

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 Verzerrungen“ 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 Unschärferelation 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 begründeter 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-

matischer Verbindung mit der Vertauschungsrelation steht, wird später gezeigt werden.“ [H:175] und verspricht damit eine Herleitung im Rahmen der Neuen Quantentheorie. Danach sucht man allerdings vergeblich. Es war ihm wohl nicht so wichtig, oder doch schwerer als er zunächst erwartete. Wir halten fest, dass es Heisenberg um einen *Beitrag zur physikalischen Heuristik* geht.

1.3 Die Mikroskop-Passage

Das berühmte Beispiel, an dem Heisenberg seine Argumentation entwickelt, ist einfach ein Mikroskop, bei dem der Ort eines Elektrons durch Betrachtung bestimmt wird. Das Licht zur Betrachtung ist ein γ -Quant, also ein Lichtteilchen, das von dem Elektron gestreut wird. Nach dieser als Compton-Effekt bekannten Wechselwirkung fliegt das Lichtteilchen in ein abbildendes optisches Instrument, wodurch der Ort der Streuung festgehalten wird. Andererseits erfährt das Elektron bei diesem Stoß auch einen Rückstoß, sodass sein Impuls verändert wird. In den Worten Heisenbergs:

Im Augenblick der Ortsbestimmung, also dem Augenblick, in dem das Lichtquant vom Elektron abgelenkt wird, verändert das Elektron seinen Impuls unstetig. Diese Änderung ist um so größer, je kleiner die Wellenlänge des benutzten Lichtes, d.h. je genauer die Ortsbestimmung ist. In dem Moment, in dem der Ort des Elektrons bekannt ist, kann daher sein Impuls nur bis auf Größen, die jener unstetigen Änderung entsprechen, bekannt sein; also je genauer der Ort bestimmt ist, desto ungenauer ist der Impuls bekannt und umgekehrt; H:175]

Charakteristisch ist hier, dass das Lichtquant sowohl als Welle mit einer Wellenlänge, sagen wir λ , auftaucht, aber andererseits auch als Korpuskel mit Impuls $p_1 = h/\lambda$ nach de Broglie, wobei h die Plancksche Konstante ist. Wenn wir die Auflösung q_1 des Mikroskops also in etwa mit der Wellenlänge gleichsetzen und

den Sprung des Elektronenimpulses mit dem Impuls des Photons gleichsetzen (also inelastisch rechnen und dabei auf die richtige Größenordnung hoffen), erhalten wir die Relation

$$p_1 q_1 \sim h.$$

Dies ist die Unschärferelation, getreulich in Heisenbergs eigener Notation wiedergegeben. Das Tilde-Symbol wird bei Heisenberg, ich vermute absichtlich, nicht erklärt. Aus dem Kontext lesen wir es als „größenordnungsmäßig verknüpft mit“: Es trägt jedenfalls die gesamte begriffliche Ungenauigkeit der Identifikation der Auflösung des Mikroskops mit der Wellenlänge und der grob vereinfacht angesetzten Stoßmechanik. Heisenberg unterstreicht damit noch einmal seine Intention, Heuristik zu verbessern, im Gegensatz etwa zu einer quantitativen Theorie.

Für seine simple Identifikation der Auflösung des Mikroskops mit der Wellenlänge des Lichts ist Heisenberg vielfach kritisiert worden, zuerst von Bohr, wie aus der angehängten Bemerkung im Korrekturstadium hervorgeht [H:198]. In der Tat schreit der Begriff „Mikroskop“ danach, hier die Abbesche Theorie des Mikroskops einzubringen, wobei dann die Koordinaten entlang und quer zur optischen Achse verschiedene Rollen spielen und die Apertur des Objektivs eingeht. Auch diese Theorie lässt sich in halbklassischen Begriffen beschreiben und hätte für Heisenbergs Argument die gleiche Funktion erfüllen können, und obendrein den Begriff „Mikroskop“ physikalisch ausgefüllt. Aber man muss Heisenberg vor dieser Kritik in Schutz nehmen. Sein Argument ist etwas abstrakter und damit allgemeiner als die Formulierungen erkennen lassen. Statt von Elektron und Lichtquant hätte er auch von Teilchen A und Teilchen B reden können. Die Details der optischen Abbildung sind nicht wichtig⁵. Außerdem straft hier Heisenberg verständlicherweise eine Theorie mit Nichtbeachtung, wegen der er fast durch die Doktorprüfung gefallen wäre [Rec].