fallen gelassen haben. Die Philosophen müssen vor sich Rechenschaft ablegen, ob es denn bei solchen Verhältnissen überhaupt noch angängig ist, über die Begründung des Kausalprinzips zu diskutieren. Das Verhalten der Philosophen muß gerechtfertigt werden, und das kann nur durch eine Auseinandersetzung mit den Lehren der theoretischen Physiker, ihren Grundlagen und ihrer Bedeutung geschehen, durch die den Philosophen Mittel an die Hand gegeben werden können, sich gegen evtl. zu erwartende Einwürfe der Physiker zu schützen und die Wahrheit ihrer Lehren in einer Messung an anders lautenden Lehren zu beweisen. Bei dieser Gelegenheit aber muß prinzipiell zu der Gegnerschaft Stellung genommen werden, die heutigen Tages zwischen Philosophie und Naturwissenschaft besteht.

So hat der erste Aufsatz zunächst die Aufgabe, einige Lehren der Physiker, die die Geltung des Kausalgedankens antasten, darzustellen und auf ihre Kraft hin zu prüfen. Der zweite Aufsatz wird dann prinzipiell die zur Frage stehenden physikalischen Begriffe in ihrer Entwicklung darlegen, während der dritte Artikel den Unter-

schied zwischen philosophischem und physikalischem Erkenntnisziel ans Licht zu heben hat. Der vierte Aufsatz liefert Beiträge zur Lösung des Kausalproblems unter rein philosophischen Gesichtspunkten, und da das Resultat der allgemeinen Betrachtungen über die möglichen Methoden der Sicherung der Geltung des Kausalprinzips dazu führen wird, eine Methode vor allen anderen als die gesichertste darzustellen, und diese Methode von Joseph Geysers in seinen neuesten Arbeiten vertreten und ausgearbeitet worden ist, wird der letzte, fünfte Aufsatz die Aufgabe haben, diese Lehre Geysers über das Kausalprinzip nach den verschiedensten Seiten hin, von denen sie in neuester Zeit Angriffe erfahren hat, zu verteidigen.

I. Das Kausalproblem in der modernen Physik.

1. Während in neuester Zeit der Kampf um das Kausalprinzip mit besonderer Heftigkeit im Lager der vorzüglich metaphysisch und scholastisch orientierten Philosophen entbrannt ist, bei denen nicht die Geltung dieses Prinzips selbst, das die wichtigste Grundlage der aposteriorischen Gottesbeweise bildet, sondern nur die Art seiner Geltung und seiner Begründungsmöglichkeit heiß umstritten wird, sind im Lager der Physiker Theorien aufgetaucht und haben immer weitere Verbreitung gefunden, die den Geltungsbereich des Kausalgesetzes selbst angreifen, ja, die zu einer völligen Aufgabe dieses Gesetzes führen. Im allgemeinen ist auf diese Lehren von seiten der Philosophen kaum Bezug genommen worden. Es muß aber dennoch die Erkenntnis, welche Gründe es sind, die einen großen Teil der Physiker veranlassen, ein so bedeutsames Gesetz fallen zu lassen, als für die Philosophie notwendig und förderlich bezeichnet werden. Vor allen Dingen aber muß Klarheit darüber gewonnen werden, ob die von den Physikern vorgetragenen Gesichtspunkte auch auf die Stellungnahme der Philosophen zu dem vorliegenden Problem Einfluß zu nehmen vermögen.

In diesem ersten Artikel sei zunächst die Aufgabe gestellt, einiges von dem physikalischen Material, das bedeutende Physiker zur Aufgabe der Anerkennung des Kausalgesetzes führte, kurz referierend darzulegen, die auf Grund dieses Materials von den verschiedenen Physikern vorgetragenen Gründe und Gegen Gründe für und gegen die Aufgabe des Kausalgesetzes anzugeben und, soweit es schon möglich ist, vorläufig zu den Lehren der Physiker Stellung zu nehmen. Nachdem der erste Artikel somit nur eine vorläufige Arbeit erledigt hat, wird im folgenden zweiten Artikel grundsätzlich über das Wesen der physikalischen Kausalität, des physikalischen Gesetzes überhaupt und

über die damit verbundenen Begriffe der statistischen Gesetzmäßigkeit, der Wahrscheinlichkeit, des Zufalls und der Wahrscheinlichkeitsrechnung verhandelt, während der dritte Aufsatz die Bereiche der beiden Wissenschaften, Physik und Philosophie, in ihren unterschiedlichen Erkenntnisidealen einander gegenüberstellt und darzutun hat, inwieweit die Ergebnisse der physikalischen Forschungen, unter Rücksicht auf dieses verschiedene Ideal, überhaupt auf die Untersuchungen der Philosophie fördernd und hemmend Einfluß zu nehmen vermögen.

2. Die physikalische Forschung hat in den letzten Jahrzehnten unerhörte Fortschritte gemacht und vorher kaum geahnte Gebiete zu umfassen vermocht. Dabei ist die Ausdehnung ihres Forschungsbereiches vorzüglich in zwei Richtungen charakterisiert. Einmal haben sich auf Grund der Einsichten in die Möglichkeit nichteuklidischer Geometrien, die mit einem Krümmungsmaß arbeiten, das größer oder kleiner als 0 ist, die allgemeine und die spezielle Relativitätstheorie ausgebildet, und diejenigen mathematischen Formulierungen, die die kosmischen Verhältnisse auf Grund der euklidischen Geometrie bisher wiederzugeben hatten, haben sich zwar einerseits als gültig in dem Bereich der uns unmittelbar umgebenden Sphäre erwiesen, sind aber andererseits für die weiteren kosmischen Sphären durch Gleichungen ersetzt worden, die einen Raum mit einem gewissen von Null verschiedenen Krümmungsmaß voraussetzen.

