

Tim Lethen · Oliver Passon *Hrsg.*

Kurt Gödels Notizen zur Quanten- mechanik

Transkriptionen und Kommentare



Springer Spektrum

Kurt Gödels Notizen zur Quantenmechanik

Tim Lethen · Oliver Passon
(Hrsg.)

Kurt Gödels Notizen zur Quantenmechanik

Transkriptionen und Kommentare

Hrsg.
Tim Lethen
Department of Philosophy
University of Helsinki, Helsinki, Finland

Oliver Passon
Fakultät für Mathematik und
Naturwissenschaften
Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal, Deutschland

ISBN 978-3-662-63807-1 ISBN 978-3-662-63808-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63808-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Lisa Edelhaeuser

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort

Als Michael Faraday dem damaligen Schatzkanzler der Krone, William Gladstone, zeigte, wie ein elektrischer Strom eine Magnetnadel ablenkt, fragte dieser nur: „Wozu soll dies nun gut sein?“ Faraday antwortete: „Eines Tages werden Ihre Nachfolger darauf Steuer erheben.“ Diese Anekdote bringt klar die Bedeutung der Grundlagenforschung für zukünftige wirtschaftliche Anwendungen zum Ausdruck.

Bei der Quantenmechanik war es eigentlich genau umgekehrt. Ihr Ursprung lag im ausgehenden 19. Jahrhundert in der Suche nach effizienten Lichtquellen. Dazu wurden an der damaligen Physikalisch-technischen Reichsanstalt in Berlin Präzisionsmessungen zur Energiedichte der sog. Hohlraumstrahlung vorgenommen. Die dabei beobachteten Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment wurden im Jahr 1900 durch Max Planck aufgelöst. Entscheidend war dabei die Erkenntnis, dass Energie nur in diskreten Einheiten, d. h. in quantisierter Form, vorkommt. Bemerkenswert ist, dass Max Planck beinahe nicht Physik studiert hätte, da ihm der damalige Physik-Professor an der Universität München, Philipp von Jolly, erklärte, dass in dieser Wissenschaft schon fast alles erforscht sei, und es gelte, nur noch einige unbedeutende Lücken zu schließen.

Erst 25 Jahre später wurde die durch Quantenbedingungen ergänzte klassische Mechanik von Arnold Sommerfeld und Niels Bohr, die zunächst große Erfolge in der Atomphysik feiern konnte, aber dennoch bald an ihre Grenzen stieß, durch die endgültige Formulierung der Quantenmechanik von Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger abgelöst. Lange galt dieses Gebiet als reine Grundlagenforschung. Erst die Erfindung des Lasers und des Transistors in den späten 50er Jahren des letzten Jahrhunderts mit ihren zahlreichen technischen Anwendungen in unserem Alltag repräsentiert die *erste Quantenrevolution* und bestätigt die Prophezeiung von Michael Faraday.

Die Grundlagen der *zweiten Quantenrevolution*, in der wir uns aktuell befinden, wurden bereits 1935 gelegt. In diesem Jahr erschien die Publikation von Albert Einstein, Boris Podolski und Nathan Rosen mit der provokanten Frage: „Ist die Quantenmechanik vollständig?“ Obwohl dieser Artikel damals, mit Ausnahme der Giganten der Quantenmechanik wie Bohr und Schrödinger, wenig Beachtung fand, wissen wir heute, dass ihre Autoren das wesentliche Merkmal der Quantenmechanik offengelegt haben. Es ist das Phänomen der Verschränkung von Quantensystemen, das der Quantenkryptographie, dem Quantenrechner und vielen anderen Anwendungen, die momentan heiß diskutiert werden, zugrunde liegt.

Es ist in diesem für die Weiterentwicklung der Quantenmechanik schicksalhaften Jahr 1935, dass sich Kurt Gödel mit Fragen der Quantenmechanik beschäftigt. In seinen Aufzeichnungen exzerpiert er Originalarbeiten und skizziert seine Gedanken bruchstückhaft. Es ist hoch interessant, diese Fragmente aus heutiger Sicht zu betrachten. Dabei sind viele Bemerkungen nicht offensichtlich, regen aber gerade deswegen zu neuen Ideen an, so z. B. die Bemerkung 220 (QM I):

Gibt schon die Relativitätstheorie eine Auflösung des Wellenparadoxons? (Weylsche Behauptung)

oder die Bemerkung 221 (QM I):

Ist die Edd. Ableitung der Energiequanten durch die Analogie mit Kartenmischung korrekt?

