

Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik¹.

Von GRETE HERMANN, Østrupgaard (Dänemark).

Auszug.

Das physikalische Ergebnis der Quantenmechanik, von dem die Erschütterung altgewohnter naturphilosophischer Auffassungen, insbesondere der Kausalvorstellungen ausgeht, besagt, daß der Vorausberechnung künftiger Naturvorgänge eine scharfe, unüberwindbare Schranke gezogen ist. Die Idee des LAPLACEschen Dämons, der den augenblicklichen Zustand der Natur vollständig kennt, sämtliche Naturgesetze überschaut und auf Grund dieser Kenntnis den zukünftigen Gang der Ereignisse vorhersagen kann, verliert damit jede Anwendung auf die Natur. Und doch war diese Idee nur der Ausdruck der Überzeugung, daß jedes Naturgeschehen in allen seinen Zügen durch vorangehende Ereignisse verursacht worden ist und daher für einen der Naturgesetze Kundigen aus diesen Ursachen vorausberechenbar sein müsse. Mit dem Glauben an die unbeschränkte Möglichkeit solcher Berechnungen gerät daher zugleich die Überzeugung von der durchgängigen kausalen Verknüpfung des Naturgeschehens ins Wanken.

Den experimentellen Anstoß zu den Überlegungen, die in der Behauptung unüberwindlicher Schranken der Vorausberechenbarkeit gipfeln, haben die sog. Dualismusexperimente gegeben. Nach ihnen entfällt die klassische Unterscheidung zwischen Strahlungsvorgängen, die in der schnellen Bewegung kleiner Massenteilchen bestehen, und solchen, bei denen eine Welle sich ausbreitet. In der klassischen Physik galten die α - und β -Strahlen, die von radioaktiven Elementen ausgehen, als Materiestrahlen, da sie z. B. beim Durchgang durch gesättigten Wasserdampf strichartige Spuren hinterlassen und damit den diskreten Charakter der bewegten Teilchen demonstrieren. Dieselben Strahlen aber führen, wenn sie ein Gitter durchsetzen oder an ihm reflektiert werden, zu Interferenzerscheinungen und nötigen den Forscher damit zu der Annahme, es mit einem Wellenvorgang zu tun zu haben. In entsprechender Weise haben die Lichtstrahlen, die seit der Entdeckung der Interferenzerscheinungen eindeutig als Wellenbewegung gedeutet wurden, Eigenschaften aufgewiesen, die auf ihre korpuskulare Natur schließen lassen.

Diesen Experimenten wird die Quantenmechanik durch die Annahme gerecht, daß sich jeder atomare Vorgang *auch* im Wellenbild, jeder Wellenvorgang *auch* korpuskular darstellen lassen müsse. Bei der Gegensätzlichkeit beider Bilder kann aber unmöglich ein und derselbe Vorgang sowohl alle Züge einer sich ausbreitenden Welle wie alle Merkmale einer Korpuskelbewegung haben. Die Vereinbarkeit beider Bilder ist also nur dadurch möglich, daß jedes von ihnen die Anwendbarkeit des anderen beschränkt.

In den viel zitierten Unbestimmtheitsrelationen hat HEISENBERG exakt die Beschränkungen berechnet, die Wellen- und Partikelbild, angewandt auf denselben physikalischen Vorgang, einander gegenseitig auferlegen. Die bekannteste von ihnen verbietet bei der Anwendung des Korpuskelbildes die gleichzeitige scharfe Bestimmung des Ortes und des Impulses der Partikel: Ist Δq die Genauigkeit, mit der der Ort, etwa eines Elektrons, festgelegt ist, Δp die Genauigkeit seiner Impulsbestimmung, so gilt die Relation $\Delta q \cdot \Delta p \geq h$, wobei h die PLANCKSche Konstante ist.

¹ Abhandlungen der FRIESSchen Schule, neue Folge, sechster Band, 2. Heft, S. 69—152.

