

Rechtlicher Hinweis

© Werner Schneider und den zitierten Autoren bzw. ihren Verlagen.

Das Material wird ausschließlich für wissenschaftliche und unterrichtliche Zwecke zur Verfügung gestellt. Sie sind auf der sicheren Seite, wenn Sie es behandeln wie Material aus einer Bibliothek: danach können Sie bis zu sieben Kopien zum privaten Gebrauch ziehen.

Alle darüber hinausgehenden Verwertungsrechte bleiben unberührt.

Technischer Hinweis

Aus technikhistorischen Gründen sind die Fonts nur für den Ausdruck, nicht jedoch die Bildschirmdarstellung optimiert.

Aber nun viel Spaß und erfrischende Adrenalinschübe!

;-) Werner und die Drachen

Entstehungsgeschichte

Entwicklungsphasen (74p⁵⁶⁸)

Geburtsjahr 1900 Definition des Wirkungsquantums h durch Planck

1. alte Quantentheorie (Planck, Einstein, Bohr, Sommerfeld, Compton)
2. Quantenmechanik (de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Jordan, Born, Dirac, Pauli)
3. Relativistische Quantenmechanik, Quantenfeldtheorie (Pauli, Dirac, Feynman,...)

Wirkungsquant h

wird in immer größerem Zusammenhang gesehen; nach Hund: (249p¹¹⁻¹⁷)

1900–1913 *Quantenstatistik*: Austausch von Materie und Strahlung; spätere Bose-Einstein-Statistik. h begrenzt die Zahl der Fälle, die zu einem Makrozustand gehören.

1905–1923 *Welle-Teilchen-Dualismus* beim Licht: h bestimmt die Wechselwirkung von Licht und Materie

1913–1925 *Atomdynamik*: h liefert “Bahnen” im Bohrschen Atommodell

1925–1927 *Unschärferelation*: h begrenzt die Beschreibbarkeit im klassischen Sinne

Oszillator

Planck, 1906; nach Hund (249p⁴²): “Die Verteilung der Energiequanten $\epsilon = h\nu$ ist äquivalent der Annahme, dass diese nur die Energien $E = h\nu n$ haben.” Der harmonische Oszillator durchläuft im (x,p) -Phasenraum die Ellipse

$$\frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2} = E$$

mit Flächeninhalt (“Phasenausdehnung”) $\Phi = \pi ab$, wobei Halbachsen a und b bestimmt sind durch

$$\frac{m\omega^2 a^2}{2} = \frac{b^2}{2m} = E$$

Es gilt also

$$\Phi = 2\pi \frac{E}{\omega} = \frac{E}{\nu}$$

und die Plancksche Setzung läuft damit hinaus auf $\Phi = hn$. Das heißt also: “*Phasengebiete der Größe h werden zu einem einzigen Fall zusammengefasst*”.

h als Zelle

Die physikalische Größe *Wirkung* ist ziemlich abstrakt und schwer vorstellbar. Beim harmonischen Oszillator mit Impuls-Orts-Koordinatenraum kann man sich die Wirkung als Phasenraumvolumen vorstellen (gilt vielleicht auch für höherdimensionale Phasenräume?). Damit wird h zu einer *Minimalzelle im Phasenraum*. Eine solche Interpretation lässt die Unschärferelationen als ganz natürlich erscheinen!

Matrizenmechanik

entsteht Juli – Dezember ’25 (150p⁶⁵⁸)

Heisenberg

Juli ’25 abstrakte Algebra von Observablen. Wird von Born und Jordan im September in korrekte Mathematik transkribiert. Sie finden den Kommutator:

Kommutator

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$$

– unabhängig auch von Dirac (23j) aufgestellt. Theorie bis Weihnachten ’25 von Born, Heisenberg und Jordan in Form gebracht. Heisenberg-Artikel über mathematische Struktur kurz vor Weihnachten. Bis dahin berechnet Pauli die Eigenwerte des Wasserstoffatoms.

