

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 94 (1976)
Heft: 9

Nachruf: Heisenberg, Werner

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Physiker und Philosoph

In memoriam Werner Heisenberg

DK 92



Am 1. Februar ist im Alter von 74 Jahren in München Werner Heisenberg gestorben, einer der bedeutendsten theoretischen Physiker und Denker unseres Jahrhunderts. Er gehörte (zusammen mit Wolfgang Pauli) zu jenen jungen Physikern und Mathematikern, die in den zwanziger Jahren um Max Born in Göttingen und um Niels Bohr in Kopenhagen mit einer geistigen Schaffenskraft ohnegleichen die *Grundlagen zur modernen Atomlehre* legten. Heisenberg ist in weiten Kreisen durch seine 1927 formulierte *Unbestimmtheits- oder Unschärferelation* bekannt geworden. Danach lässt sich für ein Teilchen gleichzeitig nur der Ort oder der Impuls (oder nur Energie oder Zeit) genau messen. Gewisse Aussagen im Mikrobereich der Natur sind also Wahrscheinlichkeitsaussagen; der messende, beobachtende Wissenschaftler wird gewissermassen ins Experiment einbezogen. Heisenberg hat im vergangenen Jahr in den *Physikalischen Blättern* (31. Jg., Heft 5) unter dem Titel *Bemerkungen über die Entstehung der Unbestimmtheitsrelation* dargestellt, aus welcher physikalischen und erkenntnistheoretischen Situation heraus er vor fast fünfzig Jahren die Unbestimmtheitsrelation gefunden hat. Wir drucken anschliessend diesen Beitrag ab, weil er unter anderem auch von hohem wissenschaftsgeschichtlichen Interesse ist.

Erst 31jährig erhielt Heisenberg den Nobelpreis für Physik 1932 «für die Begründung der Quantenmechanik, deren Anwendung zur Entdeckung der allotropen Formen des Wasserstoffs geführt hat». Er konnte ihn zusammen mit Erwin Schrödinger und Paul Dirac 1933 in Stockholm entgegennehmen.

Über seine Zusammenarbeit mit Bohr äusserte er sich viel später (1966) wie folgt: «Als ich in den Jahren 1926 und 1927 mit Niels Bohr zusammen in Kopenhagen an der begrifflichen Analyse der Quantenmechanik arbeitete, hat es mich tief befriedigt, dass man mit dem mathematischen Schema der Quantentheorie zugleich ein Denkwerkzeug von solcher Schärfe und Präzision gewonnen hatte, dass man mit ihm die Vorurteile des aus dem 19. Jahrhundert übernommenen, scheinbar so einleuchtenden materialistischen Weltbildes zergliedern und beseitigen konnte.»

Später folgten umfangreiche Studien zur *Theorie des Atomkerns* und über *kosmische Strahlung*. Unter der irreführenden Bezeichnung «Weltformel» war lange Zeit Heisenbergs *Allgemeine Feldtheorie der Elementarteilchen* im Gespräch: ein Versuch, alle subatomaren Erscheinungen in einer Formel zusammenzufassen.

Umfangreich ist Heisenbergs *philosophisch-erkenntnistheoretisches* Werk, das dem naturwissenschaftlich interessierten Laien durchaus zugänglich ist. Aus ihm wird evident, welch ein universaler Geist der Absolvent des humanistischen Max-Gymnasiums in München bis an sein Lebensende geblieben ist. Erwähnt seien hier nur die Aufsatzsammlung *«Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft»*, die beiden Taschenbücher *«Das Naturbild der heutigen Physik»* (Rowohlt's Deutsche Enzyklopädie, Nr. 8) und *«Physik und Philosophie»* (Ullstein Buch Nr. 249), ferner die in einem Band vereinigten Reden und Aufsätze *«Schritte über Grenzen»* (Piper-Verlag, München 1973). Ganz besondere Beachtung verdienen seine Gespräche im Umkreis der Atomphysik, die unter dem Titel *«Der Teil und das Ganze»* im zuvor genannten Verlag 1971 erschienen sind. In Form von Dialogen gibt hier der Autor einen Abriss seiner Biographie und der Entwicklung seines physikalischen Denkens.