Für die klassische Physik ist die Meßbarkeit verschiedener Größen unabhängig voneinander. Der physikalische Zustand eines Systems kann daher durch die bloße Aufzählung der Werte aller auftretenden physikalischen Größen charakterisiert werden. Im Gegensatz dazu braucht der quantenmechanische Formalismus zur Zustandsbeschreibung neuartige Symbole, die die gegenseitige Abhängigkeit in der Bestimmbarkeit verschiedener Größen zum Ausdruck bringen.

Diese Symbole, die Wellenfunktionen physikalischer Systeme, und der mathematische Formalismus, der die für ihre Verknüpfung gültigen Rechenregeln angibt, schließen sich auf Grund des BOHRschen *Korrespondenzprinzips* eng an die klassische Theorie an. Die klassische Beschreibung ist mit der quantenmechanischen vereinbar, sofern ihre Größen in einem solchen Maß unbestimmt bleiben, daß die Unbestimmtheitsrelationen erfüllt sind.

Diese Korrespondenz bringt es andererseits mit sich, daß der quantenmechanische Formalismus das Ergebnis einer Messung nicht mit beliebiger Genauigkeit vorauszubestimmen erlaubt. Er erlaubt vielmehr, je nach der Wellenfunktion, durch die das physikalische System vor der Messung charakterisiert war, nur die Ableitung mehr oder weniger weitreichender Wahrscheinlichkeitsaussagen.

Aber mit dem Nachweis, daß dieser Formalismus selber nur zu beschränkten Vorhersagen die Unterlagen bietet, ist die Unüberwindbarkeit der aufgewiesenen Schranken nicht garantiert. Wer sie bezweifelt, braucht damit den Formalismus selber nicht anzugreifen. Es mag sein, daß dieser Formalismus sich auch künftig bewährt, wie er das bisher getan hat. Aber was hindert uns, anzunehmen, daß ihm nicht bei einer Erweiterung der physikalischen Erkenntnis neue Formeln und Regeln angefügt werden, die zusammen mit dem jetzt vorliegenden formalen Ansatz wieder genaue Voraussagen ermöglichen? Auf die Beantwortung dieser Frage kommt hier alles an.

Es liegt nahe, die Unmöglichkeit einer solchen Erweiterung schon aus den Unbestimmtheitsrelationen ablesen zu wollen. Wenn Ort und Impuls einer Partikel grundsätzlich nicht beide mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden können, wie soll man dann sichere Aussagen über die künftige Bewegung gewinnen, die doch eben vom augenblicklichen Ort und Impuls des Körpers bestimmt wird?

Aber dieser Argumentation liegt die Auffassung zugrunde, daß, unbeschadet der Unbestimmtheitsrelationen, das Elektron, als eine Partikel im klassischen Sinn, zu jeder Zeit einen genauen Ort und einen genau bestimmten Impuls hat, durch die — bis auf äußere Störungen — seine künftige Bewegung festgelegt ist, und daß *diese Ursache* des kommenden physikalischen Ablaufs auf immer der Beobachtung entzogen ist. Die Unbestimmtheitsrelationen werden also lediglich subjektiv interpretiert und scheinen über die Natur der physikalischen Systeme nichts auszusagen.

Mit der Ableitung dieser Relationen aus dem Dualismus von Wellen- und Partikelvorstellung ist diese subjektive Interpretation unvereinbar: Die Unterordnung jedes atomaren Vorganges *auch* unter die Merkmale des Wellenbildes beschränkt die Anwendung des Korpuskelbildes in der Weise, daß nicht alle Merkmale bewegter Massenpunkte — im klassischen Sinn — auch Eigenschaften des fliegenden Elektrons sein können.

Hat aber das Elektron nach diesen Überlegungen nicht gleichzeitig einen genauen Ort und einen genauen Impuls, dann kann sein genauer Ort und sein genauer Impuls für seine weitere Bewegung nicht maßgebend sein. Fällt diese Annahme, dann ist die Tür offen für die Frage, ob sich nicht andere Merkmale finden lassen, von denen der Ablauf der Bewegung abhängt, und aus denen er sich vorausberechnen läßt. Der Formalismus der Quantenmechanik kennt solche Merkmale nicht. Aber daraus folgt nicht das Recht, sie für unmöglich zu erklären.