Ferner ist es der Forschung gelungen, auf Grund immer feinerer und präziserer Untersuchungsmethoden immer tiefer in die Struktur der Materie einzudringen, und das, was in früheren Zeiten als ein materiell Letztes angesehen wurde, das Atom, wiederum als ein ungeheuer kompliziertes Gebilde herauszustellen, das gemäß dem Bohrschen Atommodell einen Kosmos im Kleinen darstellt, in dem negativ geladene Elektronen in rasender Schnelligkeit um einen positiven Kern rotieren, von dem sie in verschiedenen Quantenzuständen gebunden sind. Und während die Bewegungen und Sachverhalte der Elektronen im Atom die Physiker noch vor immer neue Fragen stellen, erahnt der Forscher bereits weitere zu erschließende Mikrowelten.

Die Eröffnung so unerhörter neuer Forschungsgebiete führte zu einer Revolution im Rahmen der Physik, als deren deutlichster Ausdruck die Aufgabe des Kausalgesetzes von einer Reihe bedeutendster Atomphysiker zu betrachten ist. Es sei im Folgenden gezeigt, welche Sachlagen zu diesem Wandel führten.

3. Indem man im Rahmen der Atomphysik seine Aufmerksamkeit auf die Bewegungsgesetze der Atome und Elektronen zu richten

sich bemühte, erkannte man, daß alles das, was bisher als streng kausales Geschehen betrachtet worden war, sich aus einer Fülle von Einzelvorgängen zusammensetzt, von denen jeder ein anderes Gepräge trägt als der Gesamtvorgang, eine Einsicht, die auch schon aus der Beobachtung von Molekularbewegungen gewonnen werden konnte.

Die Gesetze z. B., die den Gasdruck betreffen, und die sich in der bisherigen Erfahrung stets als streng allgemeingültig erwiesen hatten, zeigten sich als das Resultat der verschiedenartigsten Bewegungen unzähliger vieler kleiner Gasmoleküle, die alle durcheinander schwirren, um endlich dennoch zusammen ein streng umrissenes Gesamtergebnis ihrer Bewegungen zu ergeben. Dachte man sich nun die Gasmenge genügend klein, und zwar so klein, daß sich die Größe der von dem Gasdruck getroffenen Wand immer mehr der Größe eines einzelnen Gasmoleküls nähert, so zeigte sich, daß nunmehr der Druck des Gases nicht mehr als ein konstanter anzusprechen ist, vielmehr muß er ein schwankender sein, je nachdem ob ein oder mehrere Moleküle die Wandfläche treffen. Also das Gesetz des Gasdruckes gilt nicht mehr.

So zeigte sich nunmehr das, was früher streng kausal determiniert erschien, als das Resultat einer statistischen Durchschnittsgesetzlichkeit. Nachdem aber einmal an einzelnen Fällen der vorliegende Sachverhalt prinzipiell erkannt worden war, war es naheliegend, da alle physikalischen Vorgänge sich als zusammengesetzt aus den Vorgängen vieler kleinster Materieteilchen darlegen lassen, die am Einzelfall gewonnene Einsicht nunmehr auch zu verallgemeinern.

Aber man ging nicht nur so weit, wie aus dem oben Vorgelegenen notwendig zu folgen scheint, daß man von der Wahrscheinlichkeit sprach, daß alle Naturgesetze statistischen Charakter haben, wie Nernst es tut,¹⁾ der dennoch ein Arbeiten mit dem Kausalprinzip weiterhin für durchaus zulässig hält, wenn man sich nur bewußt ist, daß man damit den Boden der Erfahrung verläßt, und sich in das Gebiet des spekulativen Denkens begibt, sondern man verwarf mit Weyl „den Glauben an eine auf streng exakten Gesetzen beruhende geschlossene Kausalität der materiellen Natur“, da die Physik auf ihrem heutigen Standpunkt ihn nicht zu stützen vermag.²⁾

Die entscheidende Frage aber, die die Geltung des Kausalprinzips betreffen wird, ist nicht die, ob (wie ja zweifelsohne nachgewiesen ist,) die uns bekannten Gesetze statistische seien oder nicht, sondern die, ob die Vorgänge, die den statistischen makrokosmischen Vor-

¹⁾ W. Nernst, *Zum Gültigkeitsbereich der Naturgesetze* „Die Naturwissenschaften“. Berlin 1922. p. 494/5.

²⁾ Weyl, *Raum — Zeit — Materie*. Berlin 1923. 5. Aufl. p. 286/7.

gängen im Mikrokosmos zugrunde liegen, kausalen Charakter haben oder nicht. Erst wenn der Nachweis des zweiten Falles gelungen wäre, wäre, wie sich später näher zeigen wird, die Geltung des Kausalgesetzes vernichtet.

Dabei darf natürlich nicht verkannt werden, daß, falls in der Tat ein mikrokosmischer Vorgang, etwa die Bewegung eines Moleküls oder gar Atoms oder Elektrons sich als streng kausal nachweisbar darstellen sollte, einer späteren Forschung es vorbehalten bleiben könnte, auch diesen Vorgang als einen nur statistischen auf der Grundlage weiterer Vorgänge in weiteren Mikrowelten darzutun.

