

ERFAHRUNG UND DENKEN

Schriften zur Förderung der Beziehungen zwischen
Philosophie und Einzelwissenschaften

Band 65

Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik

Von

Manfred Stöckler



Duncker & Humblot · Berlin

ERFAHRUNG UND DENKEN

Schriften zur Förderung der Beziehungen zwischen Philosophie und Einzelwissenschaften

Herausgeber

Alwin Diemer (Düsseldorf), Helmar Frank (Paderborn), André Mercier (Bern),
Karl R. Popper (London), Kurt Schelldorfer (Reinbach).

Beirat

Th. Ballauff (Mainz), H. Coing (Frankfurt), C. J. Friedrich (Cambridge),
H. Hediger (Zürich), H. Heimann (Bern), R. Meili (Bern), G. Pilleri (Bern),
B. Rensch (Münster), F. Wagner (München), M. Waldmeier (Zürich), R. Wellek
(New Haven, Conn./USA).

Schriftleitung

Kurt Schelldorfer

Hinweise

1. Der Zweck der Schriften „Erfahrung und Denken“ besteht in der Förderung der Beziehungen zwischen Philosophie und Einzelwissenschaften unter besonderer Berücksichtigung der „Philosophie der Wissenschaften“.
2. Unter „Philosophie der Wissenschaften“ wird hier die kritische Untersuchung der Einzelwissenschaften unter dem Gesichtspunkt der Logik, Erkenntnistheorie, Metaphysik (Ontologie, Kosmologie, Anthropologie, Theologie) und Axiologie verstanden.
3. Es gehört zur Hauptaufgabe der Philosophie der Gegenwart, die formalen und materialen Beziehungen zwischen Philosophie und Einzelwissenschaften zu klären. Daraus soll sich einerseits das Verhältnis der Philosophie zu den Einzelwissenschaften und andererseits die Grundlage zu einer umfassenden, wissenschaftlich fundierten und philosophisch begründeten Weltanschauung ergeben. Eine solche ist weder aus einzelwissenschaftlicher Erkenntnis allein noch ohne diese möglich.

MANFRED STUCKLER

Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik

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 65

Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik

Von

Dr. Manfred Stöckler



D U N C K E R & H U M B L O T / B E R L I N

Gedruckt mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Stöckler, Manfred:

Philosophische Probleme der relativistischen
Quantenmechanik / von Manfred Stöckler. —
Berlin: Duncker und Humblot, 1984.

(Erfahrung und Denken; Bd. 65)

ISBN 3-428-05527-6

NE: GT

Alle Rechte vorbehalten

© 1984 Duncker & Humblot, Berlin 41

Gedruckt 1984 bei Werner Hildebrand, Berlin 65

Printed in Germany

ISBN 3 428 05527 6

Für die Sonntagskinder

Vorwort

Diese Arbeit wurde im Jahre 1981 vom Fachbereich Geschichtswissenschaften der Justus-Liebig-Universität Gießen als Dissertation angenommen. Für die davor erfahrene Hilfe und Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken: Bei den Mitarbeitern des Zentrums für Philosophie, die schuld daran sind, daß aus einem Physiker mit philosophischen Neigungen ein Philosoph mit physikalischen Neigungen wurde; bei meinen Kollegen und Freunden Horst Groß und Dipl. Math. Andreas Bartels, die frühere Fassungen der Arbeit gelesen haben und dabei für die Aussonderung zahlreicher sprachlicher Mißbildungen und inhaltlicher Unklarheiten gesorgt haben; bei Herrn Dr. Rainer Born für wichtige Hinweise; bei Frau Christel Dörr, die meine Blättersammlung in ein lesbares Manuskript verwandelt hat; bei Herrn Prof. Dr. Walter Biem für ausführliche Diskussionen, denen ich zahlreiche Verbesserungsvorschläge verdanke; bei der Justus-Liebig-Universität für die Dissertationsauszeichnung; bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die den Druck der Arbeit ermöglichte. Besonders danke ich meinem Lehrer, Herrn Prof. Dr. B. Kanitscheider. Er regte das Thema an, er begleitete die Arbeit in zahlreichen Diskussionen über große und kleine Schwierigkeiten, er gab mir Raum für konzentriertes Arbeiten, und er sorgte schließlich für einen rechtzeitigen Abschluß.