<u>Wellenmechanik</u>	entstanden Juli – Juni '26 (150p ^{660f})
<u>Einstein</u>	(1925) Quantentheorie des idealen Gases, zweite Abhandlung <i>Sitzungsber. der Pr. Ak. d. W., Berlin</i> Einstein greift Materiewellen aus deBroglies Dissertation auf und zieht Analogien zwischen Quanten- und Molekülgas. Suprafluidität, Bose-Einstein-Statistik, -Kondensation.
<u>Schrödinger</u>	<u>baut darauf</u> Behandlung des Wasserstoffatoms als Eigenwertproblem auf: stehende Materiewellen. Eine Einstein, Ehrenfest und vielen Experimentalisten (wie Wilhelm Wien in München) sehr wohlgefällige Behandlung durch partielle Differenzialgleichungen. Herleitung gelingt Ende '25, veröffentlicht 26.1.'26 in <i>Annalen der Physik</i> : "Quantisierung als Eigenwertproblem", dicht gefolgt von 2 gleichnamigen Fortsetzungen.
<u>Schrödinger</u>	<u>beweist</u> dabei Äquivalenz von Matrizen- und Wellenmechanik (März 26). In "Vierter Abhandlung" Versuch einer Deutung der Wellenfunktion als Welle im physikalischen Raum ("Führungsfeld").
<u>Welle/Matrix</u>	"Die Quantentheorie trat in zweierlei Gestalt auf, deren eine auf das anschauliche Bild realer Materiewellen gegründet war, während die andere unter einer Art 'Bilderverbot' operierte, also jede Modellvorstellung als irreführend und inhaltslos verwarf." (150p ⁶⁶³)
<u>Einstein/Heisenberg</u>	Frühjahr 1926. Heisenberg trägt den "Göttern der theoretischen Physik ... Planck, Einstein, Laue und Nernst" in Berlin vor über die von Born, Jordan, Dirac, Pauli und ihm aufgestellte QM. Einstein bittet Heisenberg in seine Wohnung und fragt ihn nach seiner "Philosophie". Heisenberg beruft sich auf die Relativitätstheorie: es sei vernünftig, "in das mathematische Schema nur beobachtbare Größen einzuführen und dadurch die Mathematik auf etwas anzuwenden, was auch experimentelle Bedeutung hat." Einstein lacht: "Ganz falsch." Erst die Theorie entscheide, was beobachtet werden kann. Das gab Heisenberg "sehr viel zu denken" und half ihm "auch in späteren Überlegungen sehr viel weiter", (223p ¹⁹⁴) vor allem bei denen, die zu den Unbestimmtheitsrelation führten.
<u>Kritik Welle</u>	Materiewelle ist nicht zeitlich stabil. Bei Mehrteilchensystem nur im Konfigurationsraum, nicht als räumliche Welle interpretierbar
<u>Born</u>	Juni/Juli 26: Deutung der Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsamplitude.
<u>Unbestimmtheit</u>	Mitte 1927 von Heisenberg als formale Konsequenz der Vertauschungsrelationen
<u>Komplementarität</u>	Erstfassung Bohr September 1927 in Como. Bohr ist "Direktor der Atomtheorie", der große Kommunikator und Integrator.
<u>Übereinander</u>	<u>sprachen</u> das "realistische Lager" und die indeterministische "Knabenphysik" schlecht. In München spotteten die "realistischen" Experimentalphysiker über "Atomystik" und hoffen, dass Schrödinger dem "Quantenzauber" bald ein Ende macht. Heisenberg ist "entsetzt" über Schrödingers Deutung. →MW-102
<u>Schrödinger</u>	<u>über</u> die Matrizenmechanik: "Eines genetischen Zusammenhangs mit Heisenberg bin ich mir durchaus nicht bewusst. Ich hatte von seiner Theorie natürlich Kenntnis, fühlte mich aber durch die sehr schwierig scheinenden Methoden der transzendenten Algebra und durch den Mangel an Anschaulichkeit abgeschreckt, um nicht zu sagen abgestoßen." (150p ⁶⁶²)
<u>Heisenberg</u>	<u>über</u> die Anschaulichkeit der Wellenmechanik: "... ich finde es Mist." (Brief an Pauli) (150p ⁶⁶³)
<u>Quantentheorie</u>	von Neumann 1928: Mathematische Standard-Darstellung; Matrizen- und Wellenmechanik als verschiedene Realisierungen der abstrakten Theorie im Hilbertraum.

Einstein und die QM

Solvay '27 Ende Oktober 1927 Solvay-Konferenz in Brüssel. Großer Showdown zwischen Bohr und Einstein; verbindlich, aber sehr hart in der Sache. Sieg der Kopenhage-

ner Deutung. Einstein erkennt den fortschrittlichen Charakter der QM an, gesteht ihr sogar den Gehalt ewiger Wahrheit zu, hält die Theorie aber dennoch für prinzipiell unvollständig und will weiter versuchen, sie als Prinzipientheorie abzuleiten. Einstein sondert sich damit ab 1927 bis zu seinem Tode vom physikalischen Hauptstrom ab.

(436p²³⁴) Die Polarisierung (Einstein/Schrödinger–Bohr) war bei aller Freundschaft heftig. Nach Heisenberg habe Einsteins Freund Ehrenfest im Hotel vor allen Kollegen gesagt: “Einstein, ich schäme mich für Dich, denn Du verhältst Dich jetzt hier bei der Quantentheorie genauso wie die Gegner der Relativitätstheorie.” Hermann weist auf die Ungerechtigkeit des Anwurfs hin. (230p³¹⁵)

(230p³¹⁵) Die auf der Solvay-Konferenz durchgesetzte, abschließende Kopenhagener Deutung brachte Einstein “den großen Wendepunkt in seinem Leben. Die jungen Physiker datierten erst von hier den Beginn des ‘Goldenen Zeitalters’ ihrer Wissenschaft. Die Schwierigkeiten in der Atomphysik waren beseitigt, und noch ausgeprägter als in den früheren Jahren wandten sich gerade die begabtesten jungen Menschen dieser Wissenschaft zu.