Offensichtlich aber ist mit dem Nachweis, daß die uns bekannten Gesetze statistischer Natur sind, über die Vorgänge im Mikrokosmos zunächst noch gar nichts ausgemacht, und daher erscheint es für den unbefangenen Beschauer überraschend, daß viele Physiker sogleich bereit waren, den Kausalgedanken, der sie zu allen Zeiten bisher in ihren Forschungen geleitet hatte, bei ihren Untersuchungen der Mikrowelten fallen zu lassen. So gehen Wien und Abraham mit der Annahme, daß die Naturgesetze für die einzelnen Atome vielleicht nicht mehr gelten, voran,¹⁾ und auch für Exner liegt diese Vermutung außerordentlich nahe. Gegen eine solche Auffassung aber erhebt sich vor allem als gewichtige Stimme die Max Plancks. Für diesen Forscher bedeutet die Annahme einer ausnahmslosen Kausalität die Vorbedingung für die wissenschaftliche Erkenntnis.²⁾ Nach ihm darf man sagen, „daß die Physik . . . auf allen ihren Gebieten die strenge Gültigkeit des Kausalgesetzes zugrunde legt“,³⁾ und somit nimmt Planck auch eine absolute Kausalität in mikrokosmischen Verhältnissen an,⁴⁾ ja, er hält sogar das Vorhandensein der allgemeinen mechanischen Gesetze im allerfeinsten Mikrokosmos für die Vorbedingung zur Ermöglichung der exakten Berechnungen der makrokosmischen Wahrscheinlichkeiten.⁵⁾ So stehen sich die Ansichten entgegengesetzt gegenüber. Offensichtlich ist es vom philosophischen Standpunkte aus zunächst naheliegend, denen Plancks zuzustimmen.

4. Welches aber sind die Gründe, die die betreffenden Physiker zur Aufgabe der Geltung des Kausalgesetzes veranlaßten?

¹⁾ Vgl. Exner, *Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften*. Wien 1919. p. 662.

²⁾ Max Planck, *Kausalgesetz und Willensfreiheit*. Berlin 1923. p. 40 u. 43.

³⁾ A. a. O. p. 34.

⁴⁾ A. a. O. p. 32—34.

⁵⁾ Max Planck, *Physikalische Rundblicke*. Leipzig 1922. *Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeit*. Rede, Berlin 1914. p. 97.

Die Vorgänge in der Realität, von denen man früher annahm, daß sie nach einer streng kausalen Gesetzmäßigkeit verlaufen, hatten keinerlei Veränderung erfahren. In derselben Weise wie bisher folgten sie den Gesetzen, deren Erfüllung der Kausalgedanke von ihnen erwartete, aber der Einblick in die komplizierten mikrokosmischen Vorgänge, die ihnen zugrunde liegen und die völlig willkürlich und zufällig erscheinen, legte den Gedanken nahe, daß das Resultat aller dieser Vorgänge nicht als streng determiniert, sondern nur als wahrscheinlich anzusprechen sei.

Untersuchungen nämlich, die man an allen Arten von Glücksspielen: Würfelspiel, Roulette u. a. angestellt hatte, bei denen die gegenseitige Unabhängigkeit der einzelnen Elementargeschehnisse von einander einwandfrei festgestellt werden konnte, hatten zu der Erkenntnis geführt, daß, wenn man nicht nur das Resultat eines Einzelgeschehens, sondern genügend große Reihen solcher Geschehnisse in Frage zog, sich das Ergebnis, je größer die Reihen wurden, um so mehr dem Resultat näherte, das durch die Wahrscheinlichkeitsberechnungen festgelegt war. So lag der Gedanke nahe, daß es sich bei den Vorgängen, die den makrokosmischen Geschehnissen im Mikrokosmos zugrunde liegen, um gleiche Vorgänge handele, wie im Glücksspiel, und da die Summe der einzelnen Vorgänge im physikalischen Geschehen immer eine sehr große ist, so erklärte sich mit Leichtigkeit, warum das physikalische Geschehen sich einer streng determinierten Gesetzmäßigkeit zu fügen schien, obgleich es in seinem innersten Wesen nur als der Ausdruck einer auf Wahrscheinlichkeit beruhenden Gesetzmäßigkeit zu betrachten sei.¹⁾

Dazu kam, daß ein wichtiger Satz der Physik, der zweite Hauptsatz der Wärmelehre oder das Entropiegesetz, der besagt, daß bei jedem mechanisch-thermischen Prozeß die Gesamtentropie der an dem Prozeß beteiligten Körper zunehme,²⁾ sich vom rein dynamischen Standpunkte aus nicht begreifen ließ. Boltzmann vollführte daher den entscheidenden Schritt, unter ausdrücklichem Verzicht auf eine dynamische Erklärung, das Entropiegesetz als ein rein statistisches zu proklamieren und damit den Begriff der Entropie auf den der Wahrscheinlichkeit zurückzuführen.³⁾

¹⁾ Inwiefern und ob überhaupt eine solche Gesetzmäßigkeit die kausale aufzuheben vermag, werden die weiteren Untersuchungen zeigen.

²⁾ Planck, *Physikalische Rundblicke*. p. 125.