Zu ähnlichen Erwägungen führen die Erörterungen zahlreicher anderer Beweisversuche, die die Schranken der Vorausberechenbarkeit als prinzipiell unüberwindbar erweisen sollen. Alle diese Argumente weisen zwar ungeheure Schwierigkeiten auf, die dem Versuch entgegenstehen, die vorliegenden Schranken der Vorausberechnung zu überwinden. Aber sie lassen die entscheidende Frage offen: Zwar gibt es in jedem quantenmechanisch charakterisierten Zustand eines physikalischen Systems Messungen, deren Ergebnis auf Grund der Kenntnis dieses Zustands nicht vorausgesagt werden kann. Aber wodurch soll der physikalisch sonst übliche Weg verrammelt sein, nach neuen Merkmalen zu suchen, durch sie die Zustandsbestimmung physikalischer Systeme zu verfeinern und in ihnen den Grund für das bisher nicht vorausberechenbare Messungsergebnis zu finden?

Wer die Möglichkeit solcher Merkmale schlechthin leugnet, gerät in Konflikt mit dem Satz von der Unabgeschlossenheit der Erfahrung. Es gibt kein anderes Kriterium dafür, daß man in einem Naturbereich alle wesentlichen Umstände erfaßt hat, als die Möglichkeit, in diesem Bereich alle Vorgänge in ihrer Gesetzmäßigkeit zu verstehen. Ob man diese naturgesetzlichen Zusammenhänge aber erkannt hat, zeigt sich daran, daß man aus ihnen Voraussagen abzuleiten vermag, die sich empirisch bewähren.

Somit kann es nur einen einzigen hinreichenden Grund geben, das weitere Suchen nach den Ursachen eines beobachteten Vorganges als grundsätzlich fruchtlos aufzugeben: *den, daß man diese Ursachen bereits kennt.*

Die Quantenmechanik steht infolgedessen mit ihrer Behauptung, in der Vorausberechnung von Messungsergebnissen für immer beschränkt zu sein, vor dem folgenden Dilemma: Entweder nennt sie selber die Ursachen, die diese Messungsergebnisse vollständig bestimmen — wie will sie es dann dem Forscher verwehren, diese Ursachen im einzelnen Fall aufzusuchen und aus ihnen das Messungsergebnis vorauszuberechnen? Oder sie nennt diese Ursachen nicht — wie will sie dann, ohne willkürlich der Erforschung unbekannter Naturgebiete vorzugreifen, die Möglichkeit künftiger Entdeckungen dieser Ursachen ausschließen?

Der quantenmechanische Formalismus enthält einen Ausweg aus diesem Dilemma. Die Richtung, in der die Lösung der Schwierigkeiten zu finden ist, wird von dem Bohrschen Korrespondenzprinzip gewiesen. Dieses Prinzip erlaubt und fordert, in dem von der Quantenmechanik zugelassenen Anwendungsbereich der klassischen Begriffe jede Folgerung, die sich klassisch aus der Charakterisierung der vorliegenden Umstände ergibt, auch den quantenmechanischen Ansätzen zugrunde zu legen.

Diese korrespondenzmäßige Betrachtung gibt nun in gewissen Fällen quantenmechanisch nicht vorausberechenbarer Vorgänge genaue Auskunft über diejenigen physikalischen Bestimmungsstücke, von denen diese Vorgänge in allen ihren wesentlichen Merkmalen abhängig sind. Es sind die Fälle, in denen ein solcher

Vorgang zu einem Meßprozeß gehört und mit dazu dient, das beobachtete Objekt mit dem Meßinstrument in Verbindung zu bringen.