Einstein aber stand von nun an abseits, und die großen Entwicklungen gingen an ihm vorbei. Er verstand und verfolgte nicht mehr, was sich in der Atomphysik und in der sich aus dieser entwickelnden Kernphysik abspielte. Seit 1905, also über 20 Jahre lang, hatte er mit seinen Ideen die Wissenschaft stimuliert. Diese Zeit war nun vorbei. Im Scherz meinte er oft, er habe sich von einem ‘Bonzen’ zum ‘Ketzer’ entwickelt. Das ist durchaus zutreffend. Niels Bohr dagegen wurde zu einem wahren ‘Vater der Atomphysiker’, der die begabtesten jungen Physiker um sich scharte und von dem ständig wissenschaftliche Anregungen ausgingen.”

apropos EPR Pauli an Heisenberg: “Einstein hat sich wieder einmal zur QM geäußert, ... gemeinsam mit Podolsky und Rosen – keine gute Kompanie übrigens. ... Bekanntlich ist das jedes Mal eine Katastrophe: ‘Weil, so schließt er messerscharf, nicht sein kann, was nicht sein darf’ (Morgenstern) ... Immerhin möchte ich zugestehen, dass ich, wenn mir ein Student in jüngeren Semestern solche Einwände machen würde, diesen für ganz intelligent und hoffnungsvoll halten würde.” (230p⁴²⁵)

Verpasste Chancen WS 02.08.2002

Es hat hier leider kräftig gemenschelt in der QM, und das ist der Wissenschaft nicht zugutegekommen. Tatsächlich hatte die wissenschaftliche Debatte um die QM einen ideologischen (um nicht zu sagen: religiösen) doppelten Boden. (530) Wissenschaftlich fruchtbar war der Streit insofern, als die siegreichen ‘Kopenhagener’ die QM dazu brachten, nicht nur einigermaßen sicher auf einem Bein zu stehen, sondern auch noch große Sprünge mit diesem einen Bein zu machen: die weiter bestehenden Grundsatzprobleme konnte man über der Fülle der sich eröffnenden technischen Anwendungen bis in die 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts hinein einwandfrei verdrängen.

Heute sehen wir viel besser, dass die ‘Ingenieur-QM’, auch wenn sie mit dem einen Bein munter technisch dahersprang, als *Wissenschaft* nicht auf diesem Bein allein stehen kann. Einstein hatte nicht immer, aber in zwei entscheidenden Punkten Recht: die QM ist unvollständig, und das EPR-Paradoxon legte wirklich den Finger auf eine tiefe Wunde. Es geht um weit mehr als nur Interpretationsfragen, und gegen Ende des Jahrhunderts kam tatsächlich wieder etwas Bewegung in die zu lange scheinbar entschiedene Frage.

what if Aber was wäre gewesen, wenn die ‘Knabenphysiker’ um Bohr den alten Einstein ernster genommen hätten? Wenn Bohr und Einstein im Endeffekt nicht so schwungvoll aneinander vorbeigeredet hätten? Wenn Einstein sich nicht verbittert in Princeton eingemauert hätte bzw. eingemauert worden wäre (es galt als nicht gut für die Karriere, für Einstein zu arbeiten.)

Die Geschichte der QM schleppte sich nach den glorreichen Zwanzigern noch einige Jährchen dahin, galt aber als durch von Neumann im Wesentlichen abgeschlossen. Ansätze, sie wieder in Schwung zu bringen (z.B. durch Bohm(36)), wurden in der Fachwelt kaum wahrgenommen.

→QM-9

Was heute, wo der religiöse Dampf raus ist aus der Diskussion, kein ernsthafter Theoretiker mehr zu bestreiten wagt – die eklatante Unvollständigkeit der QM – war eigentlich seit 1928 für jeden Unvoreingenommenen gut sichtbar, wenn er sich nur die Mühe machte, von Neumanns *Grundlagen* genau zu lesen. (531) Es war eben nicht Einstein, der an der QM etwas Grundlegendes nicht verstanden hatte und nicht verstehen wollte, sondern es waren eher die Knabenphysiker (Heisenberg, Dirac, Pauli), die auf Palmströms Spuren wandelten. Sie überließen es Übervater Bohr, die QM gegen die fundamentalen Angriffe Einsteins zu immunisieren.

Quantenesoterik

An die Stelle seriöser theoretischer Diskussion trat blühende Mystifikation, amüsant im SF-Roman, aber im Prachtgewand hochkarätiger Physiktheorie auftretend einfach hanebüchener Unfug – wie etwa die berühmte These, das beobachtende Bewusstsein müsse fundamentalen Anteil an der physikalischen Realität haben, oder der Beobachtung seien prinzipiellere Grenzen gesetzt, als die Klassische Physik kenne. Lustige Thesen, wirklich, doch die Quantentheorie kommt gut ohne sie aus und kann im Wesentlichen genauso (d.h. genauso *viel* und genauso *wenig*) ‘realistisch’ interpretiert werden wie die Klassische Physik.