³⁾ Planck, *Physikalische Rundblicke*. p. 21 u. 154; vgl. ferner Nernst a. a. O. p. 492 und die wenig überzeugenden Ausführungen Marbes gegen Boltzmann, *Die Gleichförmigkeit in der Welt*. I. München 1916. p. 389; ferner Haering, *Philosophie der Naturwissenschaft*. München 1923 p. 613 ff.

Vor allen Dingen aber sind es Untersuchungen, die die Vorgänge im Mikrokosmos selbst betreffen, die zu einer Aufgabe des Kausalprinzips geführt haben. Auf diese Vorgänge und ihre Ausdeutungen sei noch für kurze Zeit weiterhin die Aufmerksamkeit gerichtet.

Nach der neueren Auffassung von dem statistischen Charakter der Naturgesetzmäßigkeiten ist es nicht mehr absolut notwendig, daß ein wärmerer Körper an den ihn berührenden kälteren Körper Wärme abgibt, sondern es ist nur noch wahrscheinlich. Auf Grund dieser Tatsache hat Boltzmann Anordnungen und Geschwindigkeitszustände der Atome erdacht, wo das Gegenteil geschieht. Gegen die Konsequenz aber, daß solche Vorgänge auch in der Natur vorkommen könnten, wendet sich Planck mit aller Entschiedenheit. Eine Natur, in der der kältere Körper dem ihn berührenden wärmeren Körper Wärme abgeben würde, wäre nach Planck nicht mehr unsere Natur.¹⁾ Planck findet in der von Boltzmann selbst in die Gastheorie eingeführten Hypothese von der elementaren Unordnung diejenige Bedingung aufgezeigt, die einen solchen naturwidrigen Vorgang verhindert.

Dennoch aber zeigt Planck bei der Betrachtung mikrokosmischer Vorgänge, daß nicht unbedingt bei dem Zusammenstoß zweier Moleküle „dasjenige mit größerer lebendiger Kraft an Geschwindigkeit einbüßt, dasjenige mit geringerer lebendiger Kraft dagegen beschleunigt wird“, sondern er verweist auf die Möglichkeit, daß ein schnell bewegtes, von der Seite her quer gegen seine Bewegungsrichtung von einem langsamer sich bewegenden zweiten Molekül getroffenes Molekül an Geschwindigkeit weiterhin zunimmt, während das langsamere weiterhin an Geschwindigkeit abnehmen muß.²⁾

Solche Betrachtungen aber sagen, wie man sieht, nichts gegen die Geltung des Kausalgesetzes, denn dieses ist nicht mit den Gesetzen des Wärmeausgleiches identisch, und der von Planck geschilderte Vorgang entspricht völlig den Forderungen eines streng dynamischen Kausalzusammenhanges, ebenso wie in dem weiter oben geschilderten Verhalten eines Gasmoleküls nichts gegen dessen kausale Gebundenheit in bezug auf seine Bewegungen gesagt ist, wenn diese Bewegungen sich auch nicht mit der konstanten Formel der kinetischen Gastheorie erfassen lassen.

Wenn Nernst zwei gleichartige Gasmassen in zwei gleich großen Behältern mit gleicher Anzahl von Molekülen, die von gleicher Art sind, und von denen jedes mit dem entsprechenden Molekül des

¹⁾ Planck, a. a. O. p. 22.

²⁾ Planck, a. a. O. p. 91/2.

anderen Gases an der gleichen entsprechenden Stelle mit der gleichen Geschwindigkeitskomponente sich befindet, betrachtet,¹⁾ so entspricht die Tatsache, daß die Bewegungszustände bei beiden Gasen nach einiger Zeit absolut verschieden sind, wenn ein Molekül des einen Gases durch die Schwankungen der Nullpunktenergie des Lichtäthers beeinflußt ist, durchaus der Forderung der Kausaltheorie. Es bedeutet in der Tat nicht, wie doch Nernst vermeint, eine hypothetische Rettung des Prinzips der Kausalität, wenn man auch eine Gleichartigkeit der durch die Nullpunktenergie des Lichtäthers hervorgerufenen Störungen für beide Gase fordert, sondern diese Forderung ist nach der Kausaltheorie eine Voraussetzung für die Möglichkeit, daß die Zustände in beiden Gasen dieselben bleiben. Würden in der Tat beide Gase mit gleichem Anfangsstadium im Sinne der oben durchgeführten Charakteristik ein gleiches Endstadium aufweisen, trotzdem ein Molekül nur des einen Gases durch die Schwankungen der Nullpunktenergie beeinflußt wurde, so würde die Geltung des Kausalgesetzes vernichtet sein.

Ist es auch unmöglich, daß in der Welt irgendein Vorgang vor den Einflüssen der Nullpunktenergie geschützt wird, weil ihre störenden Einflüsse durch alle materiellen Wände zu dringen vermögen, so läßt sich doch durch diesen Sachverhalt die Geltung des Kausalprinzips nicht antasten. Verlangt auch das Gesetz der Kausalität, wie Nernst es formuliert, „daß bei gleichartigen Anfangsbedingungen zwei verschiedene Systeme einen gleichen Verlauf ihrer Aenderungen zeigen“, so ist doch mit der Tatsache, daß zwei solcher Systeme sich nicht realisieren lassen, wenn sie in der Tat besteht,²⁾ durchaus nichts gegen das Gesetz der Kausalität gesagt, das nichts über die Notwendigkeit der Realisierbarkeit seiner Bedingungen, sondern nur etwas über den Verhalt aussagt, falls seine Bedingungen realisiert sind.