Nehmen wir den Fall, daß das Meßinstrument durch eine Zeigerstellung das Ergebnis einer Messung anzeigt; dann setzt der Schritt vom Ablesen dieser Zeigerstellung bis zum quantenmechanischen Ansatz für den Zustand des beobachteten physikalischen Systems eine Theorie der Wechselwirkung zwischen System und Meßinstrument voraus. Diese Theorie beruht allein auf den klassischen Begriffen und zeigt mit ihrer Hilfe, daß und inwiefern der Ausschlag des Zeigers vom Zustand des gemessenen Objektes bedingt ist und daher zu dessen Bestimmung Anhaltspunkte gibt. Die Anwendung jedes elektrischen, jedes optischen Instrumentes, jeder Waage beruht demnach auf einem Rückschluß vom Meßinstrument auf das Objekt der Messung. In diesem Rückschluß wird der Ausschlag des Meßinstrumentes erklärt als die notwendige Wirkung, die im Vorgang der Messung dem Instrument von dem zu messenden System aufgezwungen worden ist.

Handelt es sich nun um eine Messung, deren Ergebnis quantenmechanisch nicht vorauszusehen war, dann gilt das gleiche offenbar auch für die Zeigerstellung des Meßinstrumentes, an dem das Ergebnis der Messung registriert wird. Für diesen nicht vorausberechenbaren Vorgang aber gibt die Interpretation des Meßprozesses selber die Gründe an, durch die er zustande gekommen ist. Es wäre also sinnlos, für ihn in neuen, der Forschung bisher entgangenen physikalischen Merkmalen die Ursache seines Eintretens suchen zu wollen. *Die Theorie der Messung verfügt bereits über hinreichende Erklärungsgründe.*

Für den Zustand des gemessenen Systems selber aber liegt es offenbar nicht anders. Denn es ist für den Ablauf eines Naturvorganges zufällig, ob er selber als das Objekt der Messung betrachtet wird oder den Forscher nur als Mittel zur Messung anderer Vorgänge interessiert.

Die Möglichkeit, neue, das Ergebnis einer Messung streng determinierende Merkmale zu finden, ist demnach in der Quantenmechanik in der Tat durch den einzigen Grund ausgeschlossen, der bei der Unabgeschlossenheit der Erfahrung zum Beweis ausreicht: *Die das Messungsergebnis determinierenden Merkmale sind durch die Quantenmechanik selber bereits genannt.*

Das erscheint befremdlich. Wenn die Quantenmechanik das Messungsergebnis vollständig zu erklären weiß, *nachdem* es eingetreten ist, wieso bietet sie keine Handhabe, es *vor* der Messung aus den nachher aufgewiesenen Erklärungsgründen zu berechnen?

Die Lösung dieser Schwierigkeit liegt wieder im Korrespondenzprinzip. Die Voraussagen, zu denen man von der quantenmechanischen Charakterisierung eines Systems gelangt, können nie weitergehen als die, die aus den nur beschränkt anwendbaren klassischen Vorstellungen ableitbar sind. Wenn man trotzdem *nach* der Ablesung des Meßinstrumentes dessen nicht vorausberechenbare Zeigerstellung durch eine Theorie des Meßprozesses erklärt, dann führt diese den Vorgang der Messung zurück auf Zustände, die in der vorangehenden Beschreibung von Objekt und Meßinstrument nicht enthalten waren und nicht enthalten sein konnten. Die Beschreibung der Systeme ist also in der Quantenmechanik nicht eindeutig, sondern zeigt sozusagen nur eine Seite des physikalischen Systems, die der Forscher auf Grund der vorgenommenen Beobachtung erfassen kann. Relativ zu dieser Beobachtung hat das System hinsichtlich gewisser physikalischer Größen keine scharfen Werte und entsprechend auch keine Merkmale,

aus denen sich das Ergebnis einer scharfen Messung dieser Größen ablesen läßt. Macht man aber eine solche Messung, die das System stört und in einen anderen Zustand bringt, dann erhält man für diesen neuen Zustand genaue quantenmechanische Angaben für die gemessene Größe und darüber hinaus Gründe dafür, daß sich gerade dieser nicht vorausgesehene Wert der Messung hat einstellen müssen. Zu einer Voraussage des Ergebnisses waren diese Gründe trotzdem nicht zu gebrauchen; denn sie bestimmen das System nur relativ zu der Beobachtung, die bei der Messung selber erst gemacht wurde. Sie konnten also dem Physiker nicht vorher zur Vorausberechnung zur Verfügung stehen.

