

Quanten 5

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT

Schriftenreihe der Heisenberg-Gesellschaft

Hirzel Verlag



Quanten 5

Herausgegeben von Konrad Kleinknecht

SCHRIFTENREIHE DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Herausgegeben von der
Heisenberg-Gesellschaft e.V., München
Band 5

Quanten 5

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT



S. Hirzel Verlag

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

ISBN 978-3-7776-2675-8 (Print)

ISBN 978-3-7776-2684-0 (E-Book)

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsge-
setzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung,
Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen. Gedruckt auf säurefreiem,
alterungsbeständigem Papier.

© 2017 S. Hirzel Verlag Stuttgart

Druck: Offsetdruck Bokor, Bad Tölz

Printed in Germany

Inhalt

- 7 *Vorwort des Herausgebers*

REINHARD F. WERNER

- 9 *Unschärfe von Heisenberg bis heute*

JOHANNES BLÜMER

- 57 *Werner Heisenberg und die kosmische Strahlung*

WERNER HEISENBERG

- 98 *Wandlungen der Grundlagen der exakten
Naturwissenschaft in jüngster Zeit*

TOBIAS JUNG

- 117 *Werner Heisenberg und sein Bezug zu Urfeld*

- 139 *Autoren*

Vorwort des Herausgebers

Der fünfte Band der Reihe „Quanten“ enthält die beiden Vorträge auf der Mitgliederversammlung der Heisenberg-Gesellschaft am 21. Oktober 2016. Reinhard Werner sprach über die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs und ihre Interpretation im Rahmen der Quantenmechanik. Johannes Blümer berichtete über die Arbeiten zur kosmischen Strahlung, die während des zweiten Weltkrieges an dem von Heisenberg geleiteten Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin und nach dem Krieg im neugegründeten Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen durchgeführt wurden sowie über die Ergebnisse der neuesten Experimente zur kosmischen Strahlung .

Als dritten Beitrag haben wir Heisenbergs Vortrag auf der Versammlung der Naturforscher am 17.9.1934 in Hannover aufgenommen. Seit dem Ermächtigungsgesetz im März 1933 hatten sich die Angriffe auf jüdische Wissenschaftler und auf die Entwicklungen der modernen Physik, insbesondere auf die Relativitätstheorie Einsteins und die Quantenmechanik gehäuft.

Alarmiert durch die persönlichen Angriffe des Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Johannes Stark, entschloss sich Heisenberg, bei der Tagung einen Vortrag über die „Wandlungen der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit“ zu halten, in dem er die fundamentale Bedeutung der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik hervorhob und die im „Streit der Tagesmeinungen entstandenen Verzerungen“ zurechtrückte. Auch betonte er die Rolle der theoretischen Physik, die „in der deutschen Öffentlichkeit in letzter Zeit manchmal schief dargestellt worden ist.“

Diese Verteidigung der von den Vertretern der sog. „Deutschen Physik“ verfemten neuen Physik wurde im Ausland als mutiger Schritt bewertet. Wolfgang Pauli schrieb an Heisenberg. „Dein in den Naturwissenschaften publizierter Vortrag hat bei mir wie auch sonst – sowohl wegen der inhaltlichen als auch wegen der taktischen Seite – helle Begeisterung erweckt. Da kann man nur gratulieren!“

Den Abschluss des Bandes bildet ein Essay von Tobias Jung über die Rolle, die das Haus in Urfeld über dem bayerischen Walchensee für Heisenberg und seine Familie spielte, das er im Jahre 1939 von der Tochter des Malers Lovis Corinth erworben hatte.

Im März 2017

KONRAD KLEINKNECHT

VORSITZENDER DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Unschärfe von Heisenberg bis heute

Einleitung

Ich wurde gebeten, in diesem Vortrag wenige Formeln zu verwenden, aber eine kann ich doch nicht vermeiden:

$$\Delta P \Delta Q \geq \hbar/2$$

Dies ist die Heisenbergsche Relation für die Unschärfe des Impulses, ΔP , und die Unschärfe des Ortes, ΔQ , eines Teilchens. Sie ist fast so berühmt wie $E = mc^2$, aber im Gegensatz zu Einsteins Formel kursieren über die Unschärfere relation sogar Witze, wie etwa „Nein, Herr Wachtmeister, ich weiß nicht wie schnell ich gefahren bin, aber dafür weiß ich genau wo ich bin“. Was Unschärfe in der Physik genau bedeutet, ist nicht so einfach zu erklären. Man sieht das schon an den Versuchen, ein „passenderes“ Wort, wie Unbestimmtheit, Unkenntnis oder Ungenauigkeit dafür zu etablieren. Diese Vieldeutigkeit ist schon in