5. Was nun aber von besonderem Einfluß auf die Stellungnahme der modernen Physiker zur Kausalfrage gewesen ist, das ist die Tatsache, daß es sich in den Untersuchungen, die die Mikrowelten in ihren Einzelvorgängen zu erfassen suchten, fast immer als unmöglich erwies, diese Vorgänge unter dem Kausalgesichtspunkt zu begreifen.

Die Tatsache, daß das eine Radiumatom sich schon in der nächsten Minute, das andere sich aber erst nach Jahrtausenden spaltet,

¹⁾ Nernst, a. a. O. p. 493 f.

²⁾ Die Tatsache, daß sich zwei völlig gleiche Systeme nicht realisieren lassen, fordert nicht nur, daß zwei Systeme nicht gegen die Einflüsse der Nullpunktenergie geschützt werden können, sondern auch, daß die Nullpunktenergie prinzipiell nicht auf zwei gleiche Systeme in der gleichen Weise einwirken könne.

scheint in nichts begründet, zumal alle Versuche, die Spaltungserscheinungen durch irgendwelche äußeren Einflüsse (Druck, Erwärmung) zu beschleunigen, fehlgeschlagen sind. Dabei scheinen die Vorgänge im Radiumpräparat sich ganz so wie die sonst in der Realität beobachteten Vorgänge, deren statistische Natur aufgedeckt worden ist, zu verhalten. Die Zahl der von einem Radiumpräparat ausgesandten α -Partikel schwankt in Sekunden und kleinen Zeitläufen sehr, um sich in größeren Zeitabschnitten immer mehr einem konstanten Wert zu nähern. Hier liegt also offenbar eine statistische Gesetzmäßigkeit vor, die auf Elementarvorgängen aufbaut, die sich einer kausalen Erfassung entziehen.

Es sei aber darauf hingewiesen, daß dennoch auch hier schon gewisse Hypothesen vorliegen, die vielleicht dereinst die Vorgänge im Radiumpräparat einer kausalen Erklärung zugänglich machen werden. So hat Wiechert in Göttingen die Vermutung ausgesprochen, daß die Schwankungen der im Lichtäther in der Form der oben genannten Nullpunktenergie aufgespeicherten ungeheuren Energiebeträge den Zerfall des Atoms einer radioaktiven Substanz auslösen.¹⁾

Vor allen Dingen aber ist es die Tatsache, daß die Elektronen, diese letzten Bausteine der Atome, (soweit sie uns heute zugänglich sind) sich nicht lokalisieren lassen, die zu Bedenken gegen die Geltung des Kausalgesetzes geführt hat. In der Tat diese letzten Elemente alles Seins, an denen sich Kausalität bewähren müßte, entziehen sich noch in weitem Maße unserer Fassungskraft.

So läßt sich z. B., wenn Elektronen auf ein Gitter auffallen, nicht die Richtung, in welcher die einzelnen Elektronen abgelenkt werden, aus ihrer Anfangslage und Anfangsgeschwindigkeit errechnen, wenn solche überhaupt zu Recht angenommen werden dürfen.²⁾

Ferner ist zwar die Tatsache, daß sich die Bewegung eines Elektrons im Atom um den Kern nicht kontinuierlich vollzieht, sondern daß es unter Ausstrahlung von Licht aus einer Bahn sprunghaft in die andere fällt, bekannt, aber wenn man auch weiß, daß die für das Elektron möglichen Bewegungen in einer bestimmten Beziehung zu dem Planckschen Wirkungsquantum stehen, das wiederum von Einstein als durch die Frequenz und die Energie einer Lichtwelle bestimmt nachgewiesen worden ist, so kann dennoch Schottky zu der Frage nach den Bewegungen im Bohrschen Atommodell schreiben: „Stellt

¹⁾ Vgl. Nernst a. a. O., p. 493.

²⁾ Vgl. Frank, Philipp, *Was bedeuten die gegenwärtigen physikalischen Theorien für die allgemeine Erkenntnislehre?* „Die Naturwissenschaften“. Berlin 1929. p. 992.

man nun aber die genauere Frage: wie vollzieht sich so ein Sprung aus einer ‚Bahn‘ in die andere, unter welchen Bedingungen tritt er ein, wie verläuft er, wie lange dauert er u. s. w., so sieht sich die Theorie völlig außerstande, darauf eine Antwort zu geben.“¹⁾ Ueberall steht die Theorie vor einer unübersehbaren Fülle von offenen Fragen.

Ob sich die letzten Elemente allen Seins ihrem Wesen nach prinzipiell jedem kausalen Erfassen entziehen, darüber kann hier nicht entschieden werden. Auf jeden Fall aber sei stets im Auge behalten, daß hier gewisse methodische Schwierigkeiten vorliegen, und daß, wenn es wirklich prinzipiell unmöglich sein sollte, die Elementarvorgänge unter dem Kausalgesichtspunkt zu begreifen, diese Unmöglichkeit nicht unbedingt in dem sachlichen Verhalten der Elektronen beruhen muß, sondern auch auf den methodischen Schwierigkeiten beruhen könnte.