Dieser relative Charakter der quantenmechanischen Beschreibungsweise tritt deutlich in einem lehrreichen Gedankenexperiment hervor¹.

Der Ort eines Elektrons sei nur durch eine Ebene bestimmt; wo es innerhalb dieser Ebene ist, sei unbekannt. Nach den Unbestimmtheitsrelationen kann dann nur die in der Ebene liegende Impulskomponente des Elektrons gegeben sein; in der Richtung senkrecht zu ihr bleibt der Impuls unbestimmt.

An diesem Elektron soll eine Ortsbestimmung durch eine Beleuchtung des Elektrons vorgenommen werden. Das abgebeugte Licht gehe durch ein Mikroskop und werde dann auf einer photographischen Platte aufgefangen. Um einfache Verhältnisse zu haben, denken wir uns die Intensität des hierbei benutzten Lichtes so herabgesetzt, daß an dem ganzen Vorgang nur ein einziges Lichtquant beteiligt ist. Gemäß dem Dualismus von Wellen- und Partikelbild ist dieses Lichtquant einerseits als ein Korpuskel zu betrachten, das nach den klassischen Gesetzen des elastischen Stoßes mit dem Elektron zusammenstößt, andererseits als eine Welle, die, vom Elektron abgelenkt, sich im Mikroskop nach den klassischen Gesetzen der Optik fortpflanzt.

Für den Zusammenstoß von Lichtquant und Elektron gilt der Impulssatz: Beide werden beim Zusammenstoß abgelenkt; ihre Impulsänderungen sind entgegengesetzt gleich.

Um ein scharfes Bild des Elektrons zu erhalten, setzen wir die Platte in die der Objektebene entsprechende Bildebene des Mikroskops, in der, nach der klassischen Theorie, alle von einem Punkt der Objektebene ausgehenden Wellenzüge wieder in einem Punkt vereinigt werden. Wir benutzen also die klassische Vorstellung, daß sich vom Ort des Zusammenstoßes eine Kugelwelle nach allen Seiten ausbreitet, die, soweit sie auf die Öffnung des Mikroskops trifft, in dessen Linsen eindringt. Der ganze Öffnungswinkel des Mikroskops ist also an diesem Prozeß beteiligt, und es hat deshalb — nun wiederum im Korpuskelbild — keinen Sinn, eine bestimmte Richtung auszuzeichnen, in der das Lichtquant vom Elektron reflektiert und in das Mikroskop eingedrungen ist. Daraus folgt, daß sich auch die Impulsänderung, die das Elektron durch den Zusammenstoß erfahren hat, nicht genau bestimmen läßt. Man wird also den Zustand des Elektrons unmittelbar nach dem Zusammenstoß durch eine Wellenfunktion zu charakterisieren haben, die einen scharfen Ort, aber einen gegenüber dem vorhergehenden Zustand weniger scharfen Impuls festlegt.

Zu einer ganz anderen Beschreibung des Zusammenstoßes gelangt man, wenn man die Platte nicht in der Bildebene, sondern in der Brennebene des Mikroskops anbringt. Auch in diesem Fall wird die Platte ein scharfes Bild zeigen; denn das Lichtquant hat nur