‘Komplementarität’, ‘Unschärferelation’, ‘Indeterminismus’, ‘Akausalität’ – ein reichlich schiefer Tummelplatz für Rezeptionsirrtümer, zu deren gedankenloser Aufrechterhaltung auch heute noch viele ‘studierte Physiker’ beitragen, die es genauer wissen wollten. In diesem verquastem *Die-QM-hat-bewiesen*-Diskurs wird meist völlig übersehen, worin das wirklich unumkehrbar Revolutionäre an der QM besteht, nämlich nicht in *philosophischen*, sondern überaus *realen* Konsequenzen: dem konkreten Abschied von der Lokalität. (Einstein, Rosen, Podolsky, Bell, Aspect, Zeilinger personifizieren die markantesten Stadien dieses Abschieds.)

Was hätte sein können, wenn Einstein nicht in die Sektiererposition gedrängt worden wäre, sondern sich ebenso kräftig in die Atomphysik eingemischt hätte wie Bohr? Die Vermutung scheint mir nicht gewagt: die QM wäre vielleicht bis zur Mitte des Jahrhunderts auf zwei Beine zu stehen gekommen. Und wie weit hätte die theoretische Physik mit diesen beiden Beinen kommen können? Tatsächlich bewegt sie sich – was die physikalische Basistheorie anbelangt – seit den 30-er Jahren überwiegend im Kreise oder stellt (in der Superstringtheorie →GP-13) Wechsel auf die Zukunft aus.

Einsteins himself

Position dargelegt in “Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher” (436)

→QM-9

Modern gesprochen, weist Einstein auf das Problem der Reduktion der Wellenfunktion bzw. des Messproblems hin: 1) sinnvoll nur als statistische Interpretation 2) auch Einzelsysteme können im Rahmen einer Messung reduziert werden, so dass die makroskopische Realität der Messung in der Luft hängt. Dieses Problem ist bis heute offen geblieben! →QM-9

(436p²³⁴)

Einstein:Vertreter der Kopenhagener Interpretation wie “Born, Pauli, Heitler, Bohr, Margenau sehen es auf Grund der Erfolge dieser Theorie als erwiesen an, dass eine im Sinne der Theorie vollständige Beschreibung eines Systems im Prinzip nur statistische Aussagen bezüglich der an diesem System messbaren Größen involvieren könne. Sie sind wohl alle der Ansicht, dass die Heisenbergschen Unschärferelationen (deren Zutreffen meiner Ansicht nach mit Recht als endgültig erwiesen betrachtet wird) den Charakter aller denkbaren vernünftigen physikalischen Theorien im Prinzip in dem angedeuteten Sinne präjudizieren. Ich will im folgenden Gründe anführen, die mich davon abhalten, mich dieser Meinung fast

aller zeitgenössischen Physiker anzuschließen. Ich bin sogar fest davon überzeugt, dass der grundsätzlich statistische Charakter der gegenwärtigen Quantentheorie einfach dem Umstande zuzuschreiben ist, dass diese mit einer unvollständigen Beschreibung der physikalischen Systeme operiert.

Vor allem aber soll der Leser überzeugt sein, dass ich den sehr bedeutenden Fortschritt, den die statistische Quantentheorie der theoretischen Physik gebracht hat, voll anerkenne. Auf dem Gebiet der *mechanischen* Vorgänge – d.h. überall da, wo die Wechselwirkung der Gebilde und ihrer Teile zueinander durch die Setzung einer potenziellen Energie zwischen materiellen Punkten hinreichend genau berücksichtigt werden kann, stellt sie schon jetzt ein System dar, das in seiner Geschlossenheit die überhaupt theoretisch zu erwartenden empirischen Beziehungen zwischen den konstatierbaren Erscheinungen richtig darstellt. Die Theorie ist bisher die einzige, welcher den korpuskularen und undulatorischen Doppelcharakter der Materie logisch befriedigend vereinigt, und die in ihr enthaltenen (prüfbaren) Beziehungen sind nach Maßgabe der durch die Unbestimmtheitsrelation gesetzten natürlichen Grenzen *vollständig*. Die in dieser Theorie gegebenen formalen Zusammenhänge – das heißt ihr ganzer mathematischer Formalismus – müssen wohl in jeder brauchbaren Theorie in Form von logischen Folgerungen enthalten sein.