Zum wenigsten ist man zur Zeit bei den Untersuchungen zur Atomphysik in seinem Verfahren äußerst beschränkt. Was besagt Bohrs Komplementärtheorie, nach der die Emissions- und die Wellentheorie des Lichts beide zu Recht bestehen, weil jede von ihnen einem anderen Gesichtspunkt, nämlich diese dem raumzeitlichen, jene dem kausalen Erfassen Rechnung trägt, anderes, als daß unsere Mittel der Beobachtung zu grob sind, um gleichzeitig beiden Gesichtspunkten genüge zu tun?

So ist es ferner unmöglich, die Stärke eines elektrischen Feldes mit beliebiger Genauigkeit zu messen, da die Probekörper, an denen die im Felde auf sie ausgeübte Kraft gemessen werden muß, nicht beliebig klein und beliebig schwach gewählt werden können.²⁾

Ferner hat Heisenberg darauf verwiesen, wie Ort und Impuls eines Elektrons nicht gleichzeitig genau gemessen werden können, weil der für solche Messungen benutzte Lichtstrahl, je exakter er die Ortsbestimmung erlaubt, um so abweichender auf den Impuls des Elektrons einwirkt.³⁾ Daher sieht Heisenberg bei seinen Untersuchungen über das Atom von der Zeitdauer des Umlaufs des Atoms und dem Ort des Atoms als unbeobachtbaren Momenten ab und zieht

¹⁾ Schottky, W., *Das Kausalproblem der Quantentheorie als eine Grundfrage der modernen Naturforschung überhaupt*. „Die Naturwissenschaften“. 9. 1921. p. 507.

²⁾ Vgl. Frank a. a. O. p. 992.

³⁾ Hugo Bergmann, *Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik*. Braunschweig 1929. p. 37. Vgl. auch Frank a. a. O. p. 992.

nur die Schwingungszahlen der Spektrallinien des Atoms und die Intensitäten desselben in Betracht.¹⁾

Um der dargestellten methodischen Schwierigkeiten willen, mit denen die Atomphysik zu kämpfen hat, erscheint es als verfrüht, wenn aus den Resultaten ihrer Untersuchungen so radikale Folgerungen gezogen werden, wie Heisenberg es tut, wenn er schreibt: „Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.“²⁾

Sommerfeld verhält sich demgemäß auch viel abwartender. Ihm erscheint die Tatsache, daß diejenigen Spektrallinien, die ein Atom bevorzugt emittiert, von demselben Atom auch bevorzugt absorbiert werden, trotzdem sich das Atom nicht, wie man früher meinte, im gleichen Zustande bei der Emission wie bei der Absorption befindet, sondern „nur der Uebergang zwischen Anfangs- und Endzustand in beiden Fällen reziprok ist“, zwar „vom Boden der gewöhnlichen Kausalität aus schwer zu begreifen.“³⁾ Aber Sommerfeld spricht nicht, wie wohl zu beachten ist, von einer völligen Unbegreiflichkeit, wenn er auch in diesem Zusammenhang nach einer erweiterten Form der Kausalität verlangt.

Wenn Sommerfeld die Tatsache bespricht, daß bei der Bestimmung der Uebergangswahrscheinlichkeit eines angeregten Atoms auf ein darunter liegendes Niveau ebensowohl die Zustandsfunktion und das Gewicht des Atoms in seinem Endzustand wie in seinem Anfangszustand berücksichtigt werden muß, zeigt sich deutlich, wie sehr Sommerfeld sich der Abhängigkeit aller solcher Feststellungen von dem Stande der wissenschaftlichen Forschung bewußt bleibt. So sagt

¹⁾ Vgl. Sommerfeld, *Zum gegenwärtigen Stande der Atomphysik*. „Physikalische Zeitschrift“. 1927. p. 231—239.

²⁾ Heisenberg, Abh. in „Zeitschrift für Physik“. Bd. 43. 1927. Vgl. Bergmann a. a. O. p. 38. Vgl. R. Hönigswald (*Grundfragen der Erkenntnistheorie*. Tübingen 1931. p. 98.), der unter anderem fordert, daß der Nachweis erbracht werde, „daß die unter dem Gesichtspunkte der Unsicherheitsrelation“ (Heisenbergs) zugestandene Wahrscheinlichkeit den Begriff der Kausalität nicht voraussetze.

³⁾ Sommerfeld a. a. O. Vgl. auch Schottky a. a. O. p. 509—511 die Untersuchung der Frage, wie dem Lichtknoten seine Bahn vorgeschrieben werde, ob er Fühler ausstrecke, und zwar entweder bevor er abgeht oder im Abgehen, wobei im letzteren Fall diese Fühler sich mit Ueberlichtgeschwindigkeit bewegen müßten. Da diese Frage nicht zu beantworten ist, beschränkt Schottky die Aufgabe auf die Lösung der Frage nach den Beziehungen zwischen der vom Lichte getroffenen Materie.

er über obiges Bestimmungsverfahren: „dieses Verfahren ist uns vorgeschrieben nicht durch eine subjektive Vorliebe, sondern durch den gegenwärtigen Stand unserer physikalischen Kenntnisse.“ Dennoch ist Sommerfeld um obigen Sachverhaltes willen der Ueberzeugung, daß eine Revision und Erweiterung der Deutung der Kausalität im Sinne der Ueberlieferung notwendig sei.