Viel zu reden gab Heisenbergs Stellung gegenüber dem Nazi-Regime. Er ist in Deutschland geblieben, was ihm heute noch – auch hierzulande – nicht verziehen wird. Immerhin hat er sich als einer der ersten für Albert Einstein eingesetzt und nahm dabei in Kauf, zusammen mit seinem Lehrer Arnold Sommerfeld als «weisser Jude der Wissenschaft» oder als «Ossietzky der Physik» beschimpft zu werden. Von den Exponenten einer «Deutschen Physik» wurde erfolgreich seine Berufung als Nachfolger Sommerfelds nach München hintertrieben. Heisenberg wird aber 1941 Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik in Berlin. Während des Krieges muss er sich mit der Konstruktion von Kernreaktoren befassen, indess man im Ausland meinte, in Deutschland würde eine A-Bombe gebaut. In der nun in Max-Planck-Gesellschaft umbenannten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft wird er nach dem Krieg Direktor des Physik-Instituts in Göttingen, später in München.

Heisenberg wurde am 5. Dezember 1901 als Sohn eines Hochschullehrers für Byzantinistik an der Universität München geboren. In München besuchte er das humanistische Gymnasium. Es folgte das Studium der Physik bei Sommerfeld in München, zu dessen Schülern auch der wenig ältere Wolfgang Pauli gehörte. Es folgen Assistenzjahre bei Born in Göttingen und bei Bohr in Kopenhagen. 1927 wird Heisenberg Professor für theoretische Physik in Leipzig, wo er bis zu seiner Berufung nach Berlin bleibt. *Km.*

Bemerkungen über die Entstehung der Unbestimmtheitsrelation

Die Lage der Quantentheorie im Sommer 1926 kann durch zwei Feststellungen charakterisiert werden: Die mathematische Äquivalenz der Matrizenmechanik und der Wellenmechanik war von Schrödinger bewiesen worden, die innere Widerspruchsfreiheit dieses ganzen mathematischen Schemas konnte kaum mehr bezweifelt werden. Aber die physikalische Deutung dieses Formalismus war noch ganz umstritten. Schrödinger versuchte in Verfolgung der ursprünglichen Ideen von de Broglie, die Materiewellen mit den elektromagnetischen Wellen zu vergleichen, sie als wirkliche, messbare Wellen im dreidimensionalen Raum zu betrachten. Deshalb diskutierte er vorzugsweise jene Fälle, in denen der Konfigurationsraum nur drei Dimensionen hat (Ein-Teilchen-System), und er hoffte, dass die irrationalen Züge der Quantentheorie, insbesondere

die Quantensprünge, in der Wellenmechanik völlig vermieden werden könnten. Die stationären Zustände eines Systems wurden als stehende Wellen definiert, ihre «Energie» war in Wirklichkeit die Frequenz dieser Wellen. Andererseits hatte *Born* den Konfigurationsraum der *Schrödingerschen* Theorie dazu benutzt, Stossprozesse zu beschreiben, und er legte die Annahme zu Grunde, dass das Quadrat der Wellenamplitude im Konfigurationsraum ein Mass für die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden eines Teilchens sei. Er betonte in dieser Weise den statistischen Charakter der Quantentheorie, ohne im einzelnen zu beschreiben, was in Raum und Zeit wirklich geschieht.

Diskussionen um Schrödingers Deutung

Schrödingers Versuch fand bei vielen Physikern Anklang, die nicht bereit waren, die Paradoxien der Quantentheorie zu akzeptieren. Aber die Diskussionen mit ihm im Juli 1926 in München und im September in Kopenhagen zeigten sehr bald, dass eine solche «kontinuierliche» Interpretation der Wellenmechanik nicht einmal das Plancksche Gesetz der Wärmestrahlung erklären konnte. Da *Schrödinger* nicht ganz davon überzeugt werden konnte, schien es mir ausserordentlich wichtig, in einer völlig zweifelsfreien Weise die Frage zu entscheiden, ob die Quantensprünge eine unvermeidbare Folge wären, wenn man jenen Teil der Deutung der Matrizenmechanik akzeptierte, der schon um diese Zeit nicht mehr umstritten war, nämlich die Annahme, dass das Diagonalelement einer Matrix den Zeitmittelwert der entsprechenden physikalischen Variable in dem betreffenden stationären Zustand bedeutet. Daher untersuchte ich ein System, das aus zwei Atomen in Resonanz besteht. Die Energiedifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden stationären Zuständen sollte in den beiden Atomen gleich sein, so dass für dieselbe Gesamtenergie das erste Atom im oberen, das zweite im unteren Zustand sein konnte oder umgekehrt. Wenn die Wechselwirkung zwischen den beiden Atomen sehr klein ist, so sollte man erwarten, dass die Energie langsam zwischen den beiden Atomen hin- und herwandert. In diesem Fall kann man leicht entscheiden, ob die Energie des einen der beiden Atome kontinuierlich vom oberen zum unteren Zustand geht und wieder zurück oder diskontinuierlich als Folge plötzlicher Quantensprünge. Wenn E die Energie dieses einen Atoms ist, dann ist das mittlere Schwankungsquadrat

$$\overline{\Delta E^2} = \overline{(E - \bar{E})^2} = \bar{E^2} - \bar{E}^2$$

ganz verschieden in den beiden Fällen. Die Berechnung beruht nur auf der *nicht* umstrittenen Annahme der Matrizenmechanik, die oben erwähnt wurde. Das Ergebnis entschied klar zu Gunsten der Quantensprünge und gegen die kontinuierliche Änderung.