(436²³⁵)

Was mich an der Theorie vom prinzipiellen Standpunkt aus nicht befriedigt, ist die in ihr vertretene Stellung zu dem, was mir als das programmatische Ziel aller Physik erscheint: die vollständige Beschreibung der naturgesetzlich möglichen realen Sachverhalte. Wenn der positivistisch eingestellte moderne Physiker eine solche Formulierung hört, ist seine Reaktion ein mitleidiges Lächeln. Er sagt sich: 'Da haben wir die nackte Formulierung eines inhaltlich leeren metaphysischen Vorurteils vor uns, das überwunden zu haben das Hauptverdienst der Physiker in dem letzten Vierteljahrhundert ist. Hat je ein Mensch einen *realen Sachverhalt* wahrgenommen? Kann überhaupt jemand sagen, er wisse, was unter *realem Sachverhalt* zu verstehen ist? Wie ist es möglich, dass heute noch ein vernünftiger Mensch glaubt, er könne unsere prinzipiellen Erkenntnisse widerlegen, indem er ein solches blutleeres Gespenst aufmarschieren lässt?' Geduld! Die obige Charakterisierung sollte nicht dazu dienen, jemand zu überzeugen, sie sollte nur den Gesichtspunkt andeuten, um den sich die nachfolgenden elementaren Überlegungen zwanglos gruppieren. Dabei will ich so vorgehen: Ich will zunächst an einfachen Sonderfällen zeigen, worauf es mir ankommt, und erst nachher so kurz als möglich auf das Prinzipiell-Begriffliche eingehen.

Wir betrachten als physikalisches System zunächst ein radioaktives Atom von bestimmter mittlerer Zerfallszeit, das praktisch ortsscharf an einem Punkt des Koordinatensystems befestigt sei. Der radioaktive Prozess besteht in der Aussendung eines (verhältnismäßig leichten) Teilchens. Der Einfachheit halber vernachlässigen wir die Bewegungen des Atoms bzw. Restatoms. Dann können wir das Restatom nach Gamov durch einen Raum von atomistischer Größenordnung ersetzen, der mit einem geschlossenen Wall von potenzieller Energie umgeben ist, der das auszusendende Teilchen zur Zeit $t=0$ einschließt. Der so schematisierte radioaktive Prozess ist dann bekanntlich im Sinne der elementaren QM durch eine Ψ -Funktion in 3 Dimensionen zu beschreiben, welche zur Zeit $t=0$ nur auf der Innenseite des Walles von null verschieden ist, sich aber im Laufe der positiven Zeiten im Außenraume ausbreitet. Diese Ψ -Funktion impliziert dagegen keine Aussage über den Zeitpunkt des Zerfalles des radioaktiven Atoms.

(436^{p235–236})

Nun stellen wir die Frage: Kann diese theoretische Darstellung als die *vollständige* Beschreibung des Zerfalls eines einzelnen individuellen Atoms aufgefasst werden? Die zunächst plausible Antwort ist: Nein. Denn man ist zunächst geneigt an-

zunehmen, dass das einzelne Atom zu einer bestimmten Zeit zerfällt. Ein solcher bestimmter Zeitwert ist aber in der Beschreibung durch die Ψ -Funktion nicht impliziert. Wenn also das einzelne Atom eine bestimmte Zerfallszeit hat, so muss mit Bezug auf das individuelle Atom die Beschreibung durch die Ψ -Funktion als eine unvollständige Beschreibung aufgefasst werden. Die Ψ -Funktion ist dann als die Beschreibung nicht eines Einzelsystems, sondern einer idealen Systemgesamtheit aufzufassen. Man wird dann zu der Auffassung gedrängt, dass doch eine vollständige Beschreibung des Einzelsystems möglich sein sollte, welche im Rahmen der Begriffswelt der statistischen Quantentheorie keinen Platz hat.

Der Quantentheoretiker wird nun antworten: Diese Erwägung steht und fällt mit der Behauptung, dass es eine bestimmte Zeit des Zerfalls des Einzelatoms tatsächlich gebe. Diese Behauptung ist nun meiner Ansicht nach nicht nur willkürlich, sondern geradezu sinnlos. Die Behauptung der Existenz eines bestimmten Zeitwertes für den Zerfall hat doch nur Sinn, wenn ich diesen Zeitwert im Prinzip empirisch feststellen kann. Eine solche Feststellung (die darauf hinauskommt, die Existenz des Teilchens außerhalb des Kräftewalls nachzuweisen) involviert aber einen endlichen Eingriff in das uns interessierende System, so dass das Ergebnis der Feststellung zu keinem Rückschluss über den Zustand des ungestörten Systems berechtigt. Die Annahme, dass dem einzelnen radioaktiven Atom ein bestimmter Zeitpunkt des Zerfalls zukomme, ist daher durch nichts berechtigt, ebensowenig als die auf diese Annahme gegründete Schlussfolgerung, die Ψ -Funktion könne nicht als vollständige Beschreibung des Einzelsystems aufgefasst werden. Die ganz vermeintliche Schwierigkeit kommt einfach daher, dass man nicht Konstatierbares als 'real' setzt. (Dies ist die Antwort des Quantentheoretikers.)

Was mir an dieser Art des Argumentierens nicht gefällt, ist die nach meiner Überzeugung unhaltbare positivistische Grundeinstellung, die mir mit dem Berkeley'schen Grundsatz 'esse est percipi' zusammenzufallen scheint. Das 'Sein' ist immer etwas von uns gedanklich Konstruiertes, also von uns (im logischen Sinne) frei Gesetztes. Die Berechtigung solcher Setzungen liegt nicht in ihrer Ableitbarkeit aus dem Sinnlich-Gegebenen. Eine derartige Ableitbarkeit (im Sinne einer logischen Deduzierbarkeit) gibt es nie und nirgends, auch nicht in der Domäne des vorwissenschaftlichen Denkens. Die Berechtigung der Setzungen, die für uns das 'Reale' repräsentieren, liegt allein in deren vollkommener oder unvollkommener Eignung, das Sinnlich-Gegebene intelligibel zu machen (der vage Charakter dieses Ausdrucks ist mir hier durch das Streben nach Kürze aufgezwungen): Auf das gewählte Beispiel angewendet, sagt diese Überlegung folgendes:

(436p236–237)

Man kann nicht einfach fragen: 'Existiert ein bestimmter Zeitpunkt für den Zerfall eines Einzelatoms?', sondern nur: 'Ist es im Rahmen unserer theoretischen Gesamtkonstruktion vernünftig, die Existenz eines bestimm-p237ten Zeitpunktes für den Zerfall des Einzelatoms zu setzen?' Man kann nicht einmal fragen, was diese Setzung *bedeutet*. Man kann nur fragen, ob eine solche Setzung im Rahmen des gewählten Begriffssystems im Hinblick auf dessen Leistung, das empirisch Gegebene theoretisch zu erfassen, vernünftig ist oder nicht.

Insofern nun ein Quantentheoretiker den Standpunkt vertritt, dass die Beschreibung durch eine Ψ -Funktion sich nur auf eine ideale Systemgesamtheit, nicht aber auf das Einzelsystem beziehe, kann er ruhig annehmen, dass es einen bestimmten Zeitpunkt des Zerfalls gebe. Wenn er aber die Annahme vertritt, dass seine Beschreibung durch die Ψ -Funktion als die vollständige Beschreibung des Einzelsystems aufzufassen ist, dann muss er die Setzung eines Zerfallszeitpunktes ablehnen. Er kann mit Recht darauf hinweisen, dass eine Feststellung des Zerfallszeit-

punktes an dem isolierten System nicht möglich sei, sondern Eingriffe erfordere, welche solcher Art sind, dass sie bei der Beurteilung der Situation nicht vernachlässigt werden dürfen. Aus einer Feststellung, dass der Zerfall bereits stattgefunden habe, könne z. B. nicht geschlossen werden, dass dies auch dann der Fall wäre, wenn jene Eingriffe nicht stattgefunden hätten. Soweit mir bekannt ist, hat als erster E. Schrödinger auf eine Modifikation dieser Überlegung aufmerksam gemacht, welche eine Interpretation solcher Art als untunlich erscheinen lässt. Statt ein System ins Auge zu fassen, das nur ein radioaktives Atom (und dessen Zerfallsprozess) enthält, fasst man ein System ins Auge, das auch die Mittel zur Konstatierung des radioaktiven Zerfalls mit einschließt, z. B. einen Geigerzähler mit automatischer Registriervorrichtung. Letztere umfasse einen durch ein Uhrwerk bewegten Registrierstreifen, auf dem beim Ansprechen des Zählers eine Marke erzeugt wird. Dies Gesamtsystem ist zwar vom quantenmechanischen Standpunkt aus sehr komplex und sein Konfigurationsraum von sehr hoher Dimension. Aber der Behandlung dieses Gesamtsystems vom Standpunkt der QM steht kein ernstzunehmendes Hindernis entgegen. Auch hier bestimmt die Theorie die Wahrscheinlichkeit jeder Konfiguration aller seiner Koordinaten zu jedem Zeitpunkt. Betrachtet man alle in Frage kommenden Konfigurationen für einen Zeitwert, der groß ist gegenüber der mittleren Zerfallszeit des radioaktiven Atoms, so wird es auf dem Papierstreifen (höchstens) *eine* solche Registriermarke geben. Jeder Koordinatenkonfiguration entspricht einer bestimmten Lage der Marke auf dem Papierstreifen. Da nun aber die Theorie nur die relative Wahrscheinlichkeit der denkbaren Koordinatenkonfigurationen liefert, so liefert sie auch nur relative Wahrscheinlichkeiten für die Lagen der Marke auf dem Registrierstreifen, aber keinen bestimmten Ort für diese Marke.

(436p^{276–238})

Bei dieser Betrachtung spielt der Ort der Marke auf dem Streifen die Rolle, welche in der ursprünglichen Betrachtung der Zeitwert des Zerfalls p^{238} spielt. Der Grund für die Einführung des durch die Registriereinrichtung ergänzten Systems liegt in folgendem. Die Lage der Marke auf dem Registrierstreifen ist ein Tatbestand, der ganz der makroskopischen Begriffssphäre angehört, im Gegensatz zum Zeitpunkt des Zerfalls eines Einzelatoms. Wenn wir es mit der Auffassung versuchen, dass die quantentheoretische Beschreibung als vollständige Beschreibung des Einzelsystems aufzufassen sei, so sind wir zu der Auffassung genötigt, dass der Ort der Marke auf dem Streifen nichts dem System an sich Zukommendes sei, sondern dass die Existenz dieses Ortes von der Ausführung einer Beobachtung an dem Registrierstreifen im Prinzip abhängig sei. Eine solche Auffassung ist nicht widersinnig vom rein logischen Standpunkte aus; aber es dürfte kaum jemand geben, der sie ernsthaft in Betracht zu ziehen geneigt wäre. In der makroskopischen Sphäre glaubt man eben sicher zu sein, an dem Programm einer Realbeschreibung in Raum und Zeit festhalten zu müssen, während man in der Sphäre der Erscheinungen, bei der Quantenstruktur eine entscheidende Rolle spielt, leichter geneigt ist, diess Programm aufzugeben bzw. zu modifizieren.

Diese Diskussion sollte nun folgendes zeigen. Man kommt zu sehr unplausiblen theoretischen Auffassungen, wenn man die These aufrechtzuerhalten versucht, die statistische Quantentheorie leiste im Prinzip die vollständige Beschreibung eines individuellen physikalischen Systems. Dagegen verschwinden jene Schwierigkeiten der theoretischen Auffassung, wenn man die quantenmechanische Beschreibung als die Beschreibung von Systemgesamtheiten betrachtet.”

(13p²⁴⁹)

Dazu ein erstaunliches Zitat von Paul Dirac: “Ich halte es für sehr wahrscheinlich, dass wir zu einer zukünftigen Zeit eine bessere QM haben werden, in der es eine Rückkehr zum Determinismus gibt, und die deshalb die einsteinsche Sicht rechtfertigt. Aber der Preis für eine solche Rückkehr zum Determinismus könnte der

Verzicht auf eine andere grundlegende Idee sein, die wir jetzt fraglos voraussetzen.”

Wann hat er das gesagt?

Quantenlogik?

(248p^{168f})

Mal wieder so ein Versuch, ein inhaltliches Problem formal aus der Welt zu bügeln... Hübner wendet sich gegen die Versuche, aus der QM eine neue Logik herzuleiten. Er nennt und kritisiert als typische Vertreter einer solchen Quantenlogik: Weizsäcker, Reichenbach, Stegmüller, Mittelstaedt.

Weizsäcker

Nach Auffassung von Weizsäcker habe (248p¹⁶⁹) “eine bestimmte empirische Entwicklung innerhalb der modernen Physik eine Änderung der Logik zur Folge... Die Logik wird demnach in den Strom der Veränderungen hineingezogen, der für die Naturwissenschaften verbindlich ist. Damit verliert sie offensichtlich jene unantastbare Apriorität, die seit jeher als ihr hervorragendes Merkmal angesehen wurde; da ihr nur noch ein methodisches Apriori zugestanden wird, dazu dienlich, zu neuen Formen vorzustoßen, gerät sie schließlich in das schwankende Licht empirischer Verbesserungsfähigkeit.”

Reichenbach

Reichenbachs dreiwertige Logik (wahr, unbestimmt, falsch) (248p¹⁷⁴) “besteht aus einer Reihe willkürlicher Definitionen, die wir auch als axiomatische Ausgangspunkte betrachten können, wobei diese Axiome für sich keine unmittelbar und intuitiv einsehbare allgemeine Geltung besitzen. Sie sind vielmehr eigens so konstruiert, damit dann am Ende bei einer entsprechenden Interpretation gewisse empirische Tatsachen der QM und ihrer Gesetze formuliert werden können. Man hat es also hier zwar mit einem eigens der QM angepassten Aussagenkalkül zu tun. Ist es aber dem Begriff der Logik adäquat, einen solchen Aussagenkalkül eine *Aussagenlogik* zu nennen?”

(248p¹⁷⁵)

Hübner bestreitet die ontologische Essenz der Logik: “Die allgemeine Gültigkeit der logischen Axiome bedeutet nun nach einer auf Leibniz zurückgehenden Definition, dass sie in allen möglichen Welten gelten. Dasselbe ist gemeint, wenn man heute sagt, die Logik habe Tautologien zum Gegenstand, also Aussagen, die nichts über die Welt aussagen. Denn was für alle möglichen Welten gilt, das kann nichts über die bestimmte Welt verraten, die wirklich existiert... Nun ist die wechselseitige Komplementarität gewisser Aussagen in der modernen Physik eine kontingente Eigenschaft dieser Welt, etwas, was zu ihrem Sosein gehört, und nicht zu jeder möglichen Welt.”

Stegmüller

(248p^{180f}) weise darauf hin, dass es keine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung etwa für Ort und Impuls gebe; also lasse sich die klassische Wahrscheinlichkeitstheorie nicht anwenden; und um dieselbe wieder anwendbar zu machen, müsse man die Aussagenlogik modifizieren. Hübner weist dies zurück, (248p¹⁸⁴) “denn wenn von zwei möglichen Verteilungen ... immer nur *eine* wahrheitsdefinit sein kann, so widerspricht es ja auch nicht der klassischen Logik, wenn es von ihnen nicht eine *gemeinsame* Verteilung gibt.

(248p¹⁸⁴)

Daher erscheint mir der Ausdruck ‘Quantenlogik’ irreführend und nichts als Verwirrung stiftend. Die QM hat nicht – wie man heute so oft hört – zu einer neuen Logik geführt, sie hat nicht dem Denken neue Formen gegeben, sie hat nicht die Logik in den steten Fluss und Fortschritt der empirischen Wissenschaften mit hineingerissen. Dagegen setzt auch sie die allgemeingültigen Sätze der effektiven Logik voraus.”

!!

Dem schließe ich mich im wesentlichen an. Mit gewisser Berechtigung spricht man von formaler Aussagenlogik. Logik ist mehr dem Reich der Mathematik zuzuordnen: eine gut eingeführte elementare Konstruktion, eine sprachliche Vereinbarung vielleicht nur; in der That ist der Ausdruck “Wahrscheinlichkeitsamplitude” oder “Wahrscheinlich-

keitsverteilung” in der QM nur cum grano salis zu verstehen; es scheint nicht möglich, in den Hilbertraum einen Wahrscheinlichkeitsraum in konsistenter Weise einzubetten. Sicher wäre interessant, über eine Erweiterung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs nachzudenken; absurd erscheint hingegen, darum die Aussagenlogik umzuwerfen, die wohl eher der Struktur unseres mesokosmischen Denkens zuzuordnen ist als der Struktur einer wie auch immer gearteten letzten Wirklichkeit.

Reduktion der Wellenfunktion. <Messproblem>

- U und R** entsprechend Prozess 1 und Prozess 2 nach v. Neumann in (531). Penrose stellt in (393) den Unterschied zwischen diesen Prozessen deutlich heraus. Meist bleibt dieser in Dunkel gehüllt, oder es wird drumherum geschwätzt! Wo hört genau **U** auf, und wo fängt **R** an?
- U** Unitäre Entwicklung des Zustandsvektor (Zustand-, Wellen-, ψ -Funktion) gemäß der zeitabhängigen Schrödingergleichung; deterministisch, linear; das Lieb m .E. lingsgeschäft der Physiker.
- R** Reduktion des Zustandsvektors; “makroskopische Vergrößerung” durch die Messung. Mathematisch die Anwendung eines (nicht-linearen!) Projektionsoperators. Betragsquadratintegral der Wellenfunktion vor Reduktion dann gedeutet als Wahrscheinlichkeitsdichte der reduzierten Zustände des betrachteten Systems, also *nach* der Messung.

Es ist alles andere als klar, wann genau R erfolgt.

- (393p243) “Ob wir nun **R** einfach als Veränderung des zugänglichen ‘Wissens’ über ein System betrachten oder [wie Penrose] als etwas ‘Wirkliches’ – in jedem Fall stehen wir vor zwei völlig verschiedenen mathematischen Methoden, die zeitliche Veränderung des Zustandsvektors eines physikalischen Systems zu beschreiben. Denn **U** ist vollkommen deterministisch, während **R** ein Wahrscheinlichkeitsgesetz ist; **U** erhält die komplex-zahlige Quantenüberlagerung aufrecht, aber **R** verletzt sie krass; **U** wirkt auf kontinuierliche Weise, aber **R** ist geradezu skandalös diskontinuierlich. Aus den Standardverfahren der QM geht überhaupt nicht hervor, wie **R** etwa als ein komplizierter Einzelfall von **U** ‘herzuleiten’ wäre. Es handelt sich einfach um ein von **U** *verschiedenes* Verfahren, das die andere ‘Hälfte’ der Interpretation für den Quantenformalismus liefert. Der gesamte Nicht-Determinismus der Theorie stammt von **R** und nicht von **U**. Sowohl **U** als auch **R** sind für all die wunderbaren Übereinstimmungen erforderlich, welche die Quantentheorie mit den Beobachtungstatsachen aufweist.”

- Schrödinger (452) Schrödingers Katze veranschaulicht genau dies Paradox. In der Realität ist jedem klar, was passiert, und man kann es auch wunderbar berechnen – aber der Übergang von **U** zu **R** bleibt dem gesunden Menschenverstand überlassen. Warum schreibt sich die Überlagerung der Zustände nicht ins Makroskopische fort? Wann und wo genau erfolgt **R**? Was ist makroskopisch? Es gibt kein “Korrespondenzprinzip”, welches **R** als Grenzfall der **U**-Fälle interpretierbar macht.

- Standard Liberale Auffassung: **R** passiert bei der “Messung”; aber was genau ist eine “Messung”? Wenn der quantenmechanische Prozess mit einem hinreichend großen Stück vom Rest der Welt kollidiert? Alles sehr unklar! Da wird sowohl in Lehrbüchern als auch in Vorlesungen oft drüber weg gehuscht!

- Fick deutet in seinem Lehrbuch der QM sogar eine formale Behandlung der Messung an: (163p182) “Eine Messung ist ausgeführt, wenn das Messergebnis an der Messapparatur makroskopisch fixiert ist. ... Die Frage, auf