Es ist vielleicht aufschlußreich, wenn an dieser Stelle auf eine Ausführung Plancks verwiesen wird, die sich auf einen verwandten Sachverhalt bezieht, zu dessen Bestimmung ebenfalls gegenwärtige und spätere Zustände zugleich beigezogen werden müssen. Planck schreibt über die Einführung des Zeitintegrals in *das Prinzip der kleinsten Wirkung*, so daß in seiner Formulierung nur noch die Energie und die Zeit eine Rolle spielen: „Es wird nämlich dabei die wirkliche Bewegung zu einer bestimmten Zeit berechnet mit Hilfe der Betrachtung einer späteren Bewegung, es wird also der gegenwärtige Zustand gewissermaßen abhängig gemacht von späteren Zuständen, und dadurch bekommt das Prinzip einen gewissen teleologischen Beigeschmack. Wer sich nun allein an das Kausalprinzip hält, der wird verlangen, daß, wie die Ursache so auch alle Eigenschaften einer Bewegung allein aus früheren Zuständen verständlich und ableitbar hingestellt werden, ohne alle Rücksicht auf das, was später einmal passieren kann. Das erscheint nicht nur ausführbar, sondern auch als eine direkte Forderung der Denkökonomie. Wer dagegen in dem System der Naturgesetze nach höheren, möglichst übersichtlichen Verknüpfungen sucht, der wird, im Interesse der erstrebten Harmonie, von vorneherein auch solche Hilfsmittel für zulässig halten, wie die Bezugnahme auf Ereignisse späterer Zeiten, welche für die vollständige Beschreibung der Naturvorgänge zwar nicht gerade notwendig, aber doch vielleicht bequem zu handhaben und anschaulich zu deuten sind.“¹⁾

Diese Ausführungen Plancks sind hier in dieser Vollständigkeit wiederholt, weil sie deutlich zeigen, daß bei einer Beurteilung der Ansichten der Physiker über die Geltung des Kausalprinzips es vor allen Dingen notwendig ist, Klarheit über das zu besitzen, was der Physiker mit seinen Untersuchungen erstrebt, was das letzte Ziel aller seiner Arbeiten ist. Erst wenn diese Frage voll geklärt ist, kann zu seiner Lösung des Kausalproblems entscheidend Stellung genommen werden. Daher ist auch die Darstellung des vorliegenden Artikels zunächst nur als eine vorläufige, einführende zu betrachten.

¹⁾ Planck, *Physikalische Rundblicke*. p. 108/9.

Erst in dem zweiten und dritten Artikel, die die Zielsetzung der Physik und die dadurch für diese Wissenschaft gebotenen Methoden betrachten, kann versucht werden, ein definitives Urteil über die Ansichten der Physiker in bezug auf das Kausalproblem auszusprechen.

6. Als Ergänzung zu dem bereits Vorgetragenen sei noch ein kurzer Blick darauf geworfen, welche Stellung, ganz allgemein betrachtet, das Kausalprinzip im Rahmen der Relativitätstheorie einnimmt.¹⁾ Da gilt es als ein sehr starkes Argument für die Bevorzugung der nicht-euklidischen Geometrie gegenüber der euklidischen bei der Behandlung gewisser Räume, etwa des Torusraumes²⁾ und des Kugelraumes,³⁾ daß bei der Verwendung der nicht-euklidischen Geometrie eine Anomalie der Kausalbeziehungen verschwindet.⁴⁾ Es wird die Ansicht vertreten, daß erst die Annahme der normalen Kausalität jeder Aussage über Geometrie ihre Bestimmtheit verleihe.⁵⁾ Ja, die neuesten Forschungen haben so weit geführt, daß Reichenbach erklären kann, daß aus allen raum-zeitlichen Bestimmungen „im tiefsten Grunde“ „der Ordnungstypus der Kausalreihen“ hervorleuchte, daß „in der Kausaltheorie von Raum und Zeit das eigentliche philosophische Ergebnis der Relativitätstheorie“ zu sehen sei.⁶⁾

Aber nicht nur die Anerkennung der Kausalerklärung soll in der Relativitätstheorie vorliegen, sondern, wie Schlick betont (der seiner Verwunderung darüber Ausdruck gibt, daß man vermeint hat, die Vereinbarkeit der Relativitätstheorie mit dem Kausalprinzip erst rechtfertigen zu müssen), die Relativitätstheorie bedeutet „einen tatsächlichen Fortschritt der Kausalerklärung“.⁷⁾ Da die Begriffe der Ursache und der Wirkung, wie Schlick meint, nur auf Vorgänge angewandt werden dürfen, die spezielle Relativitätstheorie aber gelehrt hat, die Massen als Energien zu betrachten, und ihnen dadurch Prozeßcharakter zugesprochen hat, kurzum, da sie alle Eigenschaften in Vorgänge auflöst, hat sie das Gebiet der möglichen Anwendung des Kausalprinzips erweitert, das nunmehr auch die Verknüpfung der Eigenschaften unter sich zu befassen hat.

¹⁾ Der vorliegenden Darstellung wird besonders Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, Berlin-Leipzig 1926 zugrunde gelegt.

²⁾ Reichenbach a. a. O. p. 81.

³⁾ A. a. O. p. 98 und vorher.

⁴⁾ A. a. O. p. 81.

⁵⁾ A. a. O. p. 98.

⁶⁾ A. a. O. p. 306.

⁷⁾ Schlick, *Naturphilosophische Betrachtungen über das Kausalprinzip*, „Die Naturwissenschaften“ 1920. p. 470 ff.