Der Erfolg dieser Rechnung schien zu zeigen, dass der nicht umstrittene Teil der Deutung der Quantenmechanik schon eindeutig die vollständige Interpretation des mathematischen Schemas bestimmt, und ich war davon überzeugt, dass es keinen freien Raum für irgendwelche neuen Annahmen in der Deutung gab. Tatsächlich musste in dem erwähnten Beispiel das Quadrat des Matrixelements, das von dem Zustand, in dem die Gesamtenergie diagonal ist, zu dem anderen Zustand, in dem die Energie des einen Atoms diagonal ist, als die entsprechende Wahrscheinlichkeit gedeutet werden. Im Herbst 1926 formulierten *Dirac* und *Jordan* die Theorie jener allgemeinen linearen Transformationen, die den kanonischen Transformationen in der klassischen Mechanik entsprechen und die heutzutage die unitären Transformationen im Hilbertraum genannt werden. Jene Autoren deuteten das Quadrat der Elemente der Transformationsmatrix korrekt als die entsprechende Wahrscheinlichkeit. Dies passte zusammen mit *Borns* älteren

Annahmen über das Quadrat der *Schrödingerschen* Wellenfunktion im Konfigurationsraum und mit dem Beispiel der in Resonanz befindlichen Atome. Tatsächlich war es die einzige mit dem alten nicht umstrittenen Teil der quantenmechanischen Deutung verträgliche Annahme. Daher sah es so aus, als sei die korrekte Deutung des mathematischen Schemas damit endgültig gegeben.

Vom mathematischen Schema zur Theorie

Aber war es wirklich eine Deutung, war das mathematische Schema eine Theorie der Phänomene? In der Physik beobachten wir Erscheinungen in Raum und Zeit. Die Theorie sollte uns die Möglichkeit geben, von der gegenwärtigen Beobachtung ausgehend, die weitere Entwicklung eines Phänomens vorauszusehen. Aber an dieser Stelle fingen die wirklichen Schwierigkeiten an. Wir beobachten Phänomene in Raum und Zeit, nicht im Konfigurationsraum oder im Hilbertraum. Wie können wir das Ergebnis einer Beobachtung in das mathematische Schema übersetzen? Zum Beispiel beobachten wir ein Elektron in einer Nebelkammer, das sich in einer gewissen Richtung mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Wie konnte diese Tatsache in der mathematischen Sprache der Quantenmechanik ausgedrückt werden? Die Antwort auf diese Frage war Ende 1926 noch nicht bekannt.

Einige Zeit hatte *Schrödinger* die Möglichkeit diskutiert, dass ein Wellenpaket, das seiner Wellengleichung genügt, das Elektron darstellen könnte. Aber in der Regel breitet sich ein Wellenpaket aus, so dass es nach einiger Zeit über ein Volumen verteilt sein kann, das erheblich grösser ist als das Elektron. In der Natur aber bleibt ein Elektron eben ein Elektron. Diese Deutung war also nicht möglich. *Schrödinger* wies darauf hin, dass in einem Spezialfall, nämlich dem harmonischen Oszillator, das Wellenpaket nicht auseinanderläuft; aber diese Eigenschaft hatte mit der speziellen Tatsache zu tun, dass für den harmonischen Oszillator die Frequenz nicht von der Amplitude abhängt.

Andererseits konnte man nicht daran zweifeln, dass *de Broglies* und *Schrödingers* Bild von den dreidimensionalen Materiewellen einen gewissen Wahrheitsgehalt besass. In den vielen Diskussionen, die wir in Kopenhagen in den Monaten nach *Schrödingers* Besuch hatten, war es vor allem *Bohr*, der auf diesen Punkt immer und immer wieder hinwies. Aber was bedeutet dieser Ausdruck «einen gewissen Wahrheitsgehalt»? Wir hatten ja schon zu viele Feststellungen, die einen gewissen Wahrheitsgehalt enthielten. Wir konnten zum Beispiel die Behauptungen vergleichen «das Elektron bewegt sich in einer Bahn um den Atomkern», «das Elektron bewegt sich auf einer sichtbaren Spur durch die Nebelkammer», «die Elektronenquelle sendet eine Materiewelle aus, die in Kristallen Interferenzen verursachen kann wie eine Lichtwelle». Jede dieser Behauptungen schien teils wahr teils falsch zu sein, und sicherlich passten die Behauptungen nicht zusammen. Wir hatten den bestimmten Eindruck, dass die Sprache, die wir zur Beschreibung der Phänomene verwendeten, irgendwie nicht auf sie passte. Gleichzeitig sahen wir aber doch, dass zum mindesten in einigen Experimenten solche Begriffe wie «Ort» und «Geschwindigkeit» des Elektrons, «Wellenlänge», «Energie» eine genaue Bedeutung hatten; ihr Gegenstück in der Natur konnte sehr genau gemessen werden. Es stellte sich heraus, dass wir für eine wohldefinierte experimentelle Situation immer zu derselben Voraussage kamen, obwohl *Bohr* ein Hin- und Hergehen zwischen Teilchen- und Wellenbild bevorzugte, während ich versuchte, das mathematische Schema und seine Wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung zu benutzen. Trotzdem waren wir nicht im Stand, völlige Klarheit zu gewinnen. Aber wir verstanden, dass die wohldefinierte experimentelle Situation in irgendeiner Weise eine wichtige Rolle in der Voraussage spielte.

Der entscheidende Schritt

Anfang 1927 war ich für einige Wochen allein in Kopenhagen; Bohr war für einen Skiurlaub nach Norwegen gereist. In dieser Zeit konzentrierte ich alle meine Anstrengungen auf die Frage: wie kann die Spur eines Elektrons in einer Nebelkammer im mathematischen Schema der Quantenmechanik dargestellt werden? In der Verzweiflung über die Vergeblichkeit meiner Bemühungen erinnerte ich mich an eine Diskussion mit Einstein und an seine Bemerkung: «Es ist die Theorie, die entscheidet, was beobachtet werden kann.» Deshalb versuchte ich die Frage umzudrehen. Ist es vielleicht wahr, dass nur solche Situationen in der Natur oder im Experiment existieren, die im mathematischen Schema der Quantenmechanik dargestellt werden können? Das bedeutete: Es gab keine wirkliche Bahn des Elektrons in der Nebelkammer. Es gab eine Reihe von Wassertröpfchen. Jedes Tröpfchen bestimmt ungenau die Lage des Elektrons, und die Geschwindigkeit konnte – auch wieder ungenau – aus der Reihe der Tröpfchen ermittelt werden. Eine solche Situation konnte tatsächlich im mathematischen Schema dargestellt werden. Die Berechnung gab eine untere Grenze für das Produkt der Ungenauigkeiten von Ort und Impulsmoment.

Es blieb noch die Aufgabe zu zeigen, dass das Ergebnis irgendeiner wohldefinierten Beobachtung dieser Unbestimmtheitsrelation genügen würde. Viele Experimente wurden diskutiert, und Bohr benützte wieder erfolgreich die beiden Bilder (Wellen- und Teilchenbild) bei der Analyse. Die Ergebnisse bestätigten die Gültigkeit der Unbestimmtheitsrelation. Aber in einer gewissen Weise war dieses Ergebnis auch wieder trivial. Denn wenn der Beobachtungsprozess selbst den Gesetzen der Quantentheorie unterworfen ist, dann muss es ja eigentlich möglich sein, sein Ergebnis im mathematischen Schema dieser Theorie auszudrücken. Aber diese Diskussionen bewiesen zum mindesten, dass die Art, in der die Quantentheorie bei der Analyse der Beobachtungen benützt wurde, völlig verträglich war mit dem mathematischen Schema.

Der entscheidende Punkt in dieser neuen Deutung der Quantentheorie war die Begrenzung in der Anwendbarkeit der klassischen Begriffe. Diese Begrenzung ist in der Tat allgemein und wohldefiniert. Sie gilt für die Begriffe des Teilchenbildes wie Ort, Geschwindigkeit, Energie ebenso wie für die Begriffe des

Wellenbildes, nämlich Amplitude, Wellenlänge, Dichte. In diesem Zusammenhang war sehr befriedigend, dass etwas später Jordan, Klein und Wigner im Stande waren zu zeigen, dass Schrödingers dreidimensionales Wellenbild auch dem Prozess der Quantisierung unterworfen werden konnte und dass es dann – und nur dann – mathematisch äquivalent zur Quantenmechanik war. Die Flexibilität des mathematischen Schemas illustrierte Bohrs Begriff der «Komplementarität». Durch dieses Wort Komplementarität wollte Bohr die Tatsache charakterisieren, dass ein und dasselbe Phänomen manchmal durch sehr verschiedene, möglicherweise sogar widersprechende Bilder beschrieben werden kann, die in dem Sinn komplementär sind, dass beide Bilder notwendig sind, wenn der Quantencharakter des Phänomens sichtbar gemacht werden soll. Die Widersprüche verschwinden, wenn die Begrenzung in den Begriffen in der richtigen Weise eingerechnet wird. So sprachen wir also über die Komplementarität zwischen Wellenbild und Teilchenbild oder zwischen den Begriffen Ort und Geschwindigkeit. In der späteren Literatur hat es Versuche gegeben, diesem Begriff der Komplementarität eine ganz präzise Bedeutung zu geben. Aber es entspricht zum mindesten nicht dem Geist unserer Diskussionen in Kopenhagen des Jahres 1927, wenn man den unvermeidlichen Mangel an Präzision in unserer Sprache mit äusserster Präzision beschreiben möchte.

Es hat andere Versuche gegeben, die traditionelle Sprache der Physik mit ihren klassischen Begriffen für die Beschreibung der Phänomene durch eine neue Sprache zu ersetzen, die dem mathematischen Formalismus der Quantentheorie besser angepasst ist. Aber die Entwicklung der Sprache ist ein historischer Prozess, und künstliche Sprachen wie Esperanto sind bisher nie sehr erfolgreich gewesen. Tatsächlich haben in den vergangenen 50 Jahren die Physiker es vorgezogen, die traditionelle Sprache zur Beschreibung ihrer Experimente zu benutzen mit dem Vorbehalt, dass die Grenzen, die durch die Unbestimmtheitsrelation gesetzt sind, immer bedacht werden müssen. Eine präzisere Sprache hat sich nicht entwickelt, und sie ist auch wohl tatsächlich nicht nötig; denn es scheint eine allgemeine Übereinstimmung über die Schlüsse und Vorhersagen zu bestehen, die von irgendeinem gegebenen Experiment in diesem Gebiet gezogen werden können.

Umschau

Holo-Sicherheitssystem schützt vor Kreditkartenfälschung

Diebstahl und Fälschung von Kreditkarten und Personalausweisen werden sich nicht mehr lohnen, wenn ein holographisches Sicherheitssystem eines deutschen Elektrokonzerns sich durchsetzt. Mit einem Helium-Neon-Laser wird eine Aufnahme der Ausweiskarte hergestellt, die dann in der Karte selbst unter einer Plastiksicht unsichtbar eingeseigelt wird. Der Mann am Bankschalter oder an der Zollkontrolle kann mit einem Blick in ein Speziallesegerät feststellen, ob die sichtbare Information mit dem holographischen Double identisch ist.

Bislang gibt es nur einen Prototyp dieses Holo-Sicherheitssystems. In den USA entwickelte holographische Code-Techniken für ähnliche Zwecke haben sich bisher als zu teuer erwiesen, berichtete die Fachzeitschrift «Electronics». Dortige Sicherheitssysteme enthielten jedoch nur eine oder zwei Angaben, die allein dem Eigentümer bekannt sind, wie etwa der Mädchenname seiner Mutter. Auch solche Informationen könnten in das deutsche System eingegeben werden.

DK 535.411:347.735.009.053

Neuer Sternenkatalog

Einen neuen Sternenkatalog haben Astronomen des Hauptobservatoriums der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in Pulkowo bei Leningrad fertiggestellt. Wie die sowjetische Regierungszeitung «Iswestija» berichtete, enthält er Angaben über Koordinaten und Bewegungen von 1022 hellen und schwachleuchtenden Sternen des nördlichen Himmels.

DK 017:523.8

Fusionsorientierte Plasmaphysik

Auf seiner Januarsitzung hat der Senat der Deutschen Forschungsgemeinschaft die gezielte Förderung der «Fusionsorientierten Plasmaphysik» mit 900 000 Mark im Jahr 1976 beschlossen.

Die Forschung zur Entwicklung eines Kern-Fusionsreaktors ist in der Bundesrepublik zur Zeit im wesentlichen auf das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und das Institut für Plasmaphysik der Kernforschungsanlage Jülich konzentriert. Die Fortschritte der letzten Jahre auf dem Gebiet der Fusionsforschung führten in beiden Zentren zur Konzentration auf immer grössere Experimentiereinrichtungen und zu entsprechender Begrenzung der Grundlagenforschung. Anders als in der entsprechenden