

Geleitwort

Wer meint, Heisenbergs physikalische Prinzipien der Quantentheorie, die Niederschrift seiner Vorlesungen an der Universität Chicago im Jahr 1929, wären lediglich von historischem oder philosophischem Interesse, der irrt. Im Gegenteil, seine Darstellung des, wie er es nennt, „Kopenhagener Geistes der Quantentheorie“ ist eine klare Analyse der neuen Bedeutung und Rolle des Experiments in der Quantenphysik, die heute aktueller ist als je zuvor. Heisenberg konnte in seinen Analysen damals nur auf einige wenige Experimente Bezug nehmen, eine Tatsache, die auch dem Gedankenexperiment, gerade in den Frühzeiten der Quantentheorie, zu einer großen Blüte verhalf. Heute sind Experimente mit einzelnen Quantensystemen Routine in vielen Laboratorien. Die meisten der frühen Gedankenexperimente fanden direkte oder analoge Realisierung, und es gibt sehr viel mehr fundamentale Experimente zur Quantenphysik als zu Heisenbergs Zeiten. Die Interpretationsfragen sind jedoch heute genauso aktuell, wenn nicht aktueller als damals. Einiges in der heutigen Diskussion könnte jedoch durch Rückgriff auf die Wurzeln an Klarheit gewinnen.

Ein konkretes Beispiel ist der Welle-Teilchen-Dualismus, heute noch immer im Zentrum der Diskussion. Heisenberg stellt klar, dass sowohl das Wellenbild als auch das Teilchenbild nur Analogien darstellen, die manchmal zutreffen, manchmal versagen, jedoch beide ihre Grenzen haben. Er stellt auch klar, dass viele Phänomene sowohl durch das Teilchen- als auch durch das Wellenbild erklärbar sind. Ein konkretes und sehr lehrreiches Beispiel ist etwa, wie eine Teilchenbahn in der Wilsonschen Nebelkammer in beiden Bildern verstehbar ist. Sofort intuitiv einsichtig ist ja das Teilchenbild: Danach stößt eben ein Alphateilchen der Reihe nach an verschiedene Atome entlang seiner Bahn. Genauso lässt sich das jedoch mit Hilfe des Wellenbildes verstehen. Hier kommt es durch Vorwärtstreuung dazu, dass Atome de facto nur innerhalb von Streifen, wie Heisenberg sie nennt, in der Vorwärtsrichtung angeregt werden können. Dadurch bilden sich die Bahnen in der Nebelkammer aus. Analog zeigt Heisenberg umgekehrt, wie

die Beugung an einem periodischen Gitter, die wir üblicherweise im Wellenbild sehen, auch im Teilchenbild verstanden werden kann. Diese Dualität der Betrachtungsweise wäre sicher etwas, das man auch für heutige Experimente schärfen sollte.

Widersprüche in der Interpretation treten nur dann auf, wenn man eine Aussage aus ihrem experimentellen Zusammenhang löst. Es hat also nur Sinn, im Kontext desjenigen Experiments über eine bestimmte Eigenschaft eines Systems zu sprechen, das gestattet, diese Eigenschaft tatsächlich zu messen. Die Übertragung von einem Experiment zu einem anderen muss zwangsläufig zu Widersprüchen führen. Es hat keinen Sinn, über Eigenschaften zu sprechen, die ein System „in Wirklichkeit“ besitzt. Ein Problem ist, dass unsere klassische Sprache, die aus der Alltagserfahrung entstanden ist, uns gestattet, auch Sätze zu formulieren, die keinen Sinn ergeben. Heisenberg zählt dazu auch die Behauptung, dass es eine Welt gäbe, zu der es prinzipiell keine Verbindung geben kann. Eine Besinnung auf Aussagen dieser Art würde so manche der heutigen Interpretationsdiskussionen beträchtlich abkürzen.

Der „Kernpunkt“ der Quantentheorie, wie ihn Heisenberg nennt, liegt darin, dass eine Superposition verschiedener Möglichkeiten prinzipiell verschieden ist von einer statistischen Mischung. Daran ändern auch die heutigen Diskussionen zur Dekohärenz nichts, wie schon John Bell bemerkte, der davon sprach, dass die durch Dekohärenz erhaltenen Zustände nur „for all practical purposes“ äquivalent zu den quantenmechanischen Zuständen sind. In der klassischen Physik beschreibt eine statistische Mischung ein gedachtes Ensemble verschiedener klassischer Systeme. Die Messung identifiziert dann lediglich, welcher dieser Fälle tatsächlich vorliegt. Im Gegensatz dazu hat die statistische Mischung der Quantenphysik eine doppelte Rolle: Einerseits kann sie ein Ensemble vieler verschiedener Systeme beschreiben, genauso wie in der klassischen Physik; andererseits kann jedoch auch die Situation eine solche sein, dass sich ein einzelnes quantenmechanisches System durch Kopplung an die Umgebung nicht mehr in einem reinen Zustand befindet. In diesem Fall wählt die Messung nicht eines der Systeme aus, da wir ja nur ein einziges System vor uns haben, sondern reduziert den Zustand auf eine der Möglichkeiten.