Beim Schreiben der Arbeit habe ich nicht nur an Wissenschaftstheoretiker gedacht, sondern auch an Studenten und Lehrer der Physik. Die hier philosophisch untersuchten Theorien gehören zu dem an der Universität gelehrt Stoff, der historische Hintergrund und die methodologischen Grundlagen sind in brauchbarer Form jedoch nur schwer zugänglich und deshalb noch wenig bekannt. Ich hoffe, daß darüber hinaus die wichtigsten Teile des Buches für alle verständlich sind, die Freude an der Physik und ein Herz für philosophische Fragestellungen haben.

Manfred Stöckler

Inhalt

| | |
|--|-----|
| <i>Einleitung</i> | 13 |
| <i>I. Die Frühgeschichte der relativistischen Quantenmechanik (bis 1928)</i> | 16 |
| 1. Die Anfänge der RQM | 16 |
| 2. Das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell | 18 |
| 3. Die Anfänge der Wellenmechanik bei Louis de Broglie | 22 |
| 4. Die Leistungen der de Broglieschen Theorie | 26 |
| 5. De Broglie und die Relativität | 30 |
| 6. De Broglie und der Welle-Teilchen-Dualismus | 31 |
| 7. Schrödingers Rezeption der Ideen von de Broglie | 37 |
| 8. Folgerungen aus dem Vergleich der Konzeptionen von de Broglie und Schrödinger | 50 |
| 9. Das Einstein-Bohrsche Kasten-Experiment | 57 |
| <i>II. Die Dirac-Gleichung</i> | 62 |
| 1. Die Situation vor der Entdeckung der Dirac-Gleichung | 62 |
| 2. Die Aufstellung der Dirac-Gleichung | 67 |
| 3. Zur Philosophie von P. A. M. Dirac | 70 |
| 4. Intertheoretische Relationen der Dirac-Gleichung | 74 |
| 5. Wissenschaftstheoretische Diskussion der intertheoretischen Beziehungen der Dirac-Gleichung | 79 |
| 6. Dirac-Gleichung und relativistische Invarianz | 82 |
| <i>III. Die Interpretation der Lösungen der Dirac-Gleichung mit negativer Energie</i> | 88 |
| 1. Die Geschichte der Deutung der Zustände mit negativer Energie | 88 |
| a) Die Lösungen mit negativer Energie und ihre Schwierigkeiten | 88 |
| b) Der Weg zur Löcherinterpretation | 94 |
| c) Der Erfolg der Diracschen Interpretation | 103 |