Auch in die Mathematik hat der Kausalgedanke Einzug gehalten. Die Untersuchungen Einsteins haben dazu geführt, in die Geometrie die kausale Erklärung einzuführen. Die Einsteinschen Feldgleichungen bringen die Bestimmung der Geometrie der Welt durch die Materieverteilung zum Ausdruck.¹⁾

Aber auch für die Relativitätstheorie tritt an einer entscheidenden Stelle die Frage, wenn auch nicht nach der Geltung, so doch nach der Gestalt der Kausalität in die Erscheinung. In den allgemeinsten Gravitationsfeldern, in denen alles fließt, alles sich verbiegt, ist es nicht mehr möglich, weder die Körper- noch die Lichtgeometrie anzuwenden, nur durch einen Kunstgriff sind diese Gebiete noch in weiten Strecken erfaßbar. Die Tatsache, daß gekrümmte Flächen aller Form die topologische Eigenschaft besitzen, aus infinitesimalen Ebenenstückchen aufgebaut zu sein, führt dazu, sich herausgeschnittene Stücke zu denken. In diesen kleinen Bezirken, die aber im Rahmen der relativitätstheoretisch behandelten Räume praktisch sehr groß sind, gilt die spezielle Relativitätstheorie. Wie die Fläche in herausgeschnittenen Gebieten einer Ebene, so ist die Raum-Zeit-Ordnung daselbst der Raum-Zeit-Ordnung der speziellen Relativitätstheorie topologisch äquivalent.²⁾ Somit sind wohl Aussagen über die herausgeschnittenen Gebiete, aber nicht über die Struktur der Welt als Ganzes möglich. Die Zusammenhangsverhältnisse sind nicht bestimmt. „Die topologische Gestalt der Welt steht noch offen“, und weil es so ist, besteht noch immer die Möglichkeit, daß es in der Welt als Ganzes in sich geschlossene Kausalreihen geben könne, d. h. aber, daß eine grundlegende Abweichung von der Kausalitätsgestaltung vorliegen könne, die allgemein als Kausalrelation angesehen wird.

Wie aber stellt sich die physikalische Theorie zu dieser Möglichkeit? Das ist der entscheidende Punkt, der an dieser Stelle hervorgehoben werden muß. Die Tatsache, daß es sich hier um einen Sachverhalt handelt, der durch die Grenzen der gegenwärtigen Forschungsmethoden gegeben ist, wird fest im Auge behalten, und so schreibt Reichenbach: „Die allgemeine Relativitätstheorie stellt solche Ergebnisse in den Bereich des Möglichen, solange sie keinen anderen Grundsatz der Raum-Zeit-Ordnung kennt, als die Geltung der speziellen Relativitätstheorie im Infinitesimalen. Freilich wird man wohl richtiger tun, diesen Grundsatz eben als unzureichend anzusehen und durch ein besonderes Axiom solche topologischen Gestalten (die in sich

¹⁾ Reichenbach a. a. O. p. 291.

²⁾ A. a. O. p. 301 ff.

zurücklaufenden Kausalreihen) auszuschließen.“¹⁾ Man sieht, wie in der Relativitätstheorie versucht wird, jeglichen Verstoß gegen den Kausalgedanken auszuschneiden.

Aber dennoch muß auf einen Umstand hingewiesen werden. Die vorliegende Besprechung der Auffassung von der Kausalität im Rahmen der Relativitätstheorie hat sich vorzüglich an der Darstellung Reichenbachs *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* orientiert. Reichenbach selbst aber hat in einer anderen Arbeit *Die Kausalstruktur der Welt und der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft*²⁾ sich die Aufgabe gestellt, zu zeigen, „wie sich die Kausalstruktur der Welt allein mit Hilfe des Begriffs der wahrscheinlichen Bestimmtheit beherrschen läßt“. Reichenbach läßt zunächst die Determinationsform der Kausalhypothese, nach der der Ablauf der Welt als Ganzes unveränderlich feststeht, fallen, und begnügt sich mit dem Nebeneinander zweier Hypothesen, nämlich der kausalen Implikationshypothese, die sich auf die beherrschenden Faktoren des Geschehens bezieht, und der Annahme einer wahrscheinlichkeitsgemässen Verteilung für den Einfluß der Restfaktoren. Gleich darauf aber entschließt er sich, die beiden Annahmen in der einheitlichen Hypothese von dem wahrscheinlichkeitsgemässen Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung zu vereinigen. So verbindet Reichenbach in eigenartiger Weise die Begriffe Ursache, Wirkung und Kausalstruktur mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit, den die ersteren Begriffe wesensmäßig auszuschließen scheinen. Offensichtlich also sind nicht nur über die Aufgabestellung der Physiker allein, sondern auch über die von ihnen verwendeten Begriffe ausführliche Untersuchungen erforderlich, ehe ihre Stellungnahme zum Kausalprinzip definitiv beurteilt werden kann.

So viel aber haben die vorläufigen Darlegungen dieses ersten Aufsatzes vielleicht schon gezeigt, daß die Sachverhalte, die einige Physiker zur Aufgabe des Kausalprinzips geführt haben, nicht derart gestaltet sind, daß Gefahr bestände, daß sie eine philosophisch gut fundierte Lehre von der Kausalität zu Fall zu bringen vermöchten.

¹⁾ A. a. O., p. 313.

²⁾ Sitzungsbericht der math.-nat. Abteil. d. Bayer. Akademie der Wissenschaften München 1925. p. 133—175.