

Hans Peter Dreyer
Ebnet-Kappel, hp.dreyer@thurweb.ch

Von Heisenberg zu Haroche und Wineland: «Kopenhagen» in Gedanken- und Realexperimenten

Auch hier stösst man übrigens wieder darauf, dass man nicht nach p und q zugleich fragen darf. (W. Pauli an W. Heisenberg, 1926)

If I were forced to sum up in one sentence what the Copenhagen interpretation says to me, it would be "Shut up and calculate!" (D. Mermin in PHYSICS TODAY, 1985)

Während Werner Heisenberg eine Professur in Leipzig ausschlägt, um im neuen Zentrum für theoretische Physik in Kopenhagen mit Niels Bohr Forschung betreiben zu können, ist der erst 26-jährige Wolfgang Pauli bereits Professor in Hamburg. Im Herbst 1925 hat er mit der von Heisenberg, Born und Jordan erfundenen Matrizenmechanik die Energieniveaus des H-Atoms berechnen können. Seine Studentin Lucy Mensing untersucht mit der gleichen Methodik die Infrarot-Spektren von zweiatomigen Molekülen und erklärt «Die Rotations-Schwingungsbanden nach der Quantenmechanik». Eine Basis dieser unanschaulichen Theorie ist die Nicht-Vertauschbarkeit von Matrizen, die physikalische Grössen darstellen. Vorschriften wie $pq - qp = h/2\pi i$, wo p die Impuls- und q die Ortsmatrix bedeuten, werden z. B. beim H-Atom bestätigt, aber von Einstein als Hokusfokus bezeichnet.

Besonders angesichts der erfolgreichen Wellenmechanik will Pauli die Hintergründe besser verstehen. Am 19. Oktober 1926 leitet er das Ergebnis seiner Überlegungen in einem zwölfseitigen Brief an Heisenberg weiter. Ein Satz daraus wird berühmt: *Man kann die Welt mit dem p -Auge und man kann sie mit dem q -Auge ansehen, aber wenn man beide Augen aufmachen will, wird man irre.* Paulis Brief zirkuliert in der internationalen Gesellschaft am Kopenhagener Institut. Er wird Ausgangspunkt für Heisenbergs quantitative Unbestimmtheitsrelation, für Bohrs qualitative Komplementarität und für die vielschichtige «Kopenhagener Interpretation» des Formalismus der neuen Physik.



BOHR, HEISENBERG UND PAULI
1936

Ein Streitpunkt ist, ob sich die Quantenmechanik auf Einzelobjekte bezieht, wie Einstein glaubte, oder nur auf



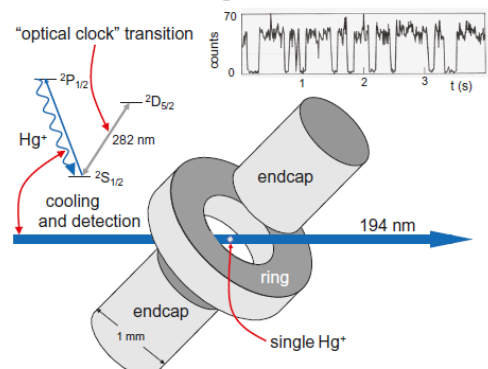
Serge Haroche

David Wineland

grosse Gruppen von gleich präparierten Objekten, sog. Ensembles. Die «Kopenhagener» sind von der Ensemble-Interpretation überzeugt. Noch 1952 schreibt Schrödinger: *It is fair to state that we are not experimenting with single particles any more than we can rise Ichthosauria in the zoo.* Er hat die Entwicklung nicht vorhersehen können, denn genau für solche Experimente werden 2012, viele Jahre später, die Physik-

nobelpreise vergeben. Als Begründung dieser Ehre für den Franzosen Serge Haroche und den Amerikaner David Wineland steht: (...) *for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems.*