so viel Energie, ein einziges Atom der Platte anzuregen. Dieser vom Lichtquant getroffene Punkt der Brennebene ist charakteristisch für eine bestimmte Richtung, in der das Licht ins Mikroskop eingedrungen ist. Die Vorstellung des Wellenbildes, die in diesem Fall das beobachtete Ergebnis interpretiert, ist danach die eines Bündels paralleler Strahlen, die durch ihre Brechung in den Linsen in deren Brennebene auf einen einzigen Punkt vereinigt werden. Die Richtung, in der das Lichtquant ins Mikroskop eingetreten ist, liegt demnach fest, unbestimmt bleibt aber der Ort der Objektebene, von dem es nach dem Zusammenstoß mit dem Elektron ausgegangen ist. War der Impuls des Lichtquants vor dem Zusammenstoß bekannt, dann ist mit der Angabe der Richtung des Lichtquants nach dem Zusammenstoß auch seine Impulsänderung und also, gemäß dem Impulssatz, auch die des Elektrons bestimmt. Obwohl also mit dem Elektron in diesem Fall nichts anderes passiert ist als in jenem ersten, muß man seinen Zustand nach dem Zusammenstoß jetzt durch eine Wellenfunktion mit unscharfem Ort und relativ scharfem Impuls charakterisieren.

Das Nebeneinander dieser verschiedenen Möglichkeiten bedeutet offenbar, daß man — wie wir sagen können — je nach dem vorliegenden Beobachtungszusammenhang für dasselbe System und für den gleichen Zeitpunkt — nämlich für das Elektron zur Zeit unmittelbar nach dem Zusammenstoß mit dem Lichtquant — verschiedene Wellenfunktionen erhalten kann. Die quantenmechanische Charakterisierung kommt dem physikalischen System nicht wie die klassische gewissermaßen noch „an sich“ zu, und das heißt hier: unabhängig davon, durch welche Beobachtungen man sich Kenntnis von ihm verschafft.

Welche Revision ist auf Grund dieses Ergebnisses am Kausalprinzip der klassischen Physik vorzunehmen?

Zwei Punkte der vorangehenden Überlegungen sind dafür entscheidend: Die Schranken der Vorausberechenbarkeit künftiger Ereignisse haben sich in der Tat als prinzipiell unüberwindbar erwiesen, und doch gibt es kein Geschehen, zu dem sich nicht im Rahmen des quantenmechanischen Formalismus Ursachen aufweisen ließen.

Beide Behauptungen scheinen einander zu widersprechen. Während die erste feststellt, daß der Anwendung kausaler Schlüsse und der Beherrschung, die sie dem Menschen über die Natur verleiht, unvermeidliche Schranken gesetzt sind, betont die zweite die prinzipiell unbeschränkte Anwendbarkeit der Kausalvorstellungen, denen grundsätzlich jeder Naturvorgang, und zwar hinsichtlich aller ihn charakterisierenden physikalischen Merkmale untergeordnet werden kann.

Die Auflösung dieses Gegensatzes kann nur gelingen auf Grund einer Erörterung derjenigen Begriffe, die in den genannten quantenmechanischen Ergebnissen die entscheidende Rolle spielen: des Begriffs der Vorausberechenbarkeit des Naturgeschehens einerseits und der kausalen Verknüpfung andererseits.

Wir haben die enge Verbindung zwischen beiden Begriffen bereits berührt. Der Erklärungswert einer physikalischen Hypothese kann nur durch die Vorausberechnung künftigen Naturgeschehens kontrolliert werden. Und ohne die Möglichkeit einer solchen Kontrolle büßt die Behauptung kausaler Zusammenhänge den Charakter der Naturerkenntnis ein.

Diese Beziehung hat vielfach zu der Annahme verführt, daß hier, streng genommen, identische Begriffe vorliegen, und daß nur die sprachliche Bezeichnung einen Unterschied vortäusche. Bei dieser Deutung ist der Widerspruch zwischen den beiden genannten

¹ V. WEIZSÄCKER, Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop. Z. Physik 70, H. 1 u. 2.

