

ERFAHRUNG UND DENKEN

Schriften zur Förderung
der Beziehungen zwischen
Philosophie und
Einzelwissenschaften

Band 47

Logikkalküle der Quantenphysik

Eine Abhandlung zur Ermittlung
der formal-logischen Systeme
die der nicht-relativistischen
Quantentheorie zugrundeliegen

Von Dr. Gottfried T. Rüttimann



DUNCKER & HUMBLOT / BERLIN

GOTTFRIED T. RÜTTIMANN

Logikkalküle der Quantenphysik

E R F A H R U N G U N D D E N K E N

Schriften zur Förderung der Beziehungen zwischen Philosophie und Einzelwissenschaften

Band 47

Logikkalküle der Quantenphysik

**Eine Abhandlung zur Ermittlung der formal-logischen
Systeme, die der nicht-relativistischen
Quantentheorie zugrundeliegen**

Von

Dr. Gottfried T. Rüttimann



DUNCKER & HUMBLOT / BERLIN

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Rüttimann, Gottfried T.

Logikkalküle der Quantenphysik: e. Abh. zur
Ermittlung d. formal-log. Systeme, d. d. nicht-
relativist. Quantentheorie zugrundeliegen. —

1. Aufl. — Berlin: Duncker und Humblot, 1977.
(Erfahrung und Denken; Bd. 47)

ISBN 3-428-03411-2

Alle Rechte vorbehalten

© 1977 Duncker & Humblot, Berlin 41

Gedruckt 1977 bei Berliner Buchdruckerei Union GmbH., Berlin 61

Printed in Germany

ISBN 3 428 03411 2

Meinen Eltern

Vorwort

Selbstverständlich darf die Darstellung einer logischen Abhandlung an Strenge nichts zu wünschen übrig lassen. Die logischen Untersuchungen haben aber nicht bloß die Strenge zum Ziel; ihr eigentlicher Zweck besteht in der Aufdeckung der Elemente, aus denen sich abgeschlossene Stücke der wissenschaftlichen Forschung formal zusammenbauen lassen. In dieser Sicht ist eine logische Abhandlung als die Darstellung eines Gegenstandes „vom elementarsten Standpunkt aus“ aufzufassen; ein Standpunkt, der in unseren Tagen noch „elementarer“ erscheint als zur Zeit Felix Kleins, als er seine Geometrie verfaßte. Dies will aber nicht heißen, daß eine solche Darstellung „vom elementarsten Standpunkt aus“ bloß für den Anfänger bestimmt sei. Sie ist vielmehr für jene Leser geschrieben, die den Gegenstand entweder schon aus den induktiv aufgebauten Darstellungen kennen und ihn gewissermaßen in Anwendungen gelernt haben, die aber auch wissen möchten, auf welche Sprachstrukturen er sich zurückführen läßt, oder aber in einem gewissen Sinne wohl Anfänger sind, aber den Wunsch hegen, sich von der Warte des Philosophen aus in die Materie einführen zu lassen.

Das ist, was die Studie von Gottfried T. Rüttimann erstrebt und auch erreicht. Die Nüchternheit des Stils ist Teil der Askese, die diese Bestrebung impliziert. Deshalb ist auch die Darstellung kurz und auf das unentbehrlichste beschränkt, und somit das Buch dünn, was allerdings seitens des Lesers eine besondere, jedoch sich lohnende Anstrengung verlangt.

Die Logiken (denn es sind mehrere möglich), welche der formalen Erfassung der Quantentheorie am besten angepaßt sind, sind schon in früheren Jahren untersucht worden. Diese Beschäftigung ist nicht mit einer anderen zu verwechseln, die die Aufstellung der Axiomatik der Theorie anstrebt, obgleich sie manchmal wechselwirken. Die Logik bestimmt nicht den positiven Inhalt einer physikalischen Theorie, denn sie bestimmt

weder ihre Dynamik (z. B. in Form eines Variationsprinzips, bei welchem der Raum die unabhängigen und die abhängigen Variablen festzusetzen sind) noch die in ihr gültigen Wechselwirkungen (z. B. die Form der Lagrange-Funktion). Die erstere, die Bestimmung der Dynamik allein, ist die eigentliche Aufgabe einer Axiomatik, wogegen die Ermittlung der Wechselwirkungen — wenn nicht der Willkür der Wahl sogenannter „Kraft“-Gesetze unterstellt — der Hilfe der Experimentalphysik bedarf.

Die Wechselwirkungsgesetze müssen Konstanten enthalten, welche die Intensität der Wechselwirkungen ausdrücken und nur durch Beobachtung bestimmt werden können. Ihr numerischer Wert hängt von der Wahl der Einheit ab, sofern sie nicht auf reine Zahlen wie die Feinstrukturkonstante ($\alpha = e^2 / 4 \pi \epsilon \cdot \hbar c$, Konstante der elektromagnetischen Wechselwirkung) zurückgeführt sind. Als Einheiten können Konstanten wie \hbar, c (statt konventionelle Maßeinheit wie sec, cm ...) gewählt werden, welche in der Dynamik allein (ohne Wechselwirkungsgesetz) eingebaut werden, also schlußendlich im axiomatischen Aufbau der physikalischen Theorie schon stecken müssen.

Unsere physikalischen Theorien sind heute noch unvollständig, denn sie bieten nicht genug solche „theoretische“ Konstanten, um das vollständige Maßsystem der Physik zu begründen.

Der logische Apparat darf keine Konstanten, weder solche der Wechselwirkung noch solche der Theorie, enthalten. Er soll nur festsetzen, welche formale Sprache bei der Aufstellung der Axiomatik Verwendung finden wird. Sie legt also die Regeln des Dialogs zwischen Physikern fest, bevor diese Physiker als solche an ihre Arbeit herantreten. Sie soll z. B. entweder Platz schaffen für den Einbau der Quantisierung oder keinen solchen Platz zulassen, usw.

Solche formale Sprachen werden von den Spezialisten gerne als Kalküle bezeichnet. Ob diese Bezeichnung sehr glücklich ist, ließe sich diskutieren, in Anbetracht der in der Mathematik sehr deutlich definierten Bedeutung dieses Wortes als Inbegriff der Regeln, nach denen mit bestimmten Elementen gerechnet wird. Ersetzt man aber „gerechnet“ mit „gesprochen“, „geschrieben“ oder „gehandelt“ usw., so bekommt man „Kalküle“ in einem allgemeineren Sinn. Es ist gut, daß man sich in

diversen Kalkülen dieser allgemeinen Bedeutung übt. Schließlich ist der Inbegriff der Regeln einer bestimmten, irgendwo, irgendwann geltenden Moral auch eine Art Kalkül, die gelernt werden muß und deren man sich bewußt werden kann.

In diesem Sinne empfehlen wir die Lektüre dieses Buches und wünschen ihm eine gute Aufnahme.

André Mercier

Inhaltsverzeichnis

1.	<i>Einleitung</i>	13
1.1.	Kritik der Begriffe	13
1.2.	Komplementarität, Objektivierbarkeit und Interpretation	17
2.	<i>Logikkalküle</i>	28
2.1.	Einleitung	28
2.2.	Dialogik	30
2.3.	Äquivalenzklassen bedingt verfügbarer Aussagen	40
2.4.	Der Logikkalkül der verfügbaren Aussagen	42
2.5.	Der Logikkalkül der bedingt verfügbaren Aussagen	43
3.	<i>Der Logikkalkül der Quantenphysik</i>	46
3.1.	Filtermessungen	46
3.2.	Die Klasse der physikalischen Aussagen	50
4.	<i>Metakalkül</i>	55
4.1.	Metasprache, Objektsprache	55
4.2.	Subjunktive Implikation	56
4.3.	Das Wissen über das physikalische System	58
4.4.	Metakalkül der Paaraussagen, Modalitäten	61
5.	<i>Der dreiwertige Logikkalkül</i>	65
5.1.	Einleitung	65
5.2.	Definition der Wahrheitswerte	66
5.3.	Zusammengesetzte dreiwertige Aussagen	67
5.4.	Die Alternative	71
5.5.	Bemerkungen	75

12	Inhaltsverzeichnis
6.	<i>Zustandsräume</i> 76
6.1.	Einleitung 76
6.2.	Der Zustandsraum der klassischen Mechanik 76
6.3.	Der Zustandsraum der Quantenmechanik 77
6.4.	Bemerkungen 80
7.	<i>Anhang</i> 82
8.	<i>Literaturverzeichnis</i> 118

1. Einleitung

1.1. Kritik der Begriffe

Die Physik, wie jede Naturwissenschaft, entwickelt sich gleichzeitig in zweifacher Hinsicht. Auf der einen Seite steht die unmittelbare Auseinandersetzung mit der Natur durch die Beobachtung in ihrer direkten Form oder indirekt unter Zuhilfenahme des Experimentes; auf der andern Seite ist die Theorie, die die Beobachtungsdaten nach charakteristischen Eigenheiten untersucht und eine strukturelle Beschreibung des beobachteten Naturbereiches zu geben versucht, die für nicht beobachtete Ereignisse Voraussagen erlaubt. Die Resultate, die diese wechselseitige Beeinflussung von Experiment und Theorie zeitigt, charakterisieren in jeder Epoche das, was unter Physik verstanden wird.

Zu Beginn der exakten Naturbeschreibung steht das Studium der Bewegung des Körpers. Es ist dies die Physik, die heute unter dem Namen Newtonsche Mechanik bekannt ist. Das Studium des Lichtes führt zunächst zu seiner mechanistischen Deutung in der Newtonschen und Huygenschen Optik. Im 19. Jahrhundert finden die thermischen und die elektrischen Phänomene ihre Erklärung in der Thermodynamik und Elektrodynamik. Zu Beginn unseres Jahrhunderts stehen zwei Theorien, Relativitätstheorie und Quantentheorie, im Vordergrund wissenschaftlicher Forschung und Erkenntnis, durch die das naturwissenschaftliche Denken grundlegend verändert werden sollte.

Jede Entwicklungsstufe der Physik ist gekennzeichnet durch eine Reihe von Entdeckungen und Erklärungen, die sich auf einen neuen oder erweiterten Erfahrungsbereich beziehen. Die Entwicklung geht dabei nicht sprunghaft vor sich, sondern ergibt sich gleichsam aus der Konfrontation der experimentellen und theoretischen Tradition mit den neuen Entdeckungen. Die Extrapolation bewährter Gesetzmäßigkeiten und Modelle auf erweiterte Bereiche bestätigt dieselben oder zeigt ihre Grenzen auf. Ebenso verhält es sich mit dem Begriffssystem, dessen wir auf jeder Stufe bedürfen. Die Entwicklung verlangt die fortwährende Überprüfung der in Inhalt und Umfang festgelegten Begriffe.

Als „klassische Physik“ bezeichnet man heute die Newtonsche Mechanik, die Maxwell'sche Elektrodynamik und jene Teile der Physik, die sich

auf Mechanik und Elektrodynamik zurückführen lassen. So lässt sich zum Beispiel die Akustik auf Grund der Deutung des Schalls als mechanische Wellenbewegung, die Thermodynamik in ihrer Deutung als statistische Mechanik, auf die Newtonsche Mechanik zurückführen. Die Optik kann als Spezialfall der Elektrodynamik aufgefaßt werden.

Obwohl Mechanik und Elektrodynamik die irreduzible Basis einer klassischen Theorie bilden, sind sie nicht als voneinander unabhängige Disziplinen zu betrachten. Die Elektrodynamik, deren Erfahrungsbereich die elektrischen Erscheinungen darstellen, folgt in begrifflicher Hinsicht weitgehend den Traditionen der Mechanik. Der Begriff des Feldes als Zwischenträger der Wechselwirkung, wie zum Beispiel das Gravitationsfeld aufgefaßt werden kann, erhält hingegen in der Elektrodynamik eine weit ausgeprägtere physikalische Bedeutung. Tritt im Gravitationsfeld die Übertragung der Wechselwirkung überall gleichzeitig auf und ist an keinen Transport gebunden, so erfolgt die Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes mit endlicher Geschwindigkeit und zwar mit einem Transport von Energie.

Der Erfahrungsbereich, aus dem eine physikalische Theorie wächst und für den sie zuständig ist, wird vor allem durch die Beobachtungsmöglichkeiten definiert. Erfahrung gewinnen wir im Umgang und in der Beobachtung unserer Umwelt; ihr Umfang ist durch die Möglichkeiten der Beobachtung d. h. durch die Experimentiertechnik begrenzt.