Ähnlich faszinierend ist die Behauptung 246 (QM I):

Analogie zwischen Konstruktion rationaler Zahlen und Konstruktion der Realität ist eine nicht Gehende!

In Bemerkung 49a (QM I) beschreibt Gödel ganz im Sinne von Bohr die Rolle des Beobachters in der Quantenmechanik:

Die in der Physik vorliegende neue Situation erinnert uns eindringlich an die alte Wahrheit, dass wir sowohl Zuschauer als Teilnehmer in dem großen Schauspiel des Daseins sind.

Der interessierte Leser und Kenner der Quantenmechanik wird in den Gedanken von Gödel die Kernaussagen der Quantenmechanik wiederfinden, aber auch vieles, das Fragen aufwirft. Die Antworten darauf haben durchaus das Potenzial für eine *dritte Quantenrevolution*.

Das Leben und die ungewöhnliche Persönlichkeit von Gödel sind sehr eindrucksvoll in dem Buch von Palle Yourgrau *A world without time* dargestellt. Seine gemeinsamen Spaziergänge mit Einstein sind wohlbekannt. Die letzte Assistentin von Einstein, Bruria Kaufman, berichtete dem Autor dieses Geleitworts, dass Gödel jeden Mittag in Einsteins Büro im Institute for Advanced Study kam und fragte „Gehen wir?“. Die beiden liefen los und Frau Kaufman folgte ihnen im gebührenden Abstand. Dennoch konnte sie sehr genau der Unterhaltung folgen. Diese drehte sich nicht, wie man zunächst vermuten würde, um wissenschaftliche Fragen, sondern um Weltpolitik. Gödel berichtete Einstein von Ereignissen, die er in verschiedenen Zeitungen gelesen hatte.

In diese Zeit (also ca. 1950) fällt auch der von Gödel zum 70. Geburtstag von Einstein verfasste Artikel zur Möglichkeit von Zeitreisen in der allgemeinen Relativitätstheorie. Einstein war von dem Geburtstagsgeschenk fasziniert, insbesondere da ihn der gefühlte Unterschied von Vergangenheit und Zukunft auch schon früher beschäftigt hatte. So schrieb er als Antwort auf den Gödelschen Beitrag:

Kurt Gödel's essay constitutes in my opinion an important contribution to the general theory of relativity, especially to the analysis of the concept of time. The problem here

involved disturbed me already at the time of the building up of the general theory of relativity, without my having succeeded in clarifying it. [...]

Does it make any sense to provide the world-line with an arrow, and to assert that B is before P, A after P? [...]

What is essential in this is the fact, that the sending of a signal is, in the sense of thermodynamics, an irreversible process, a process which is connected with the growth of entropy (whereas, according to our present knowledge, all elementary processes are reversible).

Vom Unvollständigkeitssatz aus dem Jahr 1931 bis zu seinem rotierenden Universum mit geschlossenen Weltlinien hat Gödel die Grenzen der Mathematik und Physik aufgezeigt. Die vom ihm formulierten Fragen zur Quantenmechanik könnten ähnlich weitreichend sein. Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler pflegte zu sagen: „Ninetynine per cent of a great discovery is asking the right question.“

In diesem Sinne muss man „nur“ die relevanten Bemerkungen in Gödels Notizen zur Quantenmechanik identifizieren. Tim Lethen und Oliver Passon gebührt unser Dank, dass sie uns diese Chance geben.

Ulm
den 6. April 2021

Wolfgang P. Schleich

Vorwort

Die hier vorgelegte Übertragung von Kurt Gödels Notizen zur Quantenmechanik aus der Gabelberger Kurzschrift ist dem Wortsinn nach *keine* Entdeckung. Jedem Leser des fünften Bandes von Gödels *Collected Works* (Feferman et al., 2003) konnte die Existenz dieser Dokumente aufgefallen sein, denn in der dortigen *finding aid* zum unveröffentlichten Nachlass ist vermerkt:

Physik Quantenmech. I: Mathematical computation with notes in Gabelberger shorthand and headings in German and English, written both directions. (*ibid.* S. 508).¹

Für Gödels Interesse an der Quantenmechanik gibt es auch in der Korrespondenz Hinweise.²

Wenn also auch nicht dem Wortsinn nach, so handelt es sich *inhaltlich* sehr wohl um eine Entdeckung, wenn nicht sogar eine Sensation. Denn wie intensiv Gödels Beschäftigung mit *diesem* Zweig der aktuellen Physik seiner Zeit war – und vor allem seine Stellung zu den philosophischen Implikationen der Quantenmechanik – konnte bisher nicht beurteilt werden. Gleichzeitig ist die Hoffnung, dass eines der größten mathematischen Genies des 20. Jahrhunderts Erhellendes zur Deutung der Quantenmechanik beizutragen hat, sicherlich nicht unbegründet.

Das hier betrachtete Material umfasst im Wesentlichen drei Notizbücher, die auf dem Einband von Gödel als „Physik Quantenmechanik I“, „Physik Quantenmechanik II“ (entstanden 1935) sowie „Aflenz 1936 (Analysis, Physik)“ bezeichnet wurden. Es handelt sich um etwa 340 durchlaufend nummerierte Bemerkungen, deren Länge von wenigen Zeilen bis zu mehreren Seiten reicht. Im Original umfassen die ersten beiden Bücher 104 bzw. 90 Seiten. Der betrachtete Abschnitt des Aflenz-Buchs ist lediglich 38 Seiten lang und enthält im Wesent-

¹ Eine noch knappere Anmerkung betrifft das Notizbuch „Quantenmechanik II“. Das ebenfalls fast ausschließlich der Quantenmechanik gewidmete Aflenz-Notizbuch ist in der *finding aid* jedoch irreführender Weise wie folgt beschrieben: „Aflenz 1936 Analysis, Physik: Mathematical computation with notes in Gabelberger shorthand (taken while in Aflenz, Austria?), written both directions, plus 4 loose pages“ (*ibid.* S. 506).

² Etwa im Brief vom 14. März 1933 an von Neumann (Feferman et al., 2003, S. 346).

lichen die Abschrift einzelner Bemerkungen der beiden anderen Notizbücher.³ Die Quantenmechanik stellt zwar den überwiegenden Gegenstand der Texte dar, sie enthalten aber ebenfalls Bemerkungen zu z. Bsp. mathematischen und philosophischen Fragen.

Der Stil der Darstellung wechselt zwischen aphoristischen Bemerkungen, längeren technischen (auch mathematischen) Ausführungen, Exzerpten und Fragen. Viele Aussagen sind pointiert, etwa am Ende von Ziffer 335 (QM II):

335. [...] In der Quantenmechanik (Transformationstheorie) scheint der Gedanke zu sein: jede Größe = jede andere. D. h., die Gesetze sind symmetrisch in allen Größen (was sich darin ausdrückt, dass jede auf Diagonalforn gebracht werden kann). [...] Die Grundtatsache unseres Verhältnisses zur Welt ist, dass viele Dinge, die im Grunde dasselbe sind, uns als ganz verschieden erscheinen (z. B. mein Schmerz und der Schmerz des anderen). Die natürliche Verallgemeinerung scheint zu sein, dass im Grunde alles dasselbe ist und uns nur verschieden erscheint [was in der Transformationstheorie durchgeführt ist].

Natürlich ist die Aussagekraft einer solchen aus dem Zusammenhang gerissenen Bemerkung begrenzt. Aber nicht nur der argumentative Zusammenhang, sondern auch eine historische Kontextualisierung sind für die Bewertung notwendig. In dieser Absicht geben wir in Kap. 1 einen Überblick über den persönlich-biographischen und wissenschaftlichen Hintergrund dieser Quelle, bevor sich in Abschn. 1.3 eine erste Beantwortung der Frage anschließt, welche Stellung Gödel in den Interpretationsfragen der Quantenmechanik eingenommen hat.

In Abschn. 1.4 machen wir zudem editionstechnische Anmerkungen, beschreiben das Quellenmaterial genauer und gehen auf einige Spezifika und Besonderheiten der Übertragung aus der Gabelsberger Kurzschrift ein.

Unserer Dank gilt an erster Stelle Jan von Plato, ohne dessen herausragende Kenntnis von Gödels Nachlass dieses Buch nicht hätte zustande kommen können, und dessen Vorschlag, einen näheren Blick auf Gödels quantenmechanische Notizen zu werfen, den Stein letztendlich ins Rollen gebracht hat. Ferner geht unser Dank an Maria Hämeen-Anttila und Annika Kanckos in Helsinki, deren motivierender Rat ein zuverlässiger Begleiter war. Für die freundliche Unterstützung am Institute for Advanced Study danken wir Marcia Tucker.

Die vorliegende Arbeit entstand als Teil des von Jan von Plato in Helsinki, Finnland, geleiteten GODELIANA-Projektes, gefördert vom Europäischen Forschungsrat (ERC) im Rahmen des Förderprogramms *Horizont 2020* (Grant Agreement No. 787758) und von der Akademie Finnlands (Decision No. 318066).

³ Die Bemerkungen im Aflenzband sind teilweise gekürzt oder ergänzt. Jederzeit lohnt es sich, eine Anmerkung aus QM I oder QM II daraufhin zu überprüfen, ob (und wie) sie in den Aflenzband übernommen wurde – die Nummerierung ist aber teilweise abweichend; siehe dazu die Anmerkungen zum Quellenmaterial in Abschn. 1.4.

The Kurt Gödel Papers are on deposit with the Manuscripts Division, Department of Rare Books and Special Collections, Princeton University Library. They are used with permission of the Institute for Advanced Study. Unpublished Copyright Institute for Advanced Study. All rights reserved.

April 2021

Tim Lethen
Oliver Passon

Inhaltsverzeichnis

1 Kurt Gödel und die Quantenmechanik	1
1.1 Biographischer Kontext	1
1.2 Physikalischer Kontext	3
1.3 Kurt Gödel zur Interpretation der Quantenmechanik	6
1.4 Anmerkungen zur Edition	15
Literatur	23
2 Quantenmechanik I	27
3 Quantenmechanik II	69
4 Aflenz	99
5 Die Struktur der Quantenmechanik	117
6 Phantasieren über das Ding-an-sich	121
7 Physik 1935	127
8 Literatur Physik	131
Personenverzeichnis	155

Die folgenden Ausführungen dienen der historischen Kontextualisierung und treffen eine Auswahl an relevanten Aspekten. Zunächst geben wir eine Skizze von Gödels Lebensumständen in der Zeit der Anfertigung dieser Notizbücher (also um 1935), wenden uns anschließend der Geschichte der Quantentheorie zu und versuchen zum Abschluss eine erste Beantwortung der Frage, welche Stellung Gödel in den Deutungsfragen der Theorie eingenommen hat.

1.1 Biographischer Kontext

Kurt Gödels (1906–1978)¹ wissenschaftlicher Ruhm ist vor allem mit seinen Arbeiten zur „Unvollständigkeit“ mathematischer Systeme aus dem Jahr 1931 verknüpft. Das akademische Jahr 1933/1934 verbrachte der junge Privatdozent der Universität Wien in Princeton, um am *Institute for Advanced Study* (IAS) über diese Resultate eine Reihe von Vorlesungen zu halten.

Im Juni 1934 kehrte er nach Europa zurück und fand Wien im Zustand des politischen Aufbruchs. Der zunehmende Einfluss der Nationalsozialisten zerstörte nicht nur das kulturelle Leben und die Maßnahmen des Kultusministers Kurt Schuschnigg vergifteten zunehmend das geistige Klima an den Universitäten. Am 25. Juli schließlich ermordeten Nationalsozialisten in einem letztlich erfolglosen Putschversuch den österreichischen Kanzler Engelbert Dollfuß und Schuschnigg wurde sein (ebenfalls diktatorisch regierender) Nachfolger. In diese Zeit äußerster Anspannung fiel ein weiteres tragisches Ereignis, nämlich der überraschende Tod von Gödels Lehrer und Mentor, Hans Hahn.

¹ An dieser Stelle wird lediglich der persönlich-biographische Kontext der Entstehungszeit von Gödels Arbeiten zur Quantenmechanik beleuchtet. Einen vollständigen Überblick findet der interessierte Leser im Standardwerk von Dawson (1997). Auf diese Darstellung stützen sich auch die folgenden Bemerkungen (*ibid.* S. 101–112).

All diese Umstände mögen bei Gödel zu einem sich verschlechternden körperlichen und seelischen Zustand beigetragen haben, der schließlich sogar zu einem Aufenthalt im mondänen Sanatorium „Westend“ in Purkersdorf (bei Wien) im Oktober 1934 führte. Gödels Gesundheitszustand blieb in den folgenden Monaten labil und er sah sich gezwungen, die für 1935 geplante Reise an das IAS in die zweite Jahreshälfte zu verschieben.

Für das Frühjahr des Jahres 1935 ist eine intensive Beschäftigung mit physikalischen Themen belegt. Diese umfasst statistische Mechanik, Optik sowie Quantenmechanik; vielleicht belegte Gödel zu dieser Zeit sogar Physikvorlesungen an der Universität Wien.

Im Sommersemester 1935 veranstaltete Gödel ein Seminar zur mathematischen Logik und ebenfalls in diese Periode fallen bedeutende Beiträge zur Mengenlehre. Die Entstehung der beiden Notizbücher zur Quantenmechanik I und II kann auf diese Zeit datiert werden.²

Am 20. September 1935 trat Gödel schließlich die verschobene Reise nach Princeton an. Auf der Überfahrt hatte er mit dem Logiker Paul Bernays und dem Physiker Wolfgang Pauli zwei prominente Reisebegleiter, die ebenfalls einer Einladung an das IAS folgten. Es gibt Hinweise auf intensive Gespräche mit Bernays auf dieser mehrtägigen Überfahrt, aber auch Pauli hat den Austausch mit Gödel gesucht. Es ist kaum vorstellbar, dass dabei die Quantenmechanik kein Gesprächsgegenstand war.

Aus der Zeit in Princeton (also dem Herbst 1935) sind Notizen Gödels zur Differentialgeometrie und Mengenlehre erhalten. Aber bereits im November zwang eine depressive Störung Gödel dazu, den Aufenthalt in den USA vorzeitig abzubrechen. Die Erholung von dieser gesundheitlichen Krise beanspruchte den längsten Teil des folgenden Jahres und es existieren Hinweise auf mehrmonatige Sanatoriumsaufenthalte im Frühjahr bzw. Frühsommer des Jahres 1936. Die bereits erwähnte desolote politische Lage in Österreich mit ihren ganz konkreten Auswirkungen auf die Lebensumstände bestand natürlich unverändert. Mit der Ermordung des von Gödel sehr geschätzten Moritz Schlick am 22. Juni 1936 (verübt im Gebäude der Wiener Universität) ereignete sich zudem ein weiterer Schicksalsschlag.

Gegen Ende des Jahres 1936 kommt es schließlich zu drei Reisen von Gödel in den Kurort Aflenz in der Steiermark (17.–27. August, 2.–24. Oktober und 31. Oktober bis 21. November). Diese Aufenthalte scheinen eher einen Urlaubscharakter gehabt zu haben und bei der zweiten Reise war Gödel in Begleitung seiner späteren Frau Adele. Das Notizbuch „Aflenz 1936“ ist vermutlich beim ersten dieser Aufenthalte entstanden.³

² Die Bemerkung 318 (QM II) enthält die Formulierung: „jetzt ist es 12h, 27./VI.1935“. Es ist wahrscheinlich, dass Gödel hier das Datum der Niederschrift verwendet hat.

³ Wieder hilft hier die Bemerkung 318, die Gödel nicht nur in den Aflenzband übernommen, sondern umformuliert hat: „jetzt ist es $\frac{1}{2}$ 4^h nachmittags, 19./VIII. 1936“. Beachtet man zudem, dass der Aflenzband lediglich 320 Bemerkungen enthält, markiert dieses Datum also vermutlich bereits den Abschluss der Arbeiten.

1.2 Physikalischer Kontext

Kurt Gödels Beschäftigung mit der Quantenmechanik um 1935 fällt in die Zeit ihrer Konsolidierung. Bekanntlich⁴ gliedert man die Geschichte der Quantentheorie grob in die Phase der „alten Quantentheorie“ zwischen 1900 und 1925/1926 and der anschließenden „neuen“ oder „modernen“ Quantentheorie.⁵

Während die erste Phase durch Arbeiten von Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Paul Ehrenfest (sowie frühe Arbeiten von Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli und anderen) dadurch geprägt ist, dass im Wesentlichen die Systeme in Begriffen der herkömmlichen Physik beschrieben werden, die zusätzlichen „Quantenbedingungen“ unterworfen sind, kommt es 1925 („Matrizenmechanik“ von Heisenberg) und 1926 („Wellenmechanik“ von Schrödinger) zur Ausgestaltung von zwei äquivalenten mathematischen Formalismen, die die Eigengesetzlichkeit der Quantentheorie stärker betonen.

Einige Meilensteine der sich anschließenden Entwicklung waren die Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion durch Born 1926, die Formulierung der Unbestimmtheitsrelationen durch Heisenberg 1927 sowie die Aufstellung einer relativistischen Wellengleichung durch Paul Dirac im Jahr 1928. In die gleiche Zeit fallen die Arbeiten von Johann (bzw. John) von Neumann, der die mathematischen Grundlagen der zugrundeliegenden Hilbertraum-Theorie in die noch heute gültiger Form brachte.

All dies mündete in die Veröffentlichung von einflussreichen Lehrbüchern, wie Diracs „The Principles of Quantum Mechanics“ (erste Auflage 1930) oder von Neumanns „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik“ im Jahr 1932, die den vorläufigen Schlusspunkt der dynamischen Theorieentwicklung markieren. Daran schloss sich die rasche *Anwendung* der Theorie auf alte und neue Probleme, sowie die *Verallgemeinerung* im Rahmen der aufkommenden Quantenelektrodynamik an.

An den neuen Formalismus knüpfte sich zudem die Hoffnung, die drängende Frage nach der physikalisch-inhaltlichen Deutung der „Quantenphänomene“ beantworten zu können. Es zeigte sich jedoch rasch, dass die neue Theorie zwar unmittelbar anerkannt und operational beherrscht wurde, die Frage nach der „Bedeutung“ bzw. der „Interpretation“ der abstrakten Begriffe aber kontrovers blieb. In der Rückschau muss dabei gerade das Jahr 1935 als ein erster Höhepunkt in der (immer noch andauernden) Debatte um die Deutung der Quantentheorie erscheinen, denn die Veröffentlichung von zwei legendären Arbeiten fällt in dieses Jahr.

Im Mai 1935 veröffentlichten Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (kurz: EPR) einen Aufsatz mit dem Titel „Can Quantum-Mechanical Description

⁴ Die folgende Darstellung ist äußerst summarisch. Einen vollständigen Überblick findet der interessierte Leser im Standardwerk von Jammer (1966). Auf diese Darstellung stützen sich (falls nichts anderes hervorgehoben wird) auch die folgenden Bemerkungen.

⁵ Im Folgenden verwenden wir die Begriffe „Quantentheorie“ und „Quantenmechanik“ praktisch synonym. Manchmal wird die letztere Bezeichnung für die nicht-relativistische Formulierung reserviert. Die „Quantentheorie“ ist dann ein Oberbegriff, der sowohl die frühen Entwicklungen als auch die spätere Quantenfeldtheorie umfasst.

of Physical Reality Be Considered Complete?“. Ziel dieser Arbeit war der Versuch, die „Unvollständigkeit“ der quantenmechanischen Zustandsbeschreibung nachzuweisen. Zu diesem Zweck wurde ein berühmt gewordenes „Realitätskriterium“ formuliert (Einstein et al. 1935, S. 777):

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of reality corresponding to that quantity. (Hervorhebung im Original)

EPR betrachten anschließend ein (verschränktes) System aus zwei Teilchen in räumlicher Distanz, an denen Messungen von Ort bzw. Impuls durchgeführt werden können. Dies führt auf die Zuordnung von unterschiedlichen Wellenfunktionen für den jeweils *nicht* manipulierten Systemteil. Da die räumliche Distanz die unmittelbare Beeinflussung jedoch auszuschließen scheint (d. h. die obige Bedingung „without in any way disturbing a system“ berücksichtigt), scheint man je nach Messung Elemente der Realität nachzuweisen, die sich innerhalb der QM gegenseitig ausschließen (d. h. Ort und Impuls eines Zustandes). Daraus leiten sie den Schluss ab, dass die quantenmechanische Beschreibung der Situation nicht vollständig sei.

Die Verwendung des Begriffs „Unvollständigkeit“ ist natürlich elektrisierend und tatsächlich liegen Hinweise vor, dass Gödel einen indirekten Anteil an der Gestalt dieses Aufsatzes trägt. Die logisch verwickelte EPR-Argumentation stammt federführend von Boris Podolsky, der wahrscheinlich ein Jahr zuvor die Vorlesungen Gödels in Princeton gehört hatte (Jammer 1985).

Allerdings, und dies ist sicherlich eine kleine Enttäuschung, findet sich in Gödels Notizbüchern *keine* Bezugnahme auf das EPR-Argument. Die jüngsten Quellen, die Gödel dort verwendet, stammen aus dem Jahr 1934.⁶

Damit fehlt in Gödels Notizbüchern zur Quantenmechanik auch die Rezeption eines anderen Meilensteins der Interpretationsgeschichte, nämlich der Aufsatzserie „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“. Ab Ende November 1935 veröffentlichte Schrödinger diese Arbeiten, in denen er unter anderem den Begriff des „verschränkten Zustandes“ prägte. Noch bekannter ist vermutlich das dort beschriebene „burleske“ Experiment, bei dem eine Katze einem tödlichen Gift ausgesetzt wird, sobald ein radioaktives Isotop zerfällt. Dieses Gedankenexperiment um „Schrödingers Katze“ illustriert damit die Schwierigkeiten, den Messprozess innerhalb der Quantenmechanik zu beschreiben; eine Schwierigkeit, die jedoch erst Jahrzehnte später als ein Hauptproblem der Theorie identifiziert wurde.

Diese Arbeiten stammen mit Einstein et al. und Schrödinger von prominenten Kritikern an einer damals einflussreichen Deutung der Quantenmechanik, die maßgeblich von Niels Bohr entwickelt wurde. In der Regel erwecken Lehrbücher der Quantentheorie den Eindruck, dass sich aus den Schriften von Bohr und seinen Mitarbeitern rasch die sog. „Kopenhagener Deutung“ als die „Standardinterpretation“ der

⁶ Allerdings existiert mit dem undatierten Dokument *Literatur Physik* eine Literaturliste Gödels, auf der Bohrs Erwiderung zu EPR vermerkt ist (siehe Kap. 8). In Abschn. 1.3.3 werden wir darauf zurückkommen.

Quantentheorie herausgebildet habe. Diese Darstellung ist historisch jedoch ungenau. Bereits vor über 30 Jahren hat John Heilbron (1988) auf die viel komplexere Rezeptionsgeschichte der sog. „Kopenhagener Deutung“ hingewiesen.⁷

Aber auch wenn die „Kopenhagener Schule“ nicht als eine Gruppe mit homogener Lehrmeinung aufzufassen ist, sondern eher als loses Netzwerk von Physikern⁸ mit nur ähnlichen Lesarten der Interpretation, so stellen die Begriffe der Bohrschen Arbeiten doch eine Folie dar, vor der die Deutungsdebatte sinnvoll rekonstruiert werden kann. Dies gilt umso mehr, als Gödel in seinen Notizbüchern an zahlreichen Stellen auf Bohrs Schriften und Begriffe Bezug nimmt (siehe den folgenden Absatz). Es wird sich also als nützlich erweisen, einige Zentralbegriffe der Bohrschen Philosophie zu rekapitulieren. Wir beziehen uns dabei auf die Darstellung in der sog. Como-Vorlesung (Bohr 1928).⁹

- **Klassische Sprache**

Ein immer wiederkehrendes Motiv der Bohrschen Arbeiten ist die These, dass die Beschreibung der atomphysikalischen Experimente mit den Mitteln der „klassischen Sprache“ bzw. den Begriffen der klassischen Physik zu erfolgen habe. Raum und Zeit seien Beispiele für solche Begriffe, deren Anwendbarkeit jedoch Einschränkungen unterworfen sei (*ibid.*, S. 247).

- **Komplementarität**

Die Quantentheorie zeichnet sich nämlich auch dadurch aus, dass zum Beispiel eine raum-zeitliche Beschreibung und die kausal-deterministische Beschreibung nicht *gemeinsam* angewendet werden können. Bohr bestand nun darauf, dass sich diese Beschreibungen zwar wechselseitig ausschließen, jedoch dennoch erst gemeinsam ein vollständiges Bild des Ablaufes ermöglichen. Für diese Relation prägte er den Begriff der „Komplementarität“ (*ibid.*, S. 245).

- **Das Quantenpostulat**

Das vermutlich wichtigste Merkmal der Quantenphysik drückte sich nach Bohr im kleinen aber endlichen Wert des Planckschen Wirkungsquantums aus. Er formulierte deshalb das sog. „Quantenpostulat“, wonach jeder atomare Prozess „einen Zug von Diskontinuität erhalte“ (*ibid.*, S. 245) und folgerte daraus unter anderem, dass der Einfluss einer Messung *prinzipiell* nicht zu vernachlässigen sei. Dies wiederum bedeute, dass „weder den Phänomenen noch dem Beobachtungsmittel eine selbstständige physikalische Realität im gewöhnlichen Sinne zugeschrieben werden kann“ (*ibid.*, S. 245).

⁷ Die These, dass die Kopenhagener Deutung überhaupt eine einheitliche Formulierung besitzt, wurde von Howard (2004) als „Mythos“ bezeichnet. Der Begriff „Kopenhagener Deutung“ wurde übrigens erst in den 1950er Jahren geprägt (*ibid.*). Schließlich sei noch Camilleri (2006) erwähnt, der auf zahlreiche relevante Unterschiede zwischen Heisenberg und Bohr in Interpretationsfragen hingewiesen hat, obwohl beide als Vertreter der „Kopenhagener Deutung“ gelten.

⁸ Dazu zählen neben Bohr sicherlich: Heisenberg, Pauli, Born, Jordan und von Neumann.

⁹ Gödel kannte diesen Aufsatz und zitiert in Bemerkung 49 (QM I) aus einem Nachdruck von 1931.

Bohrs Arbeiten haben übrigens einen eigentümlichen Duktus und werden von vielen Kommentatoren (mit Recht!) als schwerverständlich beschrieben. Dieser Umstand hat sicherlich begünstigt, dass Bohrs Position mit einer großen Zahl von konkurrierenden Philosophien in Verbindung gebracht wurde. So finden sich zum Beispiel Autoren, die die Nähe der Komplementarität zum dialektischen Materialismus betonen, andere deuten seine Philosophie als positivistisch und wieder andere betonen seine Kantischen Anklänge.

Zu den genannten Begriffen gibt es folglich eine umfangreiche Sekundärliteratur, die konkurrierende Deutungsmöglichkeiten hervorgebracht hat. Im folgenden wird uns diese Mehrdeutigkeit noch beschäftigen.

1.3 Kurt Gödel zur Interpretation der Quantenmechanik

In diesem Abschnitt der Einleitung wollen wir einen ersten Blick auf die Notizbücher zur Quantenmechanik (einschließlich des Aflenzbandes) werfen. Unser Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Frage, welche Position Gödel hinsichtlich der Interpretation der Quantenmechanik eingenommen hat. Plakativ formuliert geht es um die Frage, ob Kurt Gödel eher der „Kopenhagener Schule“ zugerechnet werden muss, auf der Seite von Renegaten wie Einstein und Schrödinger stand oder vielleicht sogar eine ganz eigene Position formuliert hat.

Zu beachten ist, dass uns mit den Aufzeichnungen Gödels keine systematische Darstellung vorliegt. Dieser Text stellt keinen Entwurf für eine Vorlesung (geschweige denn für ein Lehrbuch) zur Quantenmechanik dar. Vielmehr handelt es sich um aphoristische Bemerkungen, längere technische (auch mathematische) Ausführungen sowie Exzerpten aus der Literatur.

1.3.1 Gödels Quellenlage

Die von Gödel zitierte Literatur umfasst Lehrbücher (etwa von Eddington oder von Neumann) und Aufsätze – letztere in auffällig großer Zahl aus der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*.¹⁰ Wie der Name bereits andeutet, handelt es sich hierbei um ein Organ, das es sich zur Aufgabe gemacht hatte, trotz fortschreitender Spezialisierung, Naturwissenschaftlern, Technikern und Ärzten einen Überblick über angrenzende Fachgebiete zu ermöglichen. Dem Gründungsherausgeber Arnold Berliner schwebte 1913 ein deutsches Pendant zur bereits 1869 gegründeten amerikanischen Zeitschrift *Nature* vor (Autrum 1988).

In dieser angesehenen Zeitschrift veröffentlichten führende Wissenschaftler, aber typische Arbeiten waren Antrittsvorlesungen, Beiträge zu Festschriften oder Über-

¹⁰ Zahlreiche Aufsätze stammen dabei sogar aus dem selben Heft, nämlich der Nr. 26 des 17. Jahrgangs (Juni 1929). Zu dieser Festschrift aus Anlass des 50-jährigen Jubiläums von Plancks Promotion trugen praktisch alle Forscher mit Rang und Namen auf diesem Gebiet bei. Gödel zitiert die Beiträge von Bohr, Heisenberg, Jordan, Schrödinger, Compton und London.