quantenmechanischen Behauptungen unvermeidbar. Wenn das Verhältnis von Ursache und Wirkung in nichts anderem besteht als darin, daß die Wirkung vorausgesagt werden kann, wenn die Ursache bekannt ist, dann gibt es für prinzipiell nicht vorausberechenbare Ereignisse keine Ursachen. Die Tatsache, daß die Quantenmechanik auch für nicht vorausberechenbare Ereignisse eine naturgesetzliche Erklärung voraussetzt und aufsucht, zeigt somit, daß die Gleichsetzung beider Begriffe auf einer Verwechslung beruht. Die kausale Verknüpfung betrifft unmittelbar nur die notwendige Abfolge der Ereignisse selber. Die Möglichkeit, diese auf Grund der Einsicht in die Kausalzusammenhänge vorauszuberechnen, liefert das Kriterium für die richtige Anwendung der Kausalvorstellung. Die Quantenmechanik nötigt dazu, beide Begriffe sorgsam zu unterscheiden.

Unabhängig vom Kriterium seiner Anwendbarkeit formuliert, besagt das Kausalgesetz, daß nichts in der Natur geschieht, das nicht in allen physikalisch feststellbaren Merkmalen durch frühere Vorgänge verursacht ist, und das heißt: mit Notwendigkeit auf sie folgt. In diesem Sinn ist die lückenlose Kausalität nicht nur mit der Quantenmechanik vereinbar, sondern wird nachweislich von ihr vorausgesetzt.

Wie aber steht es mit dem Kriterium der Kausalität? Auch die Quantenmechanik ist auf ein solches Kriterium angewiesen und entnimmt es, ebenso wie die klassische Physik, der Möglichkeit, künftige Ereignisse vorauszusagen. Im Gegensatz zur klassischen Physik aber hat sie mit der Voraussetzung gebrochen, daß jede Kausalbehauptung sich unmittelbar durch die Vorhersage der Wirkung prüfen lasse. Auch für nicht vorausberechenbare Ereignisse gibt die Quantenmechanik eine kausale Erklärung und kontrolliert diese durch Voraussagen. Aber diese Kontrolle erfolgt auf einem Umweg: Aus den nicht vorausberechenbaren Ereignissen wird auf ihre Ursache zurückgeschlossen, und aus der Annahme, daß diese Ursache vorgelegen hat, werden dann wiederum Voraussagen über kommende Ereignisse abgeleitet, deren Eintreten empirisch

kontrolliert werden kann. So wird in dem behandelten Beispiel die Schwärzung der Platte zurückgeführt auf den Zusammenstoß von Elektron und Lichtquant, von dem, auf den der Beobachtung noch zugänglichen Zustand des Elektrons geschlossen werden kann.

Daß diese neue Möglichkeit der nur mittelbaren Kontrolle von Kausalbehauptungen von der klassischen Physik nicht ernsthaft aufgefaßt worden ist, hat seinen Grund darin, daß der relative Zug der quantenmechanischen Naturbeschreibung der klassischen Physik fremd ist. Für sie ist die Charakterisierung irgendeines Systems eindeutig und unabhängig von der Art, wie der Beobachter von ihm Kenntnis nimmt. Und daher kommt sie zwingend zu der Annahme, daß bei hinreichender Beobachtungsschärfe und hinreichender Kenntnis der naturgesetzlichen Zusammenhänge die Untersuchung physikalischer Systeme die Ursachen ihrer weiteren Entwicklung mit beliebiger Deutlichkeit zu bestimmen und damit diese weitere Entwicklung vorauszuberechnen gestattet.

Die Schwierigkeiten, in die der Vertreter des Kausalgesetzes durch die Entdeckungen der Quantenmechanik gestürzt wird, rühren also, bei Licht besehen, nicht vom Kausalprinzip selber her. Sondern sie stammen aus der stillschweigend mit ihm verknüpften Voraussetzung, daß die physikalische Erkenntnis das Naturgeschehen adäquat und unabhängig vom Beobachtungszusammenhang erfasse. Diese Annahme findet ihren Ausdruck in der Voraussetzung, daß jede kausale Verknüpfung zwischen Vorgängen zu einer Vorausberechnung der Wirkung aus der Ursache Anlaß gebe, ja daß die kausale Verknüpfung mit der Möglichkeit dieser Vorausberechnung überhaupt identisch sei.

Die Quantenmechanik nötigt dazu, diese Vermengung verschiedener naturphilosophischer Prinzipien aufzulösen, die Annahme vom absoluten Charakter der Naturerkenntnis fallen zu lassen und das Kausalprinzip unabhängig von ihr zu handhaben. Sie hat das Kausalgesetz somit keineswegs widerlegt; aber sie hat es geklärt und von anderen Prinzipien befreit, die nicht notwendig mit ihm verbunden sind.

Kurze Originalmitteilungen.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Das Verhalten von Linolensäure, Leinöl und Holzöl beim Erhitzen.

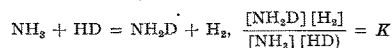
Der Übergang isolierter Kohlenstoff-Doppelbindungen in ein System konjugierter kann mit der von mir beschriebenen Methode der Brombindungs zahlen durch Abnahme dieser Kennzahl nachgewiesen werden. Die Brb.Z. von technischem Leinölstandöl wurde nun um etwa 15 Einheiten niedriger gefunden als die Brb.Z. des Leinöls. Desgleichen sank die Brb.Z. der Linolensäure durch 6-stündiges Erhitzen dieser Säure unter Stickstoff auf 250° um 5,5 Einheiten, durch 10-stündiges Erhitzen unter Stickstoff auf 250° um 10 Einheiten. Die isolierten Doppelbindungen der Linolensäure gehen also beim Erhitzen zunächst in ein konjugiertes System¹ über, das ein Zwischenprodukt der Standölbildung darstellt und dessen Konstitution ermittelt werden wird. Die Abnahme der Brb.Z. um 10 Einheiten bedeutet einen Gehalt der erhitzten Substanz von mindestens 30% an der Verbindung mit konjugierten Doppelbindungen. Im Gegensatz hierzu wurde die Brb.Z. eines technischen Holzölstandöls um etwa 9 Einheiten höher gefunden als die Brb.Z. des Holzöls. Aus dem konjugierten System im Holzöl (Elaeostearinsäure) entstehen also beim Erhitzen isolierte Doppelbindungen. Die konjugierten Doppelbindungen der Elaeostearinsäure reagieren demnach beim Erhitzen nach Art einer Diels'schen Diensynthese, wie dies bereits

C. P. A. KAPPELMEIER¹ vermutet hat. Im übrigen geben sich auch mit der Methode der Brb.Zen. die Doppelbindungen des Leinöls als nicht konjugiert, die Doppelbindungen des Holzöls als konjugiert zu erkennen. Der Unterschied in den Brb.Zen. beider Öle beträgt etwa 32 Einheiten.

München, Chemisches Laboratorium der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, den 12. September 1935.
KARL MEINEL.

Der Austausch von schweren Wasserstoffatomen zwischen Wasserstoff und Ammoniak.

Der Austausch von Wasserstoffatomen zwischen leichtem Ammoniak und schwerem Wasserstoff wurde bei verschiedenen Konzentrationen durch einen auf 300° C erhitzten Platindraht katalysiert. Die Reaktion wurde nach Ausfrieren des Ammoniaks durch Beobachtung des Deuteriumgehaltes des Wasserstoffs verfolgt. Diese Messung geschah mit Hilfe der FARKASSCHEN Mikrowärmeleitfähigkeitsmethode². Unter plausiblen Annahmen für die Verteilung des schweren Wasserstoffs auf die dabei entstehenden Ammoniakmoleküle NH₂D und NHD₂ ergeben unsere Messungen für die Gleichgewichtskonstante K der Reaktion



¹ Farben-Ztg. 38, 1018 u. 1077 (1933).

² A. u. L. FARKAS, Proc. Roy. Soc. A. 144, 467 (1934).

¹ Vergl. hierzu J. SCHEIBER, Farbe und Lack 1929, 575.