Die klassische Physik orientiert sich an einer Erfahrung, die im Bereich menschlicher Ausmaße liegt. Obwohl die Begriffsbildungen, z. B. der Elektrodynamik und Thermodynamik, bereits auf einem anspruchsvolleren Modelldenken beruhen, weisen im allgemeinen die Begriffe der klassischen Physik eine gewisse „Anschaulichkeit“ auf, d. h. sie beziehen sich auf eine Umwelt, die mit unseren Sinnen mehr oder weniger gut erfaßt werden kann.

Das 20. Jahrhundert schuf eine Physik, die, vermöge der verfeinerten Beobachtungsmöglichkeiten, in Gebiete vordringt, die ohne „Verlängerungen der Sinne“ einem unmittelbaren Erleben nicht mehr zugänglich sind.

Die moderne Physik in Gestalt von Relativitätstheorie und Quantentheorie brachte Änderungen, durch die das naturwissenschaftliche Denken eine tiefgreifende Wandlung erfuhr. Es wurde die Gültigkeit klassischer Gesetzmäßigkeiten in Frage gestellt oder in ihrem Gültigkeitsbereich eingeschränkt. Solche Neuerungen sind aber keine Überraschungen in

einer Wissenschaft, die sich ständig weiterentwickelt, und brauchen auch nicht unbedingt eine Wandlung des naturwissenschaftlichen Denkens zu beinhalten. Die grundlegende Neuerung, die die moderne Physik brachte, lag in der veränderten Anwendbarkeit der Begriffe, wie sie in der klassischen Physik festgelegt wurden.

Die Quantenphysik entstand infolge der Beschäftigung mit molekularen und atomaren Gebilden. Diese sind aus weiteren Bestandteilen wie Elektronen und Kernen zusammengesetzt. Es handelt sich also um Teilchen, deren wichtigste Eigenschaft ihre Maße und ihre elektrische Ladung ist. Die Quantentheorie stellt somit zwangsläufig eine neue Form der Elektrodynamik dar. Ihr Erfolg war so groß, daß man annahm, wie seinerzeit bei der Newtonschen Mechanik, die Quantentheorie sei die richtige Theorie für alle Fälle. Der Anwendung der Quantentheorie auf subnukleare Erscheinungen war einiger Erfolg beschieden, doch beginnen sich gerade dort ihre Grenzen abzuzeichnen. Im großen und ganzen können wir aber der Einfachheit halber sagen: die klassische Physik ist als Beschreibung für den Makrokosmos, die Quantenphysik für den Mikrokosmos zuständig. Daß der Mikrokosmos Eigenheiten aufweist, die ihn nicht als Verkleinerung des Makrokosmos erscheinen lassen, und sich daher die bewährten Gesetzmäßigkeiten nicht übertragen lassen, war eine Entdeckung, die weniger die bisherigen Beschreibungsmöglichkeiten als vielmehr das Begriffssystem in Frage stellte. Wenn sich der Physiker beobachtend mit der Umwelt beschäftigt, so will er nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ Aufschluß über das Naturgeschehen gewinnen, d. h. er führt Messungen durch. Ein Teil seines Begriffssystems besteht daher aus impliziten oder expliziten Definitionen sogenannter physikalischer Größen.

Durch die Erfolge der klassisch-physikalischen Naturbeschreibung, besonders im Hinblick auf Voraussagen, war man verleitet zu glauben, daß es prinzipiell möglich sei, zu einem vollständigen Wissen über die Natur zu gelangen. Ein anfänglich grobes Wissen von den Eigenschaften eines physikalischen Systems könnte durch Messung weiterer sinnvoll festgelegter Größen zu einem vollständigen Wissen verfeinert werden. Dadurch sollte es möglich sein, zu einer Beschreibung zu gelangen, die ein getreues Bild der untersuchten Gegenstände „an sich“ wiedergibt.

In der klassischen Beschreibung ist das Teilchen ein Gebilde von vernachlässigbar kleinen Abmessungen, das in jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort des Raumes besetzt hält und im Laufe der Zeit eine bestimmte Bahn durchläuft. Die Gleichungen der klassischen Mechanik ge-