| | |
|--|-----|
| 2. Das Problem der negativen Lösungen in der quantenfeldtheoretischen Formulierung der Dirac-Gleichung | 106 |
| a) Zur Geschichte der Quantenfeldtheorie | 107 |
| b) Die Quantisierung der Klein-Gordon-Gleichung | 110 |
| c) Die quantenfeldtheoretische Formulierung der Dirac-Gleichung | 115 |
| 3. Überlegungen zur Semantik und Ontologie physikalischer Theorien | 122 |
| a) Kriterien zur Prüfung von Referenzhypothesen | 123 |
| b) Philosophische Überlegungen zur Bewertung von Referenzhypothesen | 133 |
| | |
| <i>IV. Relativistische Aspekte des EPR-Paradoxons</i> | 137 |
| 1. Das EPR-Paradoxon und einige Stationen seiner Geschichte | 138 |
| 2. Der Bellsche Beweis, Lokalität und Relativität | 149 |
| a) Der Bellsche Beweis | 149 |
| b) Verallgemeinerung des Bellschen Beweises | 153 |
| c) Lokalität und Quantenmechanik | 159 |
| 3. Die Abtrennbarkeit von Teilsystemen (Separierbarkeit) | 162 |
| 4. Nichtlokale Effekte und Relativitätstheorie | 168 |
| 5. Relativistische Fernwirkungstheorien | 178 |
| a) Fernwirkungstheorien in der relativistischen Teilchendynamik | 178 |
| b) Nichtlokale Verborgene-Parameter-Theorien | 181 |
| 6. Exotische Lösungsversuche | 185 |
| a) Lösung durch Eingriff des Bewußtseins | 185 |
| b) Lösung durch Aufgabe von Räumlichkeit und Zeitlichkeit des Mikrogeschehens | 186 |
| c) Lösung durch Wirkungsausbreitung in die Vergangenheit | 188 |
| 7. Lösungsversuche aufgrund einer statistischen Interpretation | 189 |
| 8. Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen | 199 |
| | |
| <i>V. Relativistische Quantenmechanik und die Einheit der Physik</i> | 203 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| <i>Anhang</i> | 215 |
| <i>Literatur</i> | 233 |
| <i>Personenregister</i> | 251 |
| <i>Sachregister</i> | 253 |

Verwendete Abkürzungen

AR = Allgemeine Relativitätstheorie

Dgl = Differentialgleichung

QED = Quantenelektrodynamik

QFTh = Quantenfeldtheorie

QM = Quantenmechanik

RQM = Relativistische Quantenmechanik

RT = Relativitätstheorie

SR = Spezielle Relativitätstheorie

Einleitung

The problem must concern real science and it must be a philosophical problem if it is to be a problem in the philosophy of science.

*M. Bunge*¹

Die Wissenschaftstheorie hat die Aufgabe, zum Verstehen der Voraussetzungen, der Mittel, der Produkte und der Ziele wissenschaftlicher Forschung beizutragen. Diese Aufgabe kann sie nur erfüllen, wenn sie sich immer wieder neu an dem von den Einzelwissenschaften vorgegebenen Material orientiert. Um zu einer Rückkoppelung von Wissenschaftstheorie und Spezialwissenschaft beizutragen und die Gefahr einer nutzlosen „Metascience of science fiction“² zu vermeiden, ist die Gliederung der vorliegenden Untersuchung nicht an einem systematischen Problemzusammenhang, sondern an einer Entwicklungslinie einer physikalischen Theorie orientiert.

Als Fallbeispiel wurden die Bemühungen um eine (speziell) relativistische Quantenmechanik ausgewählt, die in der von Dirac aufgestellten Gleichung für das Elektron einen ersten Höhepunkt erreichten. Die beiden großen Theorien der Physik des 20. Jahrhunderts, Relativitätstheorie und Quantenmechanik, sind zwar einzeln ausgiebig metatheoretisch untersucht worden, es existieren jedoch nur wenige Arbeiten, die die Versuche einer Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik aus philosophischer Sicht behandeln. Es ist ein Ziel der vorliegenden Arbeit, der wissenschaftstheoretischen Diskussion neues Material zu erschließen und sie dadurch näher an die gegenwärtig aktuelle Forschung der Physik heranzuführen. Die relativistische Quantenmechanik ist aber auch deshalb wissenschaftstheoretisch fruchtbar, weil an ihr das Streben nach einer einheitlichen Theorie in der Physik studiert werden kann.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit macht ein tiefes Eindringen in einzelwissenschaftliche Problementwicklungen notwendig. Die hier untersuchten physikalischen Theorien spielen nicht die Rolle von illustrierenden, nach didaktischen Gesichtspunkten ausgewählten Beispielen zur Veranschaulichung allgemeiner wissenschaftstheoretischer Theoreme. Ähnlich wie die angewandte Physik einen größeren experimentellen und mathematischen Aufwand erfordert, als er für die Lehrbuchbeispiele und Vorlesungsexperimente notwendig ist, so muß auch eine „angewandte Wissenschaftstheorie“, die ein-

¹ Bunge (1973a), S. 16.