Die Suche nach immer präziseren Atomuhren motiviert Winelands Team zu raffinierten Experimenten. Im Bild ist eine elektromagnetische Falle dargestellt, die **ein einzelnes Hg-Ion** festhält. Es wird durch einen UV-Laser beleuchtet, der es zum Fluoreszieren bringen. Das kleine Diagramm zeigt, dass die Fluoreszenz immer wieder kurz unterbrochen wird: die Kurve fällt auf 0. Die Unterbrüche dokumentieren die von Schrödinger verwünschten Quantensprünge des Elektrons vom 2S -Niveau auf das 2D -Niveau und zurück. Im Energiediagramm sind sie als «optical clock transition» bezeichnet: nicht Kern- sondern Atomresonanz! Ein Quantensprung nach oben verunmöglicht die Absorption der 194 nm-Quanten und unterbricht die Fluoreszenz.



WINELAND ET AL.

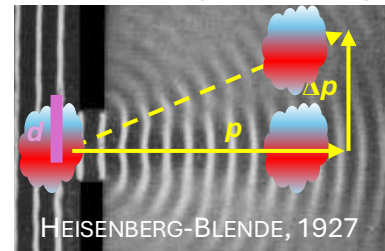
NOBEL

Der spontane Quantensprung ist also kein Konzept, über das man geteilter Meinung sein kann wie Bohr und Schrödinger 1926, sondern ein experimentell bestätigter, auch heute irritierender Wesenszug einzelner Quantenobjekte.

Ein anderer Streitpunkt zwischen Einstein und den «Kopenhagenern» war die Frage, ob man nicht doch gleichzeitig mit dem p - und dem q -Auge sehen könne. Wenn man das könnte, wäre die Unbestimmtheitsrelation verletzt, und die Quantenmechanik müsste in dieser Hinsicht ergänzt werden. Dass die Quantentheorie auch um die Gravitation ergänzt werden müsste – ein bis heute trotz des Gravitons nicht zufriedenstellend gelöstes Problem – erkannte Einstein schon 1916.

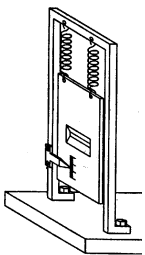
Wie könnte man die aus dem abstrakten Formalismus hervorgehenden Unbestimmtheitsrelationen (UBR) im Gymnasium verstehen? In Heisenbergs Buch «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik» geht es ihm darum, die *Grundbegriffe der Quantentheorie* anhand von Gedankenexperimenten zu erläutern. Im Kapitel «Kritik der physikalischen Begriffe des Partikelbildes» bringt er zwei Experimente. Zuerst untersucht er das berühmte **Heisenberg-Mikroskop**. Es illustriert, wie bei einer Ortsmessung unter dem Mikroskop-Objektiv der Impuls des Lichtquants der Beleuchtung stört und die Genauigkeit einschränkt. Das führt zu $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$. Fasst man Δx und Δp als Ungenauigkeiten der Messwerte für x und p auf, drückt die Beziehung Paulis «Irre werden» quantitativ aus.

Weniger bekannt ist Heisenbergs zweites Gedankenexperiment, bei dem es um eine **Ortsmessung mit Blende** geht. Die Quantenobjekte können auch im Wellenbild untersucht werden, wenn man von ihrer de Broglie-Wellenlänge λ_{dB} ausgeht. Beim Durchgang durch die Blende werden die Wellen gebeugt. Die Ablenkung geht etwa bis zur angedeuteten Stelle. Dort gibt es die 1. konstruktive Interferenz der Beugung am Einfachspalt mit Breite d . Heisenberg nimmt für die Unbestimmtheit des Orts $d \approx \Delta x$. Vor der Blende hatte der Impuls quer zur Ausbreitungsrichtung den Wert 0. Nun besitzt das Quantenobjekt eine Impulskomponente Δp quer zur Ausbreitungsrichtung. $\Delta p/p = \tan\theta_1 \approx \sin\theta_1 = \lambda_{dB}/d \approx (h/p)/\Delta x$. Daraus ergibt sich $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$ wie beim Heisenberg-Mikroskop.

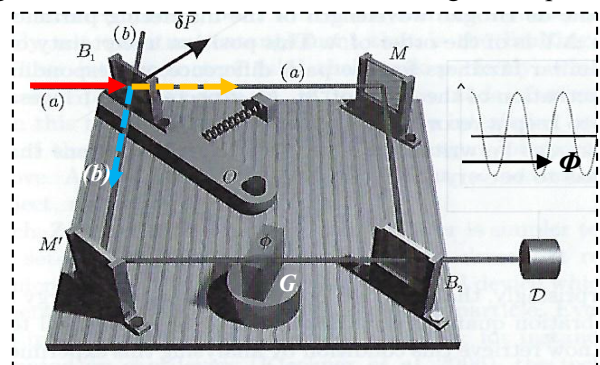


Bedenkenswert und erhellend sind die verschiedenen Bezeichnungen, die verwendet werden. «Unbestimmtheitsprinzip und Komplementarität» heisst das erste Kapitel in Paulis Standardwerk zur Quantenphysik. Sehr oft steht «Unschärferelation». Heisenberg spricht anfänglich von «Ungenauigkeitsrelation». Das tönt nach Messfehler und verdeckt den Sachverhalt, dass bereits vor der Messung die Grössen im Sinn der QM nicht bestimmt sind. Mit Pauli von einem «Prinzip» zu sprechen, ist übertrieben, denn Heisenbergs Ungleichungen ergeben sich aus dem Formalismus. WIKIPEDIA arbeitet auf Deutsch mit *Unschärferelation*, in anderen Sprachen mit *uncertainty principle*, *principe d'incertitude*, *principio di indeterminazione*, *relación de indeterminación*, *Onzekerheidsrelatie*, *Osäkerhetsprincipen*...

Weil Ort und Impuls nicht scharf bestimmt sind, ist der klassische Bahnbegriff im Atombereich unsinnig. Vom Geschehen im Atom lässt sich kein anschauliches Bild machen; es kann nicht raum-zeitlich dargestellt werden. Das missfällt Einstein. Er erfindet ab 1927 immer neue Gedankenexperimente, die die UBR widerlegen und damit das Gebäude der Quantenphysik erschüttern sollen. Vielleicht könnte man mit einem schwingungsfähigen Doppelspalt Ort und Impuls gleichzeitig bestimmen. Bohr macht dazu die Skizze nebenan. So könnte man den Ort direkt (durch welche Spalte) und aus der Schwingung den Impuls indirekt messen. Die Unbestimmtheitsrelation wäre verletzt. Doch nach der Quantenphysik ist auch der schwingende Spalt ein Quantenobjekt. Bei diesem «Welcher-Weg-Gedanken-Experiment» müssten der Wellenaspekt und die Interferenz ganz verschwinden, wenn der Teilchenaspekt via Rückstoss genau gemessen werden könnte.



Weder Einstein noch Heisenberg und die anderen «Kopenhagener» konnten vorhersehen, dass siebzig Jahre später solche Experimente real durchgeführt werden können. Die Forschungsgruppe von Haroche benützt dazu ein sogenanntes **Ramsey-Interferometer** (RI), das formal mit dem bekannten Mach-Zehnder-Interferometer (MZI) übereinstimmt. Dieses ist im Gymnasium verständlich und ermöglicht den Übergang zum RI. Das MZI ist viel empfindlicher als der schwingende Doppelspalt. Es kann in der didaktischen Version* nach Haroche das Gedankenexperiment von Einstein realisieren. Im MZI* der Figur nebenan versetzt der bewegliche, halbdurchlässige Spiegel ein einfallendes Photon (rot) in einen Überlagerungszustand für die zwei Wege «oben» (gelb, a) und «unten» (blau, b).



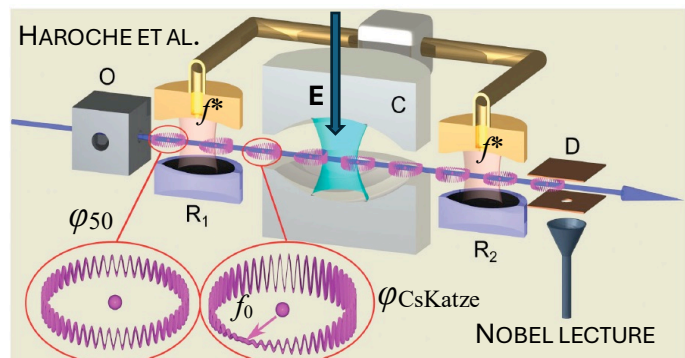
Das Photon ist im «Katzenzustand»: $\varphi_{\text{Photon}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \varphi_{\text{oben}} + \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \varphi_{\text{unten}}$ Im Fall φ_{unten} liefert die Impulsänderung δP einen messbaren Stoss.

Im letzten Spiegel überlagern sich die beiden Summanden nur dann konstruktiv, wenn, z. B. im Glaskörper G, keine Phasenverschiebung erfolgt ist. Verändert man einen Weg und damit die Phasenverschiebung Φ kontinuierlich, zeigt der Detektor D die angedeutete Intensitätskurve aus der Interferenz von a und b . Ist nun der erste Spiegel auf einem beweglichen Arm montiert, liefert er eine Information über den Weg, ähnlich wie Einsteins Spalt. – Ein reales, mechanisches MZI* kann diesen winzigen Impuls allerdings niemals messen.

Was mit einem MZI unmöglich ist, gelingt jedoch mit dem unten abgebildeten Ramsey-Interferometer von Haroche et al. Das Kernelement sind die aus einem Ofen O stammenden, 400 m/s schnellen Cs-Atome. Ihr Valenzelektron wird mit Laserlicht auf eine hohe Energie $n = 50$ und den maximalen Drehimpuls $m = 49$ gebracht, so dass sein Orbital veloschlauchartig und $0.1 \mu\text{m}$ gross wird. In der Nobel-Lecture kennzeichnet Haroche die scheibenförmigen Atome durch ihre de Broglie-Welle φ_{50} . Ein Cs-Atom durchquert im RI zuerst den Mikrowellenresonator R_1 , der mit kurzen Pulsen der Frequenz f^* angesteuert wird. Er übernimmt die Rolle des ersten halbdurchlässigen Spiegels im MZI und versetzt das Cs-Atom in einen Überlagerungszustand aus zwei Niveaus $\varphi_{\text{CsKatze}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \varphi_{49} + \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \varphi_{50}$. φ_{49} bedeutet ein Atom im Zustand $n = 49$ und $m = 48$.

Haroche illustriert den Zustand φ_{CsKatze} mit der Überlagerung von zwei geschlossenen de Broglie-Wellen aus 50 respektive 49 Wellenzügen. Das ist eine geschlossene Schwebung, die eine unsymmetrische Ladungsverteilung und daher ein Dipolmoment besitzt. In der Figur ist es durch den Pfeil dargestellt. Es rotiert wegen des Drehimpulses mit der Frequenz $f_0 = 51 \text{ GHz}$ und liefert eine messbare Phase.

Das Ramsey-Interferometer operiert nicht im anschaulichen sondern im abstrakten Raum der Quantenzustände. Anstelle des letzten Spiegels des MZI wirkt ein synchroner Impuls im Resonator R_2 auf das «Katzen-Atom», dessen Phase beim $20 \mu\text{s}$ dauernden Durchflug durch C ähnlich verändert wird, wie die des Lichts im MZI durch das Glas G. Der Detektor D registriert, ob der Zustand φ_{50} oder φ_{49} ist. Wenn man die Frequenz f^* mit rund 500 kHz um die Resonanzfrequenz f_0 «sweept», zeigt das Ramsey-Interferometer eine φ_{50} - φ_{49} -Variation analog zur hell-dunkel-Variation des MZI, wenn man einen Lichtweg «sweept».



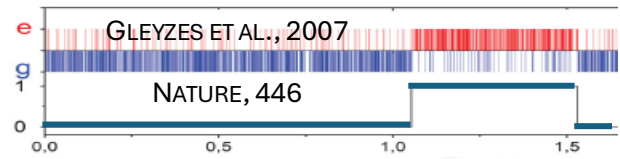
Die Geometrie des optimal spiegelnden Hohlraums C, der quantisierte Strahlung im Radarbereich speichert, ist auf f_0 abgestimmt. Diese Strahlung kann im Teilchenbild als Lichtquantenwolke aufgefasst werden, die zehn Milliarden

Mal zwischen den Wänden hin- und herfliegt. Im Wellenbild ist sie eine stehende Welle mit $\lambda = 6 \text{ mm}$ und mit 9 Knoten. Quantenphysikalisch ist sie ein Sowohl-als-auch. Die Wahl aller Parameter ist derart, dass die Energie $hf_0 = \Delta E$ der Quanten im Resonator genau dem $\Delta E = E_{50} - E_{49}$ entspricht, der Übergangsenergie der Atome. Im Resonanzfall sorgt die Wechselwirkung zwischen dem Atom und dem Feld für einen Energieaustausch und die im RI nachweisbare Phasenverschiebung des «Katzen-Atoms». Die Grösse dieser Phasenverschiebung ist proportional zur Anzahl der Photonen, die in C auf das «Katzen-Atom» einwirken. Diese Anzahl kann durch Reduktion der anfänglich von einem externen Sender E eingestrahltene Photonenmenge eingestellt werden.

Die Messung zeigt, was Paulis «Irre werden», Heisenbergs UBR und Bohrs Komplementarität voraussagen: Je genauer man den Teilchenaspekt des Quantenobjekts ins Auge fasst, desto mehr verschwindet sein Wellenaspekt, wie die Kurven von (a) nach (d) zeigen. Der Spiegel im «normalen», harten MZI wird in (a) durch 0 Photonen in C realisiert. Der schwingend bewegliche Spiegel des MZI* wird im RI im Experiment (d) durch rund 10 Photonen realisiert. Man könnte aus dem Rückstoss auf den Impuls und den Teilchenaspekt schliessen, also verschwindet der Wellenaspekt – auch wenn man es nicht tut.

Haroche, schreibt in «Exploring the Quantum»: [Bohr's] famous 'complementarity principle' can be stated in various equivalent ways. We can say that the wave and corpuscular aspects of material or light particles are complementary. The wave nature of particles manifests itself if the experimental set-up does not permit us to measure their positions. Their corpuscular nature is revealed if a position measurement is performed. (...) Bohrs complementarity is not an independent principle of quantum physics. It is (...) an ensemble of equivalent statements, which interpret the content of the mathematical formalism. It emphasizes that **a physical quantity has no reality unless it has been effectively measured, or at least unless it could be measured within the context of the experiment.**

Es gelingt Haroche et al. sogar, einzelne Lichtquanten nachzuweisen, ohne sie zu zerstören: *Birth, life and death of a single light quantum* ist im Bild sichtbar. Auch bei 0.8 K ist der Resonator C ein «schwarzer Körper», der gemäss Plancks Gesetz strahlt. Die mittlere Energiedichte ist allerdings so gering, dass entsprechend den Überlegungen, die Einstein 1909 veröffentlicht hat, während 95% der Zeit keines, während 5% genau eines und praktisch nie mehr als ein Lichtquant in C anzutreffen sind. Die Strahlung in C wird in einem «superweichen quasi-Compton-Effekt» durch die präparierten Cs-Atome untersucht. «Superweich» weil die Energie des Lichtquants im Resonator rund 10^{10} -mal kleiner ist als diejenige von Comptons Röntgenquanten. «Quasi», weil hier das Lichtquant stationär ist, während die Cs-Atome vorbeifliegen, gerade umgekehrt zum Beschuss von ruhenden Aluminium-Atomen bei Compton. Die hier nicht-resonante Wechselwirkung mit dem Lichtquant führt dazu, dass der präparierte Überlagerungszustand des Atoms im Detektor D in e = «excited» kippt, während eine fehlende Wechselwirkung ohne Lichtquant den Überlagerungszustand in g = «ground» kippen lässt. Das Diagramm zeigt, wie zum Zeitpunkt $t = 1.08$ s die Wärmestrahlung ein Lichtquant gebiert ($0 \rightarrow 1$), das etwa eine halbe Sekunde lebt ($1 \rightarrow 0$). Während dieser Zeit überprüfen hunderte von Atomen seine Existenz «in vivo», indem sie e (rot) zeigen. Unvermeidliche Messfehler führen zu den wenigen (blauen) Fehlanzeigen g .



Voraussetzung für die zerstörungsfreie Messung ist, dass der Resonator C derart gegen f_0 verstimmt wird, dass nur ein winziger Energieaustausch zwischen dem Atom und dem Lichtquant in C erfolgt: Das Atom wirkt für das Quant in C wie ein durchsichtiges Glasscheibchen, das die Lichtgeschwindigkeit um n reduziert und dabei leicht abgebremst wird. Die Energie des Quants steigt um etwa 0.1 ppm, während die interferometrisch messbare Phase der Atom-Katze verzögert wird. Im lesenswerten Buch «Licht – Eine Geschichte» beurteilt Haroche dieses Experiment als *einfach*. Die Ausführungen zeigen, dass es Nobelpreis-würdig ist.

Die Forschungsgruppen von Haroche und von Wineland benützen offensichtlich komplementäre Ansätze: in Paris ist Licht das Untersuchungsobjekt und Atome dienen als Sonden; in Boulder sind Atome das Forschungsobjekt, während Licht als Sonde wirkt. Beide Experimente widerlegen Schrödingers Vermutung, dass Experimentieren mit Einzelobjekten nie möglich sein werde. Sie widerlegen auch seine Sicht, dass Quantenmechanik eine «post mortem-Physik» sei: die Lichtquanten und Ionen bleiben auf diese Weise am Leben, nicht wie in den konventionellen «Klick-Detektoren». – Was würde der Atomskeptiker Ernst Mach, der noch 1900 «die Atomisten» fragte, «Ham's schon eins g'gehn?», heute sagen?

Inhalt und Bedeutung von «Kopenhagen» haben sich im Laufe der Zeit verändert. In den 1950er Jahren nahmen



einige Physiker wieder philosophische Fragen auf. Heisenberg schrieb in den «Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie»: *Im Anfang ging die Kritik an der Deutung der Quantentheorie von den älteren Physikern aus, die von dem Begriffsgebäude der klassischen Physik nicht so viel zu opfern bereit waren, wie hier gefordert wurde (...) In den letzten Jahren haben aber auch verschiedene jüngere Physiker gegen die 'orthodoxe' Deutung Stellung genommen. Aber diese objektive 'Beschreibung' enthüllt sich dabei als eine Art von 'ideologischem*

Überbau', der mit der unmittelbaren physikalischen Realität nur noch wenig zu tun hat. Heisenberg glaubte: [Man] wird wohl annehmen können, dass die Kopenhagener Deutung zwangsläufig [und endgültig] ist.

Auch Bohr äusserte sich «Über Erkenntnisfragen der Quantenphysik» und fand: *Die allmähliche Entwicklung einer treffenden Terminologie zur Darstellung der einfacheren Situation in der physikalischen Wissenschaft [im Vergleich zur Biologie usw.] weist jedoch darauf hin, dass wir es nicht mit mehr oder weniger vagen Analogien zu tun haben, sondern mit klaren Beispielen logischer Beziehungen.*

Heute fasst Claus Kiefer «Kopenhagen» so zusammen: *Der Begriff der Komplementarität in seiner positivistischen Ausgestaltung, wie ihn Bohr nach 1935 brauchte, bildet zusammen mit der Notwendigkeit klassischer Begriffe für Messgeräte das Kernstück von dem, was man heute als Kopenhagener Interpretation bezeichnet.* («Kann die quantenphysikalische Realität als vollständig betrachtet werden?», 2015, S. 77).

Während der mathematische Formalismus der Quantenmechanik sich seit 100 Jahren erfolgreich in immer neuen Anwendungen bestätigt, gibt der philosophische Hintergrund offenbar auch heute noch Anlass für die Position, die David Mermin pointiert äussert: *But I won't shut up!*