Interessant ist die Frage, wo auf diesen Übergang vom einzelnen System zum Resultat der Beobachtung die Grenze zwischen quantenphysikalischer Beschreibung und klassischer Beschreibung zu legen ist. Diese Grenze ist, wie Heisenberg wieder anhand der Wilson'schen Nebelkammerspuren sehr schön zeigt, bis zu einem gewissen Punkt willkürlich. Wenn es nur um die Beschreibung der Spur selbst geht, macht es keinen Unterschied, ob man die Atome, an denen das Alphateilchen streut, noch in das Quantensystem einbezieht oder nicht. Aus moderner Sicht kann man ergänzen, dass es dann einen Unterschied macht, wenn man die Verschränkung zwischen

dem beobachteten Alphateilchen und den Atomen mit in die Betrachtung einbezieht. Die Entstehung dieser Verschränkung ist eine unitäre Evolution, die im Prinzip reversibel sein müsste, eine Herausforderung an künftige Experimentatoren.

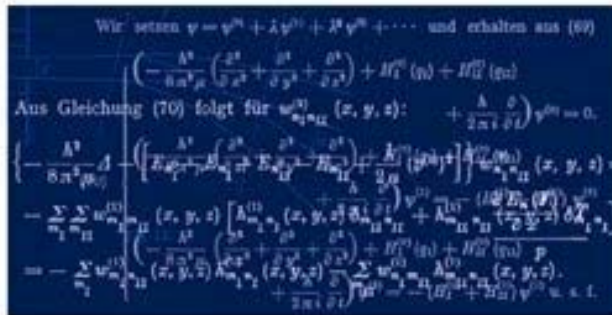
Aus heutiger Sicht könnte man einige der Aussagen Heisenbergs vielleicht etwas schärfen, insbesondere in Hinblick auf den enormen experimentellen Fortschritt, den es seit damals gab. So zeigen zum Beispiel Experimente an der Quanteninterferenz von Makromolekülen sehr klar, dass es tatsächlich eine Frage des experimentellen Apparates ist, ob ein einzelnes System sich quantenmechanisch verhält oder klassisch. An den grundsätzlichen Aussagen würde Heisenberg wohl nichts ändern, obwohl er vielleicht stellenweise etwas vorsichtiger wäre. Zum Beispiel ist die oft sprachlich implizierte Identifikation von „makroskopisch“ mit „klassisch“ und ebenso die Identifikation von „mikroskopisch“ mit „quantenmechanisch“ heute nicht mehr haltbar. Dies dürfte jedoch schon bei Heisenberg eine aus der damaligen experimentellen Situation verstehbare, naheliegende Assoziation gewesen sein. Heute kann man wohl auch die Rolle des Beobachters im Quantenexperiment gegenüber Heisenbergs Zeiten schärfen. Der Übergang von Superposition zu einem statistischen Gemisch ist als Informationsfluss des Quantensystems zu einem anderen System verstehbar, der im Prinzip reversibel ist. Es geht darum, dass es durch die Kopplung an ein anderes System nicht zu einer Kenntnis durch den Beobachter kommt, sondern zur Möglichkeit, dass ein Beobachter eine bestimmte Kenntnis erlangen könnte. Erst damit, dass ein Beobachter diese Kenntnis tatsächlich erlangt, wird die Situation endgültig und für alle Zeiten reversibel, und der Übergang von Möglichkeit zu Wirklichkeit findet statt.

Die Lektüre von Heisenbergs Analyse verschiedener Experimente sei jedem Experimentator empfohlen, der heute Experimente zu den Grundlagen der Quantenphysik durchführt. Es würde sicher zu Heisenbergs Ziel beitragen, das er mit diesem Buch verfolgt hat, nämlich den Glauben an die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie durch tatsächliches Verständnis zu ersetzen. Heisenberg drückt am Ende seines Buchs auch die Erwartung aus, dass die Zukunft eine noch stärkere Einschränkung der klassischen Begriffswelten mit sich bringen wird. Dazu kann sicherlich eine saubere Analyse aktueller Experimente in seinem Sinn wesentlich beitragen.

Wien, Juni 2008

Prof. Dr. Anton Zeilinger

WERNER HEISENBERG



Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie

HIRZEL

Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie
von Werner Heisenberg

Verlag: Hirzel, Stuttgart
Auflage: 5. Auflage
Oktober 2008

ISBN-10: 3777616168
ISBN-13: 978-3777616162

Unter Mitwirkung von:
Fritzsche, Harald (Einf.)
Zeilinger, Anton (Geleitwort)