² Stegmüller (1973), Teil A, S. 26.

zelwissenschaftliche Relevanz beansprucht, mit dem Einsatz höherentwickelter (und damit weniger allgemein verbreiteter) physikalischer Voraussetzungen arbeiten. Das amphibische Wesen des Wissenschaftsphilosophen kann sich nicht mehr vorwiegend in philosophischen Lüften aufhalten, sondern muß zuweilen tief in die Wasser der Wissenschaft eintauchen³.

Es ist ein Anliegen dieser Untersuchung zu zeigen, daß metatheoretische Erörterungen keine nutzlosen Spielereien sind, sondern im Verlauf der wissenschaftlichen Forschung auch von Physikern und auch in physikalischen Fachzeitschriften immer wieder angestellt werden. Jede empirische Forschung muß von (wenn auch meist nicht reflektierten) metaphysischen und methodologischen Voraussetzungen ausgehen. Die Einzelwissenschaftler sind jedoch häufig nicht die geeigneten Autoren einer Philosophie ihrer eigenen physikalischen Arbeiten. Dies kann man wohl feststellen, ohne sich gleich der „Lieblingsthese“ von Imre Lakatos anzuschließen, daß die meisten Wissenschaftler die metatheoretischen Aspekte der Wissenschaft kaum besser verstehen als Fische die Hydrodynamik⁴.

So wird es eine Aufgabe der Wissenschaftstheorie, die undiskutierten Voraussetzungen und stillschweigend befolgten Regeln wissenschaftlicher Forschung zu Bewußtsein zu bringen und einer rationalen Kontrolle zugänglich zu machen. Diese methodischen Vorbemerkungen sollen durch einen Überblick über den Inhalt der Arbeit abgeschlossen werden.

Das erste Kapitel untersucht die Bemühungen um eine relativistische Quantenmechanik bis zum Jahre 1928. Am Beispiel der Theorien von A. Sommerfeld, Louis de Broglie, E. Schrödinger und an der Diskussion zwischen Einstein und Bohr wird gezeigt, wie diese Physiker von Anfang an danach strebten, Relativitätstheorie und Quantentheorie miteinander in Verbindung zu bringen, und wie sie an diesem Ziel festhielten, obwohl sie nur zu provisorischen Formen einer relativistischen Quantenmechanik gelangen konnten.

Im Mittelpunkt des zweiten Kapitels steht die relativistische Dirac-Gleichung des Elektrons. An diesem Beispiel werden intertheoretische Relationen und die Rolle von Invarianzüberlegungen in der Physik untersucht.

Das dritte Kapitel befaßt sich mit der Interpretation der Dirac-Gleichung. Zunächst wird die Geschichte der Deutung der Zustände mit negativer Energie im Detail verfolgt, wobei auch einige Aspekte der zweiten Quantisierung behandelt werden. Daran schließen sich philosophische Überlegungen zu Semantik und Ontologie physikalischer Theorien an.

Im vierten Kapitel wird eines der klassischen Grundlagenprobleme der Quantenmechanik aufgegriffen, das Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen. Die unübersehbare Diskussion zu diesem Gedankenexperiment wird dabei nur

³ Vgl. Bunge (1973a), S. 19.

⁴ Lakatos (1974 b), S. 144.

insoweit herangezogen, als in ihr relativistische Argumente eine Rolle spielen. Gerade unter diesem Gesichtspunkt scheint das EPR-Paradoxon (zumindest bei bestimmten metatheoretischen Voraussetzungen) auf noch ungelöste Schwierigkeiten der Vereinigung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie hinzuweisen.

Im abschließenden fünften Kapitel wird die relativistische Quantenmechanik in die Bemühungen um eine einheitliche Theorie in der Physik eingeordnet. Die Überlegungen zum Einheitsgedanken führen dabei über eine wissenschaftstheoretische Untersuchung im engeren Sinne hinaus, indem gezeigt wird, wie innerhalb der Physik metaphysische Programme fortgeführt werden.