Heisenbergs Arbeit von 1927 angelegt. Ich werde also zunächst dorthin zurückgehen und diesen Bedeutungen nachspüren. Das tue ich allerdings nicht als Historiker, sondern als heutiger theoretischer Physiker. Das heißt, ich erlaube mir auch die ahistorische Frage, wie sich Heisenbergs Aussagen in der ausgereiften quantenmechanischen Sprache rekonstruieren lassen. Dies ist hilfreich, um dann in einem zweiten Teil auch der weiteren Entwicklung der Unschärfeideen nachzugehen.

Teil 1: Heisenbergs Arbeit von 1927

Heisenberg reichte seine Arbeit im März 1927 bei der Zeitschrift für Physik ein, wo sie im gleichen Jahr mit dem Titel: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“ erschien. Ich zitiere sie im Folgenden in der Form [H:Seitenzahl]. Auf andere Arbeiten von ihm verweise ich in der Form [H1], etc., und entsprechend für andere Autoren. Die am Ende gesammelten Anmerkungen sind mit Ziffern bezeichnet.

1.1 An der Schwelle zur Quantenmechanik

Die Arbeit steht mitten in der explosiven Startphase der Quantenmechanik. Nach 26 Jahren des Rätsels war der Knoten geplatzt, und innerhalb einer atemberaubend kurzen Zeit waren die Grundlagen der neuen Theorie geklärt. Drei Teams kamen fast gleichzeitig zu Formulierungen, die ein moderner Physiker mühelos als Versionen der heutigen Theorie erkennt: Born, Jordan und Heisenberg in Göttingen, Dirac in Cambridge und Schrödinger in Zürich, wobei die ersten beiden Teams unmittelbar auf die gleiche Arbeit [H0] Heisenbergs von 1925 zurückgriffen. Mit Schrödingers Arbeit über die Äquivalenz der Zugänge, Borns Ringen um ein Verständnis der Matrizen als Operatoren und schließlich vor allem von Neumanns Arbeiten als Assistent in Hilberts Quantenmechanik-Vorlesung [Hil] Wintersemester

1926/27 hatte die Quantenmechanik 1927 auch ihre ausgereifte mathematische Form erreicht.

Der wissenschaftliche Stil der Ratephase war stark durch Niels Bohr geprägt gewesen. Schon das Atommodell von 1913 bestand aus einer Kombination von klassischen Begriffen, die aber durch geeignete Verbotstafeln eingeschränkt wurden. Dazu kamen die de Broglie-Relationen, die Teilchenbild und Wellenbild miteinander verbanden. Mit dem Durchbruch war dieser halbklassische Stil der „Alten Quantenmechanik“ obsolet und mit ihm der Welle-Teilchen-Dualismus und Bohrs Quantenbedingungen. Wie leicht man auf diesem Weg in die Irre gehen konnte, hatte ja Bohr mit seiner Arbeit zum Atommodell vorgeführt. Was für Wasserstoff [Bo1, Teil I] hervorragend funktioniert hatte (abgesehen vom Drehimpuls des Grundzustandes), versagte für größere Atome [Bo1, Teil II] und Moleküle [Bo1, Teil III] völlig [Kra]. Auch die Versuche der Sommerfeld-Schule, Bohrs Gedanken auf mathematisch-physikalisch kultivierte Weise weiterzuentwickeln hatten sich bald festgefahren. Mit der neuen Quantenmechanik waren nun keine willkürlichen Verbotstafeln mehr nötig, die die Teilchen auf vorgeschriebene Bahnen zwangen: Alles, was daran stimmte, sollte wenigstens im Prinzip aus einer einheitlichen Quelle begründbar sein.

Heisenbergs erste wichtige Arbeit [H0] wurde kurz vor dem Durchbruch geschrieben, die Unschärfearbeit kurz danach. Wichtige Teile sind noch ganz im halbklassischen Stil, aber auch die neue Theorie wird in der etwas umständlichen Form der „Jordan-Diracschen Transformationstheorie“ aufgenommen. Von der modernen mathematischen Grundstruktur und Operatoren im Hilbertraum ist allerdings noch nichts zu sehen. Dies ist auch klar, denn Heisenberg war anscheinend nicht in Kontakt mit von Neumann (auch wenn beide gleichzeitig in Göttingen waren), dessen grundlegende Arbeiten auch erst später im gleichen Jahr erschienen¹.

1.2 Anschaulichkeit

Zum Verständnis von Heisenbergs Motivation ist das Schlüsselwort im Titel „anschaulich“. Dies ist eine direkte Erwiderung darauf, dass viele Physiker die Schrödingersche Theorie „anschaulicher“ fanden, als die Matrizenmechanik von Born, Jordan und Heisenberg. Die Physiker dieser Zeit waren ja mit Wellengleichungen aus der Elektrodynamik und der Hydrodynamik gut vertraut. Aber ganz im Gegensatz zur heutigen Ausbildung stand Lineare Algebra nicht auf dem Lehrplan. Heisenberg wusste 1925 nichts über Matrizen, und selbst Born findet es erwähnenswert, bei wem er diese exotische Mathematik in Breslau gelernt hatte. Die Frage der Anschaulichkeit war also für Heisenberg wichtig, um Primat und Priorität zu verteidigen. Gegen Ende der Arbeit verkündet er diesbezüglich seinen Erfolg und verweist in einer Fußnote [H:196] auf den damit erledigten Gegner: „Schrödinger bezeichnet die Quantenmechanik als formale Theorie von abschreckender, ja abstoßender Unanschaulichkeit und Abstraktheit“².

Wie erreicht nun Heisenberg die Anschaulichkeit? Es ist ja eigenartig, dass die Unschärferelation, die eher negativ eine Begrenzung der zu erreichende Schärfe der Anschauung formuliert, für Heisenberg einen „anschaulichen Inhalt“ begründet. Heisenbergs wichtigster Schachzug ist dabei die Umdefinition des Begriffs: weg von der Visualisierung vor dem geistigen Auge des Betrachters, hin zu einer abstrakten Intuition. Er beginnt seine Arbeit mit dem Satz

Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, daß die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält. [H:172]

Diese Wendung, die Heisenberg auch in seinen späteren Jahren verwendet, ist bemerkenswert modern. „Bilder“ sind zwar hier mit dem Wort „anschaulich“ angesprochen. Aber wie schon die „inneren Scheinbilder“ bei Hertz³ und Galileis geometrische Figuren als Buchstaben im Buch der Natur⁴ müssen es nicht mehr Bilder im Sinn räumlicher Anordnungen sein. Eine algebraische Struktur mit den dazugehörigen Intuitionen käme genauso in Frage wie eine geometrische. Ob diese Aufweitung des Anschauungsbegriffs allerdings Heisenbergs zeitgenössische Kritiker überzeugt hat, ist fraglich. Auch Bohr und Heisenberg selbst sind keine Freunde mathematisch gegründeter Intuition. Sie benutzen „abstrakt“ oder „formal“ eher mit negativer Konnotation. Bei Bohr wird auch der „symbolische Charakter“ der Wellenfunktion hervorgehoben [Bo2], was wohl als Makel gemeint ist.

Interessant an Heisenbergs Eingangssatz ist auch die Erwähnung von „Widersprüchen“. Normalerweise entsteht eine in sich widersprüchliche Theorie nur durch grobe Schnitzer. Gegen welche Art Widersprüche soll man sich denn dann absichern? Dazu muss man sehen, dass die halbklassische Alte Quantentheorie keinen einheitlichen begrifflichen Rahmen besitzt, in dem Widerspruchsfreiheit selbstverständlich wäre. „Die anschauliche Deutung der Quantenmechanik ist bisher noch voll innerer Widersprüche, die sich im Kampf der Meinungen um Diskontinuums- und Kontinuumstheorie, Korpuskeln und Wellen auswirken.“ [H:172]. Konkret hatte Heisenberg einerseits in seiner Arbeit von 1925 den Bahnbegriff für Elektronen kritisiert. Andererseits konnte aber jeder in einer Nebelkammer die Bahnen von Teilchen direkt sehen. Wie konnte man also eine Intuition begründen, die diese beiden Fälle verlässlich zu trennen gestattet?

Genau diese Frage wird in der Arbeit tatsächlich beantwortet. Dabei gehört die Argumentation im Kern in die Alte Quantentheorie. Direkt nach der Aufstellung der Unschärferelation meint Heisenberg zwar „Daß diese Relation in direkter mathe-