

Determinismus und Kausalität

Deterministische vs. Statistische Naturgesetze

Philipp Wilhelm

Universität Heidelberg

12. Januar 2011

- ① Vorüberlegung
 - Alltägliche Nutzung der Begriffe
 - Arten der Kausalität
 - Laplacesche Geist
 - klassischer Rationalismus
 - Empirismus: Krise der Kausalität
 - Kritizismus
- ② Kausalitätsprinzip der klassischen Physik
 - Grundtypen physikalischer Aussagen
 - Der allgemeine Kausalsatz
- ③ Kausalität und Wahrscheinlichkeit
 - Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeit
 - Begriff der Wahrscheinlichkeit
 - allgemeiner Kausalsatz
- ④ Das Kausalproblem der Quantentheorie
 - Grundlagen der Quantentheorie
 - Unbestimmtheits-Relation
 - allgemeiner Kausalsatz

Kausalität: Zusammenhang von Ursache und Wirkung. ¹

Determinismus: Lehre von der kausalen [Vor]bestimmtheit alles Geschehens.¹

Kausalitätsprinzip: Grundsatz, nach dem für jedes Geschehen notwendig eine Ursache angenommen werden muss.¹

¹DUDEN Fremdwörterbuch

Eigenschaften von Naturgesetzen

Invarianz gegenüber gewissen Transformationen

Universalität

Kausalität

Kausalität ist aus historischer Sicht wichtige allgemeine, aber auch problematische Eigenschaft. Erhard Scheibe formuliert etwa: *Physikalische Gesetze sind Kausalgesetze - das ist ein philosophischer Gemeinplatz, der zumindest vorübergehend die Geister und wohl auch die Gemüter beherrscht hat.*²

²Scheibe

Das griechisch geprägte Denken ist stark durch den Kausalbegriff geprägt

Bedingt dadurch ist unsere Sprache durch den Kausalbegriff geprägt: *Dutzende von lebenswichtigen Partikeln, wie weil, da, obwohl, damit, so dass, weshalb, dennoch, gegeben, geschweige denn, gleichviel usw., haben eine feste logische Bedeutung angenommen, haben genaue Gegenstücke in allen Sprachen, die geistig (nicht notwendig etymologisch) von der griechisch-lateinischen Mittelmeerkultur abstammen.* ³

Selbst der immerhin noch recht weit verbreitete Aber- und Gespensterglaube, Spiritismus, Astrologie u. dgl. sind relativ milde, unter dem Einfluß des kausalen Denkens gezähmte Erscheinungsformen. ⁴

³Schrödinger

⁴Schrödinger

- **Kausalität bzgl. Wesensursachen** Erscheinungen werden durch verborgene Qualitäten als deren Ursachen erklärt.
- **Ereigniskausalität:** Ereignisse werden als Ursache und Wirkung miteinander verknüpft.
 - (reversible) Zustandskausalität oder Determinismus: Ursachen bestimmen ihre Wirkungen eindeutig.
 - irreversible Kausalität

Der Laplacesche Geist

Von Laplace in der Einleitung seiner Schrift „Théorie analytique des probabilités“ (1812) eingeführtes Bild:

- vollständige Kenntnis eines bestimmten Weltzustandes in gegebenem Augenblick
- Welt als Ganzes, in jedem Einzelzug ihres Daseins und Ablaufs, ist vollständig bestimmt
- Ein solcher Geist gelangt zur Weltformel
- Für ihn ist nichts ungewiß; weder Zukunft noch Vergangenheit

Das Bild des Laplaceschen Geistes dient zur Verdeutlichung einer streng deterministischen Auffassung. Nach Laplace stellt der menschliche Geist ein schwaches Abbild dieses Geistes dar (bezogen auf die Astronomie).

1872 rückt du Bois-Reymond in seiner Rede *über die Grenzen des Naturerkennens* Laplace Weltformel in den Brennpunkt der erkenntnistheoretischen Betrachtung.

Ideal des Laplaceschen Geistes ist nur ein beschränkter Teilaspekt der Wirklichkeit: *Denn diese letztere enthält weite und wichtige Bezirke, die der hier geschilderten Form der naturwissenschaftlichen Erkenntnis prinzipiell und für immer unzugänglich bleiben müssen.*⁵

Laut du Bois-Reymond ist das *Ingnorabimus* die einzige Antwort, die auf die Frage nach dem Wesen und Ursprung gegeben werden kann *Es gibt für uns kein anderes Erkennen als das mechanische, ein wie kümmerliches Surrogat für wahres Erkennen es auch sei, und demgemäß nur eine wahrhaft wissenschaftliche Denkform: die physikalisch-mathematische.*⁶

⁵Cassirer

⁶du Bois-Reymond: über die Grenzen des Naturerkennens

Widersprüchlichkeit des Bild des Laplaceschen Geistes

Erlangung der vollständigen Kenntnis des Weltzustandes

- empirisch: Durch Messung kann nur relative Erkenntnis erreicht werden. Die Maßgenauigkeit kann nie über eine bestimmte Grenze hinaus gesteigert werden.
- intuitiv: Eine solche Intelligenz müsste nicht aus dem Gegenwärtigen auf das Vergangene oder Zukünftige schließen. Sie besäße die vollständige, unmittelbare Anschauung der gesamten Zeitreihe.

Dennoch stellt das Bild eine Zusammenfassung der Weltsicht dar, aus der die philosophischen Systeme des klassischen Rationalismus entstanden sind.

Kausalforderung des Rationalismus: Identität von Mathematik und Natur.

Der Natur muß dieselbe Unfehlbarkeit zukommen, die sich in den Regeln des mathematischen Denkens ausdrückt, sonst wäre sie für das mathematische Denken undurchdringlich.

Leibniz, Descartes, Kepler und Galilei stimmten hierin überein.

Mathematische Begriffe als Urbilder der Wirklichkeit

Humes Kritik der Kausalität

- Mathematik kann dem Kausalbegriff keine Geltung verleihen:
 - Mathematik beschäftigt sich mit der Verbindung von Begriffen (relations of ideas)
 - Kausalität (Verhältniss zwischen Ursache und Wirkung) ist ein Realverhältniss (matter of fact)
 - matters of fact sind nur durch Beobachtung gegeben
- *Wenn die beiden Billardkugeln im Augenblick des Zusammenpralls, statt ihre Bewegungsrichtung zu ändern, vielmehr ihre Farben gegeneinander austauschten: so wäre das eine genau so viel und genau so wenig begreiflich wie das andere.*⁷
- Hume erklärt den Begriff der Kausalität psychologisch durch den Zwang der Gewöhnung

⁷Cassirer

Der Kausalitätsbegriff bei Kant

- auch hier wird die Ableitung des Kausalprinzips aus bloßen Begriffen abgelehnt
- Empirische Daten belehren uns nicht darüber warum etwas geschieht
- Lösungsansatz: Kausalität betrifft nicht unmittelbar die Dinge selbst, sondern die Erkenntnis.
- *Ich sehe also den Begriff der Ursache als einen zur bloßen Form der Erfahrung notwendig gehörigen Begriff ... sehr wohl ein; die Möglichkeit eines Dinges überhaupt aber, als einer Ursache, sehe ich gar nicht ein, und zwar darum, weil der Begriff der Ursache ganz und gar keine den Dingen, sondern nur der Erfahrung anhängende Bestimmung andeutet.*⁸
- **kritischer Determinismus:** Prinzip der empirischen Begriffsbildung.
- gegen Hume wendet Kant ein, dass die psychologische Determination die objektive Determination bereits voraussetzt.

⁸Kant, Prolegomena

- Der Grundsatz der Kausalität sagt nichts über das metaphysische Wesen der Dinge, sondern sagt lediglich aus, wie man von dem, was geschieht, einen bestimmten Erfahrungsbegriff bekommt.
- Der Bezug auf die Erfahrung ist für alle physikalischen Aussagen ein wesentliches Element
- Es können und müssen dennoch verschiedene Typen physikalischer Aussagen unterschieden werden.

Maßaussagen

- Erster Schritt im Übergang von der Welt des Gegebenen zur Welt naturwissenschaftlicher Erkenntnis
- Umsetzung der unmittelbaren Wahrnehmungsdaten in solche Bestimmungen, in die Begriffe von Maß und Zahl eingehen
- Maßaussagen der Physik sind nicht mit dem was uns in der einfachen Beobachtung gegeben ist identisch
- Übergang von der unmittelbaren sinnlichen Auffassung zur experimentellen Beobachtung und ihrer methodisch-systematischen Auswertung
- zufällige Schranken die durch unsere Sinnesorgane gegeben sind werden durch diesen Übergang aufgehoben

- Reduktion ist ein typischer Zug aller physikalischen Begriffs- und Urteilsbildung
 - Bsp. Weltmechanik (Newton): Die in der Natur vorhandenen Kräfte werden durch die Beschleunigung gemessen
- *Was die Physik einen Gegenstand nennt, das geht zuletzt in einen Inbegriff charakteristischer Zahlwerte auf. Kein Sein und keine Eigenschaft kann anders als durch die Angabe solcher charakteristischen Zahlen definiert werden. Indem wir auf diese Weise den Druck, das Volumen, die Temperatur eines Gases, die potentielle oder kinetische Energie eines Systems, die elektrische oder magnetische Feldstärke bestimmen, haben wir an diesen Bestimmungen das, was die Physik unter ihren verschiedenen Objekten versteht; wir brauchen es nicht hinter ihnen, als ein Abgesondertes, An-Sich-Seiendes, vorauszusetzen.*⁹

⁹Cassirer

Gesetzesaussagen

- dem wachsenden Umfang des Wissens entspricht eine fortschreitende intensive Zusammendrängung
- Seit Kepler, Gallilei, Descartes und Leibniz hat sich das wissenschaftliche Denken im mathematischen Funktionsbegriff ein ideales Mittel geschaffen.
- Es ist eine universelle Form gegeben, in die neuer Inhalt einströmen kann, ohne sie zu sprengen
- Beispiel: Fouriersche Formel
 - Mathematische Beschreibung im Zuge einer Theorie der Wärmeleitung (1822), die ganz auf der Vorstellung aufgebaut war, dass die Wärme als eine Flüssigkeit angesehen werden kann.
 - Erwies sich allerdings als völlig unabhängig von seinen hypothetischen Annahmen
 - Beim Übergang zur modernen kinetische Theorie konnte daher die Grundgleichung Fouriers beibehalten werden.
- Gesetzesaussagen behaupten eine exakte Beziehung zwischen verschiedenen Gruppen von Maßaussagen

Von den Maßaussagen zu Gesetzaussagen

- Übergang durch Induktionsschluss: Schluss von einigen Fällen auf viele, von vielen auf alle ist problematisch
- Problem: Mit welchem Recht kann über eine unbestimmte Anzahl von Einzelfällen überhaupt etwas ausgesagt werden
- Das Physikalische Experiment ist die einzig legitime Grundlage aller Gesetzaussagen
 - Voraussetzung: Was im Einzelexperiment festgestellt wurde, darf von Ort zu Ort, von Augenblick zu Augenblick übertragen werden.
 - *Es findet nicht eine Erweiterung innerhalb der räumlichzeitlichen Sphäre, sondern gewissermaßen eine Aufhebung dieser gesamten Sphäre, es findet der Fortgang in eine neue Dimension statt: und dies Änderung der Dimension ist es, die die Gesetzaussagen von den bloßen Maßaussagen unterscheidet.*¹⁰

¹⁰Cassirer

Bezug zum Kausalprinzip

- Wesentlicher Gehalt des Kausalprinzips nach Maxwell: *Der Unterschied zwischen zwei Ereignissen hängt nicht ab von dem reinen Unterschiede der Zeiten oder der Orte, in denen und an denen sie stattfinden, sondern nur von Unterschieden in dem Wesen, der Konfiguration oder der Bewegung der betreffenden Körper*¹¹
- Das Kriterium von Maxwell sollte noch durch das von Leibniz aufgestellte Kriterium des **Prinzips der Beobachtbarkeit** ergänzt werden.

¹¹Maxwell, Substanz und Bewegung

Prinzipien-Aussagen

- physikalische Forschung besteht aus mehr als daraus beobachtete Tatsachen zu Gesetzen zusammenzufassen.
- Prinzipien beziehen sich nicht direkt auf die Phänomene, sondern auf die Form der Gesetze, nach denen die Phänomene geordnet sind.
- Ein Prinzip ist nicht mit einem Naturgesetz gleich; es ist vielmehr Grundlage für Naturgesetze.
- es ist nicht als bloßes Kollektiv von Gesetzesaussagen zu verstehen
- Der Übergang zum Prinzip stellt erneut den Übergang zu einer neuen Dimension dar.

Beispiele

- Prinzip der kleinsten Wirkung
 - Heron von Alexandria hat es benutzt, um die Gesetze der Reflexion von Lichtstrahlen zu finden
 - Fermat benutzte es, um das Brechungsgesetz abzuleiten.
 - Leibniz setzte das Prinzip in der Mechanik ein
 - in der Form des Hamiltonschen Prinzips ist es geradezu zum Fundamentalsatz der Mechanik geworden.
- Kausalprinzip
 - Wird zur Erklärung des Trägheitsprinzips der Dynamik angewandt.
 - Körper müssen in ihrem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung verharren, da jede Abweichung grundlos sei und somit ein unmögliches Geschehen in sich einschließen

Zusammenfassung Die verschiedenen Stufen physikalischer Aussagen lassen sich in rein formaler und methodischer Hinsicht charakterisieren:

- Maßaussagen sind individuell
- Gesetzaussagen sind generell
- Prinzipien sind universell

Kausalprinzip der klassischen Physik nach Helmholtz

*Das Suchen nach immer allgemeineren Gesetzen ist ein Grundzug, ein regulatives Prinzip unseres Denkens. Eben dieses regulative Prinzip, und nichts anderes, ist das, was wir das Kausalgesetz nennen. In diesem Sinne ist es ein a priori gegebenens, ein transzendentes Gesetz: den ein Beweis desselben aus der Erfahrung ist nicht möglich. Aber auf der anderen Seite gilt, dass wir für seine Anwendbarkeit keine andere Bürgschaft als seinen Erfolg haben.*¹²

¹²Helmholtz, Die Tatsachen in der Wahrnehmung (1878)

- Vorrassage des Zukünftigen spielt bei Helmholtz keine wesentliche Rolle
- Er weicht hier von der Vorstellung ab, dass Voraussage wesentliche Bestimmung des Kausalgesetzes ist
- Das Wissen von der Gesetzlichkeit beweist und bewährt sich in der Vorrassage der Zukunft.
- Vorrassage und die auf sie gegründete technische Beherrschung der Natur ist nicht einziger und wesentlicher Gehalt.
- Vorrassage taugt auch nicht als einziges Kriterium, da auch in der klassischen Physik nach Planck kein Ereignis wirklich genau vorausgesagt werden kann.
- Dieses Dilemma wird durch die Auffassung als Erkenntnissatz aufgelöst.
- Wesentlich am Gedanken der Vorrassage ist die Extrapolation: der Geltungsbereich geht über die Beobachtungen, aus denen ein Gesetz abgeleitet wurde, hinaus.

Erklärung für den erkenntnistheoretischen Stellenwert der Vorraussag

- Klassische Physik hat es durchgehend mit dynamischen, d.h. deterministischen Gesetzen zu tun
- Hier kann die Vorraussage als prinzipiell möglich für alle Sätze angesehen werden
- Kann im weiteren Fortschreiten der Physik an dem Begriff der Kausalität festgehalten werden?

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

- Formulierung von Planck: Es gibt keine Zustandsänderung, deren einzige Ergebnisse das Abkühlen eines Körpers und das Heben eines Gewichtes sind
- Alle spontan (in eine Richtung) ablaufenden Prozesse sind irreversibel.
- Der Hauptsatz ist zunächst ein Fremdkörper im System der klassischen Mechanik und Elektrodynamik.
- Boltzman ordnet das Phänomen der Einseitigkeit Mechanik ein: Eine Umkehrung des Geschehens wäre möglich, aber extrem unwahrscheinlich.
- *Die Tatsache, dass in der Natur die Entropie einem Maximum zustrebt, beweist, dass bei jeder Wechselwirkung (Diffusion, Wärmeleitung usf.) wirklicher Gase die einzelnen Moleküle den Wahrscheinlichkeitsgesetzen gemäß in Wechselwirkung treten.*¹³

¹³Boltzman, Vorlesungen über Gastheorie

Eine neue Art von Gesetzmäßigkeit ist eingeführt

- Als ein Grundcharakter jedes Naturgesetzes war stets die Notwendigkeit angesehen worden
- Die Notwendigkeit, die keine Ausnahme zulässt, muss geopfert werden
- Es wird zu bloßen Wahrscheinlichkeitsgesetzen übergegangen
- Neben die **dynamischen** Gesetze treten die **statistischen** Gesetze

Auswege aus dem Dualismus von dynamischen und statistischen Gesetzen

- Nur wahrscheinlichkeitsfreie (deterministische) Gesetze (Planck):
 - dynamische Gesetze als die eigentlichen und unentbehrlichen Fundamente aller wahrhaften Naturerkenntnis
 - statistische Gesetze werden als bloß vorläufig angesehen
 - nur streng dynamische Gesetze genügen den Anforderungen unseres Erkenntnistriebs, statistische Gesetze bleiben unbefriedigend
- nur rein statistische (indeterministische) Gesetze (Exner, Schrödinger):
 - die Theorie hatte gelehrt, dass für alle irreversiblen Prozesse die statistischen Ansätze unentbehrlich seien
 - statistische Gesetze als umfassender Gattungsbegriff, der sich den dynamischen Gesetzen überordnet und sie als Spezialfall einschließt
 - wo man bisher Naturgesetze mit absoluter Gültigkeit zu erkennen glaubte, hat man es möglicherweise nur mit Durchschnittsgesetzen zu tun, die in zu kleinen Zeiten und Räumen ihre Geltung verlieren.

Folgen für dynamische Gesetze

- Ist es notwendig der Erkenntnis die Möglichkeit zu bestreiten, hypothetisch allgemeine und strenge Gesetze aufzustellen und deren Ergebnisse sodann durch das Experiment zu prüfen?
- Dynamische Gesetze stellen immer Idealisierungen dar, gelten also streng genommen nie.
- Dynamische Gesetze müssen lediglich das Kriterium der Nachprüfung bestehen
- Physikalische Erkenntnis ist ein kontinuierlicher Prozess
 - Erweiterung der Theorie ergibt neue Annäherung an die Wirklichkeit.
 - direkte Erfassung der Wirklichkeit ist im Rahmen der physikalischen Begriffsbildung nicht möglich
- Solange es keinen empirischen Beleg für die Unlänglichkeit der dynamischen Gesetze gibt, bleibt Exners Annahme der Durchschnittsgesetze leer
- Allerdings: dynamischer Ansatz ist nicht notwendig, hinter der strengen Kausalität kann eine statistische Regelmäßigkeit liegen

Wahrscheinlichkeit

- Die Erklärung der apriorischen Wahrscheinlichkeit durch den Quotienten aus der Anzahl der günstigen Fälle durch die Anzahl der gleichmöglichen Fälle läuft auf einen Zirkel hinaus.
- im erkenntnistheoretischem Sinne kann der Begriff der Wahrscheinlichkeit den der objektiven Wahrheit niemals ersetzen, weil er auf diesem aufgebaut ist.
- Wahrscheinlichkeitssätze werden in den Naturwissenschaften objektiv als Aussagen über die relative Häufigkeit bestimmter Ereignisse innerhalb einer Ereignisfolge gedeutet.
- von Mises definiert den Begriff des Kollektivs als einen Wiederholungsvorgang bei dem gilt:
 - Der Grenzwert der relativen Häufigkeit besteht
 - Regellosigkeits-Postulat
- Bei einem derartigen Kollektiv handelt es sich nicht um einen empirischen Gegenstand, sondern um einen ähnlich idealisierten Begriff, wie etwa den der Kugel

Kollektiv

- statistische Feststellung ist keine ungenaue Feststellung: Ein Kollektiv enthält als solches keinerlei Ungenauigkeit
- ein Kollektiv besteht aus einer Folge exakter Beobachtungen
- die Statistik kann erst beginnen, wenn eindeutige und scharfe Einzelbeobachtungen vorliegen
- Begriffsbildung des Kollektivs ist mit dem des galileischen Begriffs eines sich selbst überlassenen Körpers vergleichbar
- Forderungen der Begriffe werden durch empirische Inhalte nur angenähert.

allgemeiner Kausalsatz Der allgemeine Kausalsatz kann je nach Betrachtung notwendig oder zufällig genannt werden.

- notwendig, in dem Sinne, dass jede besondere empirische Aussage auf ihn angewiesen ist
- er geht allen Erfahrungsurteilen voran
- zufällig in dem Sinne, dass das Ganze der Erfahrung, auf das er sich stützen muss, selbst nur faktisch gegeben ist

Die Begriffe **Zufall** und **Gesetzlichkeit** stehen keineswegs in kontradiktorischer Gegensätzlichkeit

In den Gebieten, in denen der Begriff des **Zufalls** eine klar umrissene Bedeutung hat, sthet er nicht im Widerstreit zum **Kausalitätsbegriff**

Vereinbarkeit der Begriffe *Aus alledem ergibt sich, dass Kausalität und Wahrscheinlichkeit, Gesetzlichkeit und Zufall nicht nur nebeneinander bestehen können, sondern nebeneinander bestehen müssen, wenn wir das Geschehen so vollständig als möglich bestimmen wollen. Die Kausalität bezieht sich hierbei innerhalb der klassischen Physik im wesentlichen auf die Erkenntnis des Ablaufs des Geschehens; die Wahrscheinlichkeit auf die Kenntnis der Anfangsbedingungen. Aus beiden vereint resultieren die Lehrsätze der statistischen Mechanik, die strenge Folgen der gemachten Annahmen, in ihrer Anwendung auf das Naturgeschehen aber das Prototyp einer physikalischen Hypothese sind.*¹⁴

¹⁴Vgl. Smoluchowski, Über den Begriff des Zufalls und den Ursprung der Wahrscheinlichkeitsgesetze in der Physik

Das Kausalproblem der Quantentheorie

- Einführung des elementaren Wirkungsquantums durch Planck bricht Grundvoraussetzung der klassischen Theorie
- Planck bemüht sich, den Gegensatz auf ein Mindestmaß zu beschränken
- Über die anfängliche Schranke wird aber bald hinausgegangen: Beispielsweise durch die Bohrsche Theorie
- Allgemein vollzieht sich eine methodisch bedeutsame Entwicklung: das anfängliche **Quantengesetz** wird zum **Quantenprinzip**
- es ist nicht länger auf Einzelgebiete der Physik beschränkt, sondern wird als ein Postulat der Naturerkenntnis überhaupt gebraucht.

Unbestimmtheitsrelation

- Problematik auf der Stufe der Maßaussagen tritt auf
- Die Unbestimmtheits-Relation betreffen die Unsicherheiten, die bei der Übertragung eines Ereignisses aus der Sinnenwelt in das physikalische Weltbild, sowie der Rückübertragung aus dem letzteren in die erste entstehen.
- Diese Unsicherheit ist nicht durch eine Verbesserung der Messtechnik zu beheben
 - Durch die Abhängigkeit vom Beobachtungsmittel ist es prinzipiell verwehrt, Aussagen zu machen, die ein gewisses Maß an Bestimmtheit überschreiten
 - Beispiel: Die Ortsbestimmung eines Elektrons wird umso genauer, je kleiner die Wellenlänge des benutzten Lichtes ist. Aber eine geringere Wellenlänge führt zu einem stärkeren Compton-Effekt. Hieraus folgt, dass es prinzipiell nicht möglich ist, gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons zu messen.
 - Es wird keine Schranke der Experimentiertechnik sondern eine Schranke der physikalischen Begriffsbildung aufgezeigt

Bedeutung für das Kausalprinzip

- Heisenberg erklärt, dass durch die Einführung der Unbestimmtheits-Relation die Ungültigkeit des Kausalgesetzes erwiesen werde.
- Born betont, dass einer deterministischen Theorie, gemäß der der Ablauf des Geschehens in einem System durch den Zustand des Systems zu einer Anfangszeit bestimmt sei, jede Anwendungsmöglichkeit fehlen würde.
- Das Kausalgesetz scheint leer und die Physik prinzipiell indeterministisch

- Schrödinger stellte fest: *Wenn es sich auch in der Quantenmechanik im allgemeinen um Wahrscheinlichkeitsaussagen handle, diese Aussagen doch, auf der anderen Seite, durch eine besondere Genauigkeit ausgezeichnet seien.*
- Soll der Wissenschaftscharakter der theoretischen Physik aufrechterhalten werden, kann nicht auf die Deckung für ihre Begriffe und Urteile überhaupt verzichtet werden
- die moderne Atomphysik muss gewisse letzte, objektiv-gültige Grundbestimmungen besitzen
- Rückkehr zu einem System dynamischer Gesetze ist unmöglich
- statistische Gesetze müssen als eigener und fundamentaler Typ physikalischer Aussagen anerkannt werden.

- Die Quantenmechanik beinhaltet das Resultat, dass es eine **universelle Naturkonstante** gibt, die allem Naturgeschehen ihren Stempel aufdrückt
- das elementare Wirkungsquantum bezeichnet den festen Rahmen, in den sich die Aussagen der Quantentheorie einordnen
- aus diesem Rahmen des *quantentheoretischen Determinismus* treten auch die Unbestimmtheits-Relationen nicht hinaus
- in allen Fällen, in denen in der klassischen Theorie Relationen zwischen Größen bestehen die wirklich alle exakt meßbar sind, bleiben die exakten Relationen auch in der Quantentheorie gültig (Impuls- und Energiesatz)
- das kausale Denken wird auch in der Quantentheorie benutzt (so etwa bei dem Compton-Effekt, der bei der Ableitung der Unbestimmtheitsrelation eine Rolle spielt)

Beibehaltung des Kausalprinzips

- Einführung einer einschränkenden Bedingung:
 - Die Werte, die in die Kausalrelation eingesetzt werden, müssen zulässige Werte sein
 - Nur solche Werte, die durch ein gewisses Messungsverfahren bestimmbar sind, sind zulässig
 - der legitime Gebrauch bleibt auf eine physikalisch-faßbare Bedeutung eingeschränkt.
- Kausalprinzip ist nichts anderes als eine Anweisung zur Bildung bestimmter Erfahrungsbegriffe (Kant)
- Beim Übergang zu einem neuen Problemkreis der naturwissenschaftlichen Erkenntnis müssen die alten Begriffe eine neue Bestimmung und Dedeutung bekommen, um widerspruchsfrei anwendbar zu sein
- die Hinzunahme der Forderung der Beobachtbarkeit ist nun zwingend geworden

Das Problem der Übersetzung

- Man kann von den Maßaussagen zu strengen Gesetzesaussagen übergehen
- Maßaussagen bleiben aber mit einer grundsätzlichen Unbestimmtheit behaftet
- die Übersetzung der Daten der Sinnenwelt in die physikalische Welt, und die Rückübersetzung, lässt sich nicht mehr in der Weise der klassischen Physik vollziehen
- Allerdings: der Inhalt unseres empirischen Wissens ist der Inbegriff der Beobachtungen, die wir zu bestimmten Ordnungen zusammenfassen und die wir, dieser Ordnung gemäß, durch theoretische Gesetzesbegriffe darstellen.
- Es gibt eine objektive Wirklichkeit und sofern es Gesetzlichkeit gibt.
- Anders als unter den Bedingungen der physikalischen Erkenntnis, sowohl ihren allgemeinen Bedingungen wie jenen besonderen Bedingungen die für ihre Messungen gelten, kann nicht von einem physikalischen Sein gesprochen werden

Das Problem der Kontinuität

- Kontinuität und Kausalität sind in der klassischen Physik miteinander verbunden
- In früheren Formulierungen des Kausalitätsprinzips spielte die Zeit im Sinne eines Nacheinander eine Rolle
- Hiermit wird aber die Bedingung der Stetigkeit eingeschlossen
- Durch die Quantentheorie kann die Kausalität nicht länger der Stetigkeitsforderung genügen
- Dadurch folgt allerdings nicht die Ungültigkeit der Kausalforderung
- Kausalbegriff erfordert ständige Anpassung
 - mit der Newtonschen Mechanik ging das physikalische Denken dazu über, die Bedingung der unmittelbaren Nachbarschaft von Ursache und Wirkung aufzugeben
 - die Verknüpfung mit der Anschauung des stetigen Raumes wurde gelöst
 - Beim Übergang zur Feldtheorie musste der Kausalbegriff als Reaktion auf die geänderte Substanztheorie ebenfalls weiter entwickelt werden.



Erhard Scheibe: *VII. Kausalität, Determinismus, Wahrscheinlichkeit* in *Die Philosophie der Physiker*, Beck, München 2006.



Bruno Cassirer: *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik* in *Zur modernen Physik*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, Darmstadt 1957.



Erwin Schrödinger, *Was ist ein Naturgesetz? - Beiträge zum naturwissenschaftlichen Weltbild*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, Darmstadt 1967.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit.