

Franz Josef Burghardt

Das Kausalgesetz in der Physik

erschienen in:
Physik und Didaktik 4 (1983), S. 285-297

Franz J. Burghardt

Das Kausalgesetz in der Physik

Die Forschungen der letzten fünfzig Jahre haben gezeigt, daß der Versuch einer Anwendung klassischer Begriffe und Vorstellungen auf Mikrosysteme scheitert; zur Deutung der beobachtbaren Phänomene ist vielmehr eine grundsätzliche Änderung der sprachlichen und logischen Voraussetzungen von Theorienbildung innerhalb der Physik gegenüber klassischen Vorstellungen erforderlich. Neben der Verallgemeinerung der klassischen Logik, die als Spezialfall der Quantenlogik anzusehen ist, stellt zweifellos die Einschränkung des Kausalgesetzes ein besonders interessantes Strukturmerkmal der Quantenmechanik dar.

Zunächst wird der Gegensatz zwischen Leibniz und Kant einerseits sowie den Empiristen andererseits zum Thema „Kausalität“ herausgestellt, der bei der Diskussion über das Kausalgesetz in der Quantenmechanik wieder aufgelebt ist. Leider wird häufig nicht beachtet, daß es in der Physik seit Galilei und Newton nicht mehr um die im „Wesen“ der Dinge begründeten Zusammenhänge der Naturphänomene geht, sondern ausschließlich um deren funktionale Beziehungen im Rahmen einer physikalischen Theorie.

Innerhalb einer solchen Theorie wird das Kausalgesetz durch Bewegungsgleichungen ausgedrückt. Allerdings erweist sich das klassische Kausalgesetz wegen der prinzipiellen Unvollständigkeit der Information über ein Mikrosystem in der Quantenmechanik als unanwendbar bzw. falsch; es ist durch ein quantenmechanisches Kausalgesetz zu ersetzen.

Einige Forderungen an den Physikunterricht werden zur Diskussion gestellt.

„Ich glaub', ich hab' das Kausalgesetz widerlegt.“

(W. Heisenberg zu C.F. von Weizsäckers während einer Taxifahrt im April 1927 in Berlin [8, S. 94])

1. Einleitung

Wenn ich direkt in die Sonne schaue, dann werde ich geblendet; warum eigentlich?

Für einen guten (!?) Physiker ist dies kein Problem; er wird sofort eine Energiebetrachtung der Sonnenstrahlung anstellen, sie zur Empfindlichkeit der Netzhaut in Beziehung setzen und schließlich eventuell noch einige physiologische Erkenntnisse benutzen.

Ein Philosoph dagegen dürfte wesentlich zurückhaltender reagieren, wenn man diese Frage an ihn richtet, und das nicht nur, weil ihm in der Regel Kenntnisse aus Physik und Medizin fehlen. Er könnte z.B. die Wenn-dann-Beziehung als eine „sehr häufig gemachte Erfahrung“ kennzeichnen und ihre Notwendigkeit grundsätzlich bestreiten; besonders Carnap hat in seinen Werken immer wieder die Kontingenz empirisch gewonnener Implikationen betont und sie der Notwendigkeit logischer Implikationen gegenübergestellt [4]. Die Warum-Frage wird unseren Philosophen ferner zu einer ausgiebigen Reflexion über den kausalen Zusammenhang zwischen Prämisse und Konklusion der vorangehenden Implikation bzw. über Ursache (in-die-Sonne-sehen) und Wirkung (geblendet-werden) veranlassen. Je nach erkenntnistheoretischem Standpunkt wird er wohl eine der in der Philosophiegeschichte entwickelten Positionen zum Thema „Kausalgesetz“ vertreten, sei es, daß er dieses als a posteriori – aufgrund von Erfahrung – in speziellen Fällen gefunden oder als a priori – vor jeder Erfahrung – gültig annimmt.

Aber zurück zu unserem Physiker, den wir, angeregt durch die Überlegungen des Philosophen, bitten, seinen Begründungszusammenhang einmal darzulegen. Dabei stellt sich

schnell heraus, daß der Naturwissenschaftler eine mathematisierte Theorie benutzt, deren Begriffe und Grundgesetze zwar aufgrund von Erfahrungen gebildet worden sind, deren Formalismus aber streng logisch im Sinne der Mathematik aufgebaut ist. In unserem Beispiel kann man etwa die Maxwellsche Elektrodynamik zur Behandlung der Sonnenstrahlung heranziehen oder, falls man eine Argumentation mit Energiequanten bevorzugt, die Diracsche Quantenelektrodynamik. Damit aber reduziert sich für den Physiker die Frage nach dem kausalen Zusammenhang zweier physikalisch zu beobachtender Phänomene („Ereignisse“) auf die Art der Beschreibung dieses Zusammenhangs innerhalb der von ihm benutzten Theorie. Dabei wird es nun nicht mehr auf die Art der Verknüpfung der Ereignisse ankommen, denn diese ist in jedem Fall eine mathematische Folgerung; vielmehr wird entscheidend sein, wie überhaupt Ereignisse innerhalb der jeweiligen Theorie beschrieben werden, und zwar entscheidend dafür, ob bzw. inwieweit der Zusammenhang Ursache-Wirkung noch kausal genannt werden kann.

Eine Untersuchung über die Gültigkeit eines Kausalgesetzes in der Physik muß daher zwangsläufig mit einer Analyse der Begriffsbildung der jeweiligen Theorie verbunden sein.

2. Kausalität in der Philosophie

Zur besseren Einordnung der in Abschnitt 3 bzw. 4 folgenden Überlegungen sei zunächst auf die Einstellung einiger Philosophen zum Begriff „Kausalität“ hingewiesen.

2.1. Aristoteles

Die aristotelische Unterscheidung der Ursachen von Dingen bzw. Sachverhalten in

- a) causa materialis (Material)
- b) causa formalis (Form, Struktur)
- c) causa finalis (Zweck, Sinn)
- d) causa efficiens (das die Entstehung des Dinges bzw. Sachverhaltes Bewirkende)

hat lediglich historische Bedeutung. Während in der christlichen Glaubenslehre mit ihrem teleologischen Blickwinkel die causa efficiens völlig der causa finalis, nämlich der Erfüllung des göttlichen Willens untergeordnet war, ist für Philosophie und Naturwissenschaft seit Beginn der Neuzeit lediglich die causa efficiens von Bedeutung.

2.2. Leibniz

In der Monadologie (§ 32) von Leibniz finden wir das „Prinzip des zureichenden Grundes, kraft dessen wir erwägen, daß keine Tatsache wahr seiend oder existierend, keine Aussage wahrhaftig befunden werden kann, ohne daß ein zureichender Grund sei, warum es so und nicht anders ist . . .“ Das daraus folgende universelle Kausalgesetz beruht nach Leibniz auf der inneren Struktur der Monaden, während die weniger philosophierenden zeitgenössischen Wissenschaftler dieses Gesetz als selbstverständlich ansahen.

2.3. Empirismus-Kritik (Hume, Wittgenstein, Carnap)

In seiner Untersuchung über den menschlichen Verstand (VII. Abschnitt, 1. Teil) schreibt Hume 1748, „daß wir nur durch Erfahrung den häufigen Zusammenhang von Gegenständen kennenlernen, ohne je etwas einer Verknüpfung ähnliches erfassen zu können.“

Damit wird zwar nicht die Existenz eines Kausalgesetzes bestritten, aber seine Gültigkeit von der Erfahrung abhängig gemacht. Die Behauptung eines kausalen Zusammenhangs ist eine Feststellung a posteriori; sie ist nicht aus einem vor jeder Erfahrung gültigen Prinzip ableitbar.

Diese Auffassung wurde seit Mach auch von den Neopositivisten, insbesondere von den Mitgliedern des Wiener Kreises vertreten. So finden wir in Wittgensteins *Tractatus logico-philosophicus* 1921 (5.135f.): „Auf keine Weise kann aus dem Bestehen irgendeiner Sachlage auf das Bestehen einer von ihr gänzlich verschiedenen Sachlage geschlossen werden. Einen Kausalnexus, der einen solchen Schluß rechtfertigt, gibt es nicht. Die Ereignisse der Zukunft können wir nicht aus den gegenwärtigen erschließen. Der Glaube an den Kausalnexus ist der Aberglaube.“

Damit wird scheinbar der Sinn von physikalischen Voraussagen bestritten und auf die — nach Wittgensteins Meinung — rein empirische Basis physikalischer Aussagen verwiesen. Bei Carnap wird dies präzisiert: „Eine Aussage über eine Kausalbeziehung ist eine Aussage in der Form eines Bedingungssatzes. Sie beschreibt eine beobachtete Regelmäßigkeit der Natur und nicht mehr [4, S. 201]. Weil ein Naturgesetz aussagt, daß die Regelmäßigkeit für alle Zeiten gilt, kann man es nicht mit absoluter Sicherheit behaupten. Es kann stets durch eine zukünftige Beobachtung als falsch erwiesen werden.“ [4, S. 199]

Somit bestreitet Carnap die Notwendigkeit einer Kausalbeziehung in der Physik, nicht aber den Sinn physikalischer Vorhersagen. „Kausalbeziehung heißt Voraussagbarkeit. Das bedeutet nicht tatsächliche Voraussagbarkeit, weil niemand alle relevanten Tatsachen hätte kennen können. Es bedeutet Voraussagbarkeit in dem Sinn, daß man das Ereignis hätte voraussagen können, wäre die ganze vorhergehende Situation bekannt gewesen. Wenn ich also das Wort „Voraussagbarkeit“ verwende, so meine ich es in einem etwas metaphorischen Sinn. Es behauptet nicht die Möglichkeit, daß irgendwer das Ereignis tatsächlich voraussagt, sondern vielmehr potentielle Voraussagbarkeit.“ [4, S. 192]

D.h. eine physikalische Voraussage ist sinnvoll, kann aber falsch sein wegen der Kontingenz der den benutzten Naturgesetzen zugrundeliegenden Beobachtungen (als Wenn-dann-Aussagen) oder der Unvollständigkeit der Information.

2.4. Kant

In seiner Kritik der reinen Vernunft verteidigt Kant 1781/87 die Gültigkeit a priori des Kausalgesetzes gegen die Angriffe Humes, wobei er folgende Formulierungen benutzt:

a) Grundsatz der Erzeugung (Ausc. A, 189)

„Alles, was geschieht (anhebt zu sein), setzt etwas voraus, worauf es nach einer Regel folgt.“

b) Grundsatz der Zeitfolge nach dem Gesetze der Kausalität (Ausc. B, 232)

„Alle Veränderungen geschehen nach dem Gesetze der Verknüpfung der Ursache und Wirkung.“

Nach Kant ist dieses Kausalgesetz a priori, also vor jeder Erfahrung gültig, da es zu den Bedingungen für die Möglichkeit gehört, daß überhaupt Dinge und Vorgänge in unserer Erfahrung auftreten. Ob dieser Beweis als vollständig durchgeführt gelten kann, ist viel diskutiert worden (Näheres z.B. bei [11, S. 145ff.] und [19, S. 54ff.]); hier sei nur eine seiner wesentlichen Prämissen erwähnt: Die Objekte unserer Erfahrung sind durchgängig bestimmt, d.h. sämtliche beobachteten Eigenschaften lassen sich problemlos ohne Wider-

sprüche dem Objekt zuordnen. Diese Voraussetzung ist zwar in der klassischen Physik, nicht aber in der Quantenmechanik erfüllt, denn bekanntlich kann man nicht zugleich die Ergebnisse einer Messung von Ort und Impuls einem Mikroobjekt zuordnen.

3. Klassische Physik (Klassische Mechanik und Klassische Elektrodynamik)

3.1. Aufbau einer klassischen physikalischen Theorie

Schritt 1: Grundlage jeder Form von Naturwissenschaft ist eine vorwissenschaftliche Erfahrung, etwa die Wiederholung der Vollmondphasen oder die regelmäßige Bewegung der Sterne. Über (primäre) Meßprozesse kann man aus dieser Erfahrung heraus zu Begriffen wie Zeitpunkt, Ort, Bahn etc. und schließlich zu wissenschaftlicher Erfahrung kommen, die durch Inter- und Extrapolation Vorhersagen (etwa Planetenpositionen) gestattet und in Form von Gesetzen formuliert werden kann. (Vgl. [12, S. 84 ff.])

Schritt 2: Aufgrund der durch (primäre) Meßprozesse gewonnenen Begriffe und Erfahrungen kann eine Theorie konstruiert werden, die aus einem mathematischen Kalkül und einer physikalischen Interpretation dieses Kalküls besteht.

Schritt 3: Die gewonnene Theorie gestattet es nicht nur, bereits bekannte Phänomene zu beschreiben, sondern sie gibt Anlaß zu sekundären Meßprozessen, die unsere wissenschaftliche Erfahrung bereichern können. Man denke etwa an die Maxwell-Theorie, deren Gleichungen nicht nur bereits bekannte Gesetze (z.B. von Coulomb, Ampere, Oersted) in höchst eleganter Form zusammenfaßten, sondern auch die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz verursachten. Die durch sekundäre Meßprozesse gewonnene Erfahrung muß ihrerseits wiederum durch die Theorie beschreibbar sein, die so eine Verifikation erfährt. (Wer den Popperschen Begriff von Verifikation bevorzugt, der möge hier „... eine Bestätigung erfährt“ einsetzen.)

Ein wesentliches Merkmal der klassischen physikalischen Theorien ist die Voraussetzung, daß ein System S durch fortgesetzte Meßprozesse vollständig beschrieben werden kann, d.h.: Von jeder Eigenschaft E kann festgestellt werden, ob sie dem System S zukommt oder nicht. Man sagt auch, daß alle Eigenschaften objektivierbar (auf S beziehbar) sind. Zwar ist damit eine wesentliche Prämisse im Beweis der Gültigkeit a priori des Kausalgesetzes bei Kant erfüllt, doch muß zunächst einmal präzisiert werden, was in einer klassischen physikalischen Theorie überhaupt unter „Kausalgesetz“ verstanden wird.

3.2. Kausalgesetz in klassischen Theorien

Ein „Ereignis“ im System S zum Zeitpunkt t_0 in der klassischen Physik ist nichts anderes als das Vorliegen eines bestimmten Sachverhalts, d.h. allen dem System S zukommenden Observablen – etwa die generalisierten Koordinaten und Impulse im Hamilton-Formalismus der Mechanik oder E und B in der Maxwell-Theorie – werden in t_0 bestimmte Werte zugeordnet. Ein Ereignis ist also ein (klassischer) Zustand, der das System S zum Zeitpunkt t_0 vollständig beschreibt. Die Fundamentalgleichungen der klassischen Theorien, also etwa die Hamilton- und Maxwell-Gleichungen, gestatten es dann, den Zustand des Systems S zu jedem späteren Zeitpunkt $t > t_0$ anzugeben.

Satz: Ist der Anfangszustand $\varphi(t_0)$ eines Makrosystems S , das durch eine klassische Theorie beschreibbar ist, bekannt, so ist durch die die Evolution von S darstellenden Differentialgleichungen dieser Theorie der Zustand $\varphi(t)$ von S zu jedem späteren Zeitpunkt bekannt.

Genau dies ist die Formulierung des Kausalgesetzes im Rahmen einer klassischen physikalischen Theorie.

3.3. Statistik in klassischen Theorien

Bekanntlich wird zur Beschreibung eines Makrosystems S_F mit sehr vielen Freiheitsgraden in der klassischen Mechanik eine statistische Darstellung benutzt, z.B. in der kinetischen Gastheorie nach Boltzmann, wo über die genaue Lage der einzelnen Gasmoleküle nichts ausgesagt wird (was auch physikalisch uninteressant ist). Dieser auf dem Begriff des Ensembles aufbauende Formalismus erfuhr seine präzise mathematische Fundierung durch die Wahrscheinlichkeitstheorie von Kolmogoroff.

Im Rahmen der statistischen Mechanik ist der Anfangszustand $\varphi(t_0)$ nur unvollständig bekannt und die Bewegungsgleichungen liefern daher nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die späteren Zustände $\varphi(t)$. Die Notwendigkeit einer statistischen bzw. wahrscheinlichkeitstheoretischen Beschreibung des Systems S_F ergibt sich also aus einem praktisch vorliegenden Defizit an Information über die genaue Lage des Anfangszustands $\varphi(t_0)$ von S_F im Phasenraum, jedoch wird dieses Informationsdefizit als prinzipiell behebbar angenommen: Ein „Laplacescher Dämon“, der über eine geeignete Registriermethode verfügt, könnte den Zustand $\varphi(t_0)$ exakt bestimmen und dann vermittelst der klassischen Bewegungsgleichungen jeden späteren Zustand $\varphi(t)$ von S_F exakt berechnen.

Satz: In einer klassischen statistischen Theorie ist die Evolution eines Systems S_F mit sehr vielen Freiheitsgraden lediglich aus praktischen, nicht aber aus prinzipiellen Gründen nur wahrscheinlichkeitstheoretisch zu beschreiben.

Da also objektiv (etwa durch den Laplaceschen Dämon) eine vollständige Beschreibung von S_F zu jedem Zeitpunkt möglich ist, gilt auch in einer klassischen statistischen Theorie uneingeschränkt das Kausalgesetz, wie es in Abschnitt 3.2. formuliert wurde.

4. Quantenmechanik

4.1. Historische Entwicklung

Durch die Hypothese der Existenz von Energiequanten konnte Planck in genialer Weise die „Ultraviolett katastrophe“ des Strahlungsgesetzes von Rayleigh-Jeans beseitigen; das heute nach ihm benannte Strahlungsgesetz enthält sowohl das von Rayleigh-Jeans als auch das von Wien als Grenzfälle [17, S. 237 ff.]. Allerdings konnte sich die Plancksche Hypothese erst durchsetzen infolge der Arbeiten von Einstein zum Photoeffekt und der von Bohr und Sommerfeld zum Atombau. Schließlich konnten die theoretischen Arbeiten von Schrödinger (Wellenmechanik), Heisenberg (Matrizenmechanik) und Born (Wahrscheinlichkeitsinterpretation) durch den spektraltheoretischen Formalismus im Hilbertraum durch v. Neumann [14] mathematisch befriedigend und höchst elegant zusammengefaßt werden.

4.2. Frühe Auseinandersetzungen um eine Interpretation des quantenmechanischen Formalismus

Vor dem Hintergrund des erst im Entstehen begriffenen mathematischen Formalismus der Quantenmechanik kam es in den 20er und 30er Jahren dieses Jahrhunderts zu sehr heftigen Auseinandersetzungen um die Frage, wie man die entstehende Theorie zu interpretieren habe. Sowohl bei dem Gegensatz zwischen Heisenberg und Schrödinger [8, S. 81 ff.] als auch bei dem auf hohem wissenschaftlichen Niveau ausgetragenen Streit zwischen Bohr und Einstein [10, S. 108 ff.] lassen sich die Kontrahenten in zwei Gruppen einteilen:

a) Auf der einen Seite stehen Schrödinger und Einstein, fest verwurzelt in der klassischen Vorstellung, alle physikalischen Phänomene dieser Welt seien – als Vorgänge im Raum-Zeit-Kontinuum – prinzipiell vollständig beschreibbar. Eine Theorie, deren Grundgrößen nicht mehr Raum und Zeit, sondern Unterräume in einer algebraischen Struktur bzw. prinzipiell unvollständige Aussagen über ein System sind, waren für diese Realisten Irrwege der Physik (Einstein: „Der liebe Gott würfelt nicht!“).

b) Auf der anderen Seite steht die Kopenhagener Schule, an der Spitze Bohr, der nur noch von Beobachtungen, nicht mehr aber von Objekten spricht, denen diese Beobachtungen zuzuweisen sind; seine „Komplementarität“ wird zwar immer wieder diskutiert – man ist sich bis heute nicht darüber einig, was Bohr wohl damit gemeint hat –, ist aber in jüngster Zeit für die Physik praktisch bedeutungslos. Lediglich der (leider nur sehr langsam aus der Literatur verschwindende) Begriff „Welle-Teilchen-Dualismus“ ist noch ein Relikt jener Bohrschen Ideen, der besonders gerne in sozialistisch gefärbten Arbeiten zu Grundlagenfragen der Physik breitgetreten wird, weil man in ihm einen Ausdruck dialektischen Denkens zu erkennen glaubt.

Bohrs junger Freund und Musterschüler Heisenberg geht neue Wege: In Analogie zur Hamilton-Jacobi-Theorie der klassischen Mechanik entwickelt er eine Matrizenmechanik, die Wellen- und Teilchenvorstellung im Bereich der Mikrosysteme gleichermaßen überwindet und deren Unschärferelation heute zu den fundamentalen Gleichungen der Physik gehört.

4.3. Heutige Situation

Die Quantenmechanik (und ihre Erweiterungen, die Quantenelektrodynamik und die Quantenchromodynamik) in der Formulierung von v. Neumann und Dirac bilden gemeinsam mit der Relativitätstheorie die Basis der modernen Theoretischen Physik. Ihr Formalismus hat sich über Jahrzehnte hinweg sowohl bei der theoretischen Erfassung von Beobachtungen als auch zur Vorhersage von Phänomenen der Mikrosysteme bewährt.

Der Vorwurf von Einstein aus dem Jahre 1935, die Quantenmechanik sei „unvollständig“ (vgl. [10, S. 159 ff.]), führt zwar gelegentlich zu Versuchen, den quantenmechanischen Formalismus durch sogenannte „verborgene Parameter“ zu ergänzen, die eine vollständige Beschreibung des Mikrosystems im klassischen Sinne ermöglichen sollen, doch sind bislang alle derartigen Versuche gescheitert [11, S. 157 ff.] [15].

Die Grundlagenforscher in der Physik nehmen daher heute fast ausschließlich einen pragmatischen Standpunkt ein: Ausgangspunkt aller Überlegungen zur Quantenmechanik ist die algebraische Struktur des Hilbertraumes bzw. der orthokomplementäre quasimodulare Verband seiner Unterräume (vgl. [13]). Während einige Forscher (z.B. Mittelstaedt, Dalla Chiara und van Fraassen) mehr die Unterräume als mathematische Darstellung von Aus-

sagen über ein Mikrosystem in den Vordergrund stellen, was letztlich zu sprachlich-logischen Untersuchungen führt, untersuchen andere mehr die physikalische Realisierbarkeit von elementaren Aussagen (z.B. Ludwig) oder betrachten Einzelheiten und Zusammenhänge verschiedener Verbandsdarstellungen, was zu detaillierten algebraischen Untersuchungen führt. Alle diese Überlegungen werden heute unter der Bezeichnung Quantenlogik zusammengefaßt [1], [9].

4.4. Unvollständigkeit der Information

In klassischen Theorien wird vorausgesetzt, daß ein betrachtetes System S grundsätzlich durch einen Anfangszustand $\varphi(t_0)$ vollständig beschreibbar ist (vgl. Abschnitt 3.1.); diese Objektivierung aller Eigenschaften eines Systems würde in der Quantenmechanik zu Widersprüchen führen [11, S. 133ff.]. Man denke etwa an die Heisenbergsche Unschärferelation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar,$$

die bei auf ein individuelles System bezogener Interpretation eine gleichzeitige Kenntnis von Ort und Impuls verbietet.

Im Hilbertraum-Formalismus wird der allgemeine Zustand eines Systems repräsentiert durch einen positiv definiten, selbstadjungierten Operator W mit Spur 1; im Spezialfall $W = W^2$ stellt W einen Projektor P_φ auf einen eindimensionalen Unterraum $[\varphi]$ dar und wird reiner Zustand genannt. Den Observablen entsprechen selbstadjungierte Operatoren A , die – im Falle eines diskreten Spektrums – durch eine Summe von Projektoren dargestellt werden können:

$$A = \sum_j a_j P_j^A \quad \text{mit } a_i \neq a_j \text{ für } i \neq j \text{ und } \sum_j P_j^A = 1$$

Im Falle einer Messung („ideale Messung erster Art“) der Observablen A ändert sich i.a. der Zustand des Systems: W geht über in ein sogenanntes Lüders-Gemisch ($W; A$).

$$W \longrightarrow (W; A) = \sum_j P_j^A W P_j^A$$

Falls aber W bei dieser Messung erhalten bleibt, also

$$W = \sum_j P_j^A W P_j^A$$

gilt, so sagt man „ A ist in Bezug auf W objektiv“ [22, S. 15ff.] oder „Das System ist im Zustand W in Bezug auf A präpariert.“

Bei der nachfolgenden Messung einer Observablen A' kann nun die Präparation in Bezug auf A zerstört werden, d.h. A ist nicht mehr objektiv in Bezug auf $(W; A')$. Falls man aber durch geeignete Messungen von einer Observablen-Menge M gezeigt hat, daß alle $B \in M$ objektiv in Bezug auf W sind und die Messung jeder weiteren Observablen $B' \notin M$ den Zustand W verändern würde (also $W \longrightarrow (W; B') \neq W$), so verfügt man über eine maximale Information. M ist dann eine maximale Menge von kommensurablen Observablen.

Statt einer Messung von A kann man auch die zu den einzelnen Projektoren P_j^A gehörigen Eigenschaften untersuchen, die, da die P_j^A nur die Eigenwerte 0 und 1 haben, dem System zukommen oder nicht.

Die Unvollständigkeit der Information legt es auch nahe, in der Sprache der Quantenmechanik modale Begriffe wie „notwendig“ oder „möglich“ zu benutzen und Verknüpfungen von modalen Aussagen zu untersuchen [3].

4.5. Statistik in der Quantenmechanik

Die soeben angesprochene prinzipielle Unvollständigkeit der Information über ein Mikrosystem führte schon frühzeitig durch Born zu einer Wahrscheinlichkeitsdeutung gewisser Teile der Quantentheorie. So wird z.B. im DIRAC-Formalismus das Skalarprodukt von Systemzustand φ und Eigenzustand a_n (zu einem Eigenwert a_n eines Operators A , der eine Observable repräsentiert) wie folgt gedeutet:

$$w_\varphi(a_n) := |\langle a_n | \varphi \rangle|^2$$

ist die Wahrscheinlichkeit, daß das Mikrosystem bei einer Messung von A in den Eigenzustand a_n übergeht. Neben dieser auf ein individuelles System bezogenen Deutung wird auch häufig von einem Ensemble gleichartig präparierter Systeme im Zustand φ ausgegangen; $w_\varphi(a_n)$ gibt dann den Anteil der Systeme wieder, die bei einer Messung von A in den Zustand a_n übergehen. Bei beiden Deutungen spricht man von der statistischen Interpretation der Quantenmechanik, die heute überall in der Welt benutzt wird.

Von dieser statistischen Interpretation grundsätzlich zu unterscheiden ist die Statistik, die bei quantenmechanischen Gemischen

$$\rho = \sum_{i=1}^n p_i |i\rangle\langle i| \quad (\text{mit reinen Zuständen } |i\rangle, p_i \in (0,1) \text{ und } \sum_{i=1}^n p_i = 1)$$

aufgrund der subjektiven Unkenntnis über die genaue Lage des reinen Zustands des Mikrosystems zu verwenden ist. (Vgl. [5, S. 253ff.], Zitat:) „Für die Vorhersage von Experimenten an einem schwach präparierten System muß man über die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie noch eine Statistik stülpen, die der mangelnden Information Rechnung trägt, welche man über das System besitzt. Die Wahrscheinlichkeiten, die durch diese zweite Statistik hereinkommen, sind also von derselben Natur wie in der klassischen Mechanik und sind wohl zu unterscheiden von jenen, die die Quantentheorie liefert, weil letztere auch prinzipiell nicht durch eine genauere Messung überwunden werden können.“ Die folgende Übersicht mag die Zusammenhänge noch einmal verdeutlichen:

	reiner Zustand	Gemisch
klassische Mechanik	vollständige Information	subjektives Unwissen
Quantenmechanik	maximale Information; objektives Unwissen	objektives und subjektives Unwissen

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die Statistik in der Quantenmechanik nicht auf der Kolmogoroffschen Wahrscheinlichkeitstheorie aufbauen kann, da diese auf einer Booleschen Algebra basiert, jene aber die Nichtdistributivität des zugrunde liegenden Verbandes berücksichtigen muß.

Satz: Die prinzipielle Unmöglichkeit, ein Mikrosystem vollständig zu beschreiben (objektives Unwissen), wird in der Quantenmechanik – durch jahrzehntelange Erfahrung bestä-

tigt – statistisch interpretiert. Der so entstehende Wahrscheinlichkeitscharakter der Theorie ist grundsätzlich von der Statistik zu unterscheiden, die bei Gemischen eine Rolle spielt; letztere kann man zumindest prinzipiell beseitigen.

4.6. Das Kausalgesetz bei Mikrosystemen

Fall 1: Wir haben durch Messungen an einem Mikrosystem S eine maximale Anzahl von Eigenschaften E_i bestimmt. Der so präparierte Zustand $\varphi(t_0)$ von S ändert sich nun im Laufe der Zeit streng kausal gemäß der Schrödinger-Gleichung, d.h. zu einem Zeitpunkt $t > t_0$ wird das Mikrosystem durch einen Zustand $\varphi(t)$ beschrieben, der mit Hilfe von $\varphi(t_0)$ und des Hamilton-Operators berechnet werden kann. Bezüglich $\varphi(t)$ aber gibt es eine Anzahl von Eigenschaften F_i , die dem System objektiv zukommen.

Satz: (quantenmechanisches Kausalgesetz) Ist der Anfangszustand $\varphi(t_0)$ eines Mikrosystems S , das durch die Quantenmechanik beschreibbar ist, bekannt, so ist durch die die Evolution von S darstellende Schrödinger-Gleichung der Zustand $\varphi(t)$ von S zu jedem späteren Zeitpunkt $t > t_0$ bekannt.

Dieser Satz besagt, daß es einen strengen Kausalzusammenhang in der zeitlichen Abfolge der objektivierbaren Eigenschaften gibt [11, S. 151]. Über das Verhalten der nicht objektivierbaren Eigenschaften von S macht das quantenmechanische Kausalgesetz allerdings keine Aussagen, obwohl auch diese Eigenschaften durchaus experimentell bestimmt werden können; man denke etwa an die Messung der drei Spinkomponenten eines Elektrons.

Fall 2: Wir betrachten ein Mikrosystem S in klassischer Weise und bestimmen experimentell alle Eigenschaften von S zum Zeitpunkt t_0 , d.h. etwa: In t_0 wird der Ort x_0 und in $t_0 + \epsilon$ der Impuls p_0 gemessen; wegen der klassischen Stetigkeitsannahme können bei genügend kleinem ϵ die Werte x_0 und p_0 auf einen Zeitpunkt t_0 bezogen werden. Wendet man nun die Hamilton-Gleichungen zur Vorhersage von Ort und Impuls zum Zeitpunkt $t_1 > t_0$ an, so erweist sich diese Vorhersage in der Regel als falsch.

Satz: Werden einem Mikrosystem in klassischer Weise alle Eigenschaften zugeschrieben (d.h. alle Eigenschaften werden objektiviert), so ist das klassische Kausalgesetz falsch.

An dieser Stelle muß noch einmal betont werden, daß die heutige Quantenmechanik keine Theorie mit „verborgenen Parametern“ ist; demnach gibt es in dem heute benutzten Formalismus der Quantenmechanik keine Bewegungsgleichungen, die bei vollständiger Kenntnis des Zustands die Evolution des Mikrosystems in Übereinstimmung mit der Erfahrung richtig beschreiben würde. Vielmehr sind in diesem Fall die klassischen Hamilton-Gleichungen zu benutzen.

Fall 3: Berücksichtigt man die prinzipielle Unvollständigkeit der Information über ein Mikrosystem, beachtet man also die Bildung des Begriffs „Zustand“ innerhalb der Quantenmechanik, so ist damit die Prämisse des klassischen Kausalgesetzes nicht erfüllt. Der Satz als solcher ist zwar wegen der falschen Prämisse formal-logisch weiterhin gültig (ex falsum quodlibet), aber nicht anwendbar.

Satz: Das klassische Kausalgesetz ist in der Quantenmechanik zwar gültig, aber nicht anwendbar.

4.7. Zum Aufbau einer nichtklassischen Theorie (Quantenmechanik)

In Abschnitt 3.1. wurde der Aufbau einer klassischen Theorie dargestellt, wobei von einer vorwissenschaftlichen Erfahrung ausgegangen wurde, die über primäre Meßprozesse zu einer Primärsprache mit Begriffen wie Ort, Impuls, Bahn etc. führte. In der Quantenmechanik aber würde die alleinige Benutzung dieser Primärsprache nicht mehr zu einer Bestätigung der Theorie durch sekundäre Meßprozesse führen. (Vgl. Abschnitt 3.1. Schritt 3 bzw. [12, S. 101 ff.]

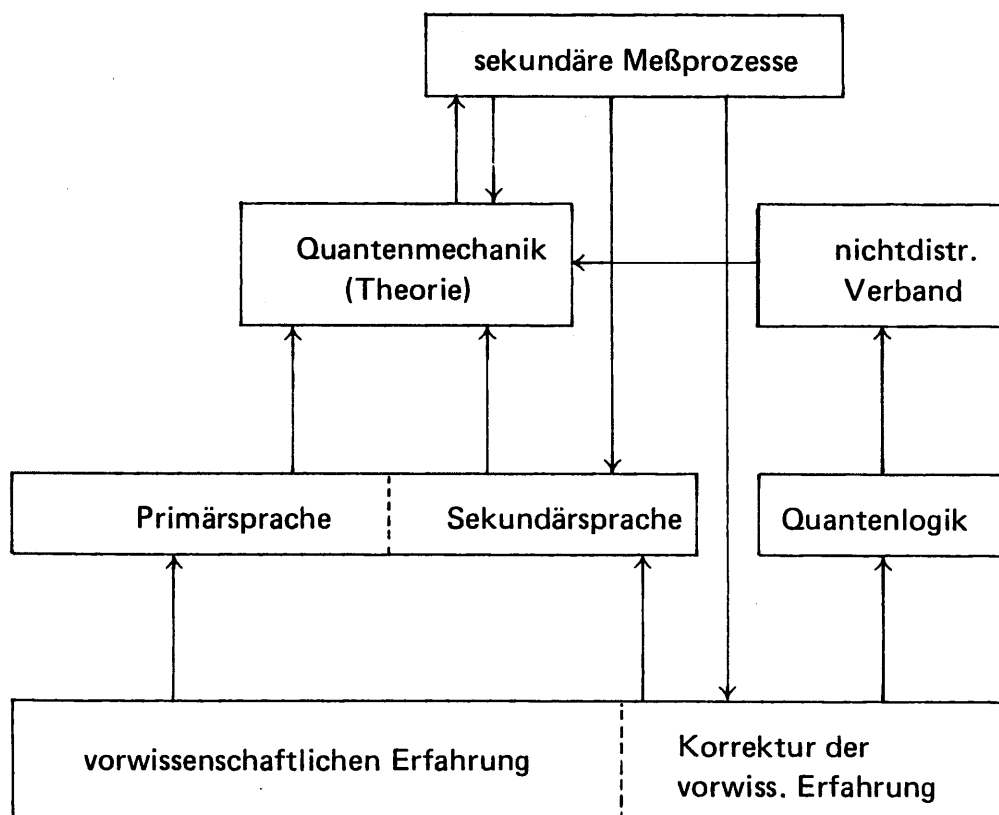
Satz: Die Quantenmechanik stimmt bei Benutzung der Sprache der klassischen Physik nicht mit der Erfahrung überein.

Vielmehr führen die durch sekundäre Meßvorgänge in Verbindung mit der Theorie gewonnenen Resultate

a) zu einer Korrektur der vorwissenschaftlichen Erfahrung durch die Erkenntnis, daß diese vorwissenschaftliche Erfahrung über Makrosysteme teilweise zu restriktive Elemente enthält, z.B. die Möglichkeit der gleichzeitigen Meßbarkeit von zwei Observablen;

b) zu einer Revision der Primärsprache und damit zu einer Sekundärsprache, in der z.B. der Begriff „Inkommensurabilität“ vorkommt.

Dies kann zum Ausgangspunkt von Untersuchungen über die Voraussetzungen der Möglichkeit von Sprache über ein Mikrosystem gemacht werden, die auf rein logisch-algebraischem Weg eine partielle Rekonstruktion der Verbandsstruktur der Hilbertraum-Unterräume ermöglichen [13].



5. Folgerung für die Didaktik der Physik

Es sollen hier keine Argumente für oder gegen eine Unterrichtsreihe „Quantenmechanik“ am Gymnasium gesammelt werden; dies ist an anderer Stelle bereits geschehen (vgl. [6], [18]); vielmehr kommt es darauf an, diejenige Bedeutung der modernen Physik hervorzuheben, die darin liegt, daß – um einmal die Termini von Heege [6] zu benutzen – der Lernende einen Konflikt erlebt oder bei konsequenter Anwendung klassischer Vorstellungen sogar auf Widersprüche mit der Erfahrung stößt, um sich dann ein neues Orientierungsplateau zu erschließen. Daß man diesen Prozeß sehr wohl einem Studenten mittleren Semesters, nicht aber einem Oberprimaner durch den in Abschnitt 4.7. beschriebenen Aufbau einer nichtklassischen Theorie verdeutlichen kann, sei zugestanden; aber die Ausführungen der vorangehenden Kapitel sollen ja auch nicht als Unterrichtsvorlage, sondern als Verständnishilfe für Lehrende dienen.

Die folgenden, von mir zur Diskussion gestellten Forderungen an den Physikunterricht sind einige der sich aus unserem heutigen Verständnis von Physik ergebenden Konsequenzen; sie sind unter dem von Wagenschein [20, S. 109] formulierten Motto zu sehen:

„Physik ist nicht als „Abklatsch“ der Natur zu behandeln, sondern als eine Weise der menschlichen Auseinandersetzung mit der Natur, als eine Behandlungs- und Verstehensweise, die zu einer trotz ihrer Beschränkung machtvollen Sicht . . . der Natur führt.“

(1) Im Physikunterricht wird die Natur nicht ent-deckt, sondern man setzt sich mit ihr auseinander!

Den Schülern muß klargemacht werden, daß Gesetze der Physik als Folgen einer Handlung (im Experiment) und eines Denkprozesses entstehen; die Strukturen von Experiment und Denken formen die Strukturen des Ergebnisses. Ein besonders beeindruckendes Beispiel hierfür ist das Zweilöcher-Experiment mit Elektronen.

(2) Im Vordergrund des Physikunterrichts (von der 8. Klasse an) hat die Unterscheidung von Beobachtung und Modell zu stehen!

Es ist „eine Brücke zu bauen, die von den schon gesetzlich faßbaren, aber noch sinnlich unmittelbar gegebenen „Phänomenen“ hinüberführt in die „Bilderwelt“, die Welt der „Modelle“ der Physik“ [20, S. 111]; ein Modell ist aber immer ein menschliches Konstrukt, und zwar ein bewußt beschränkendes, vereinfachendes. Nur wenn es in der Mittelstufe gelingt, die Schüler das geometrische Modell der Strahlenoptik und das Stromkreismodell der Elektrizitätslehre als ein „Bild“ für einen gewissen Bereich von Phänomenen erkennen zu lassen, ist es in der Oberstufe möglich, verschiedene astronomische Weltbilder, Atommodelle u.ä. zu diskutieren, ohne daß von den Schülern die unsinnige Bemerkung zu hören ist: „Wir wissen doch, daß das Planetensystem (bzw. ein Atom) nicht so ist, wie es Kopernikus (bzw. Bohr) behauptet hat.“

(3) Die Schüler müssen erfahren, daß erst die Theorie entscheidet, was im Experiment beobachtet wird!

Es gibt keinen Weg, der von den Ergebnissen des Experiments aus unmittelbar „anschaulich“ zu deren „Erklärung“ führt; „die moderne Physik hat uns nur geholfen, den naiven Realismus im Verstehen ihrer Ergebnisse zu erschüttern.“ [20, S. 109] Das von Menschen geschaffene Modell – nicht das Experiment selbst – stellt erst Begriffe und Kausalzusammenhänge her und sagt, was warum wie abläuft. (Vgl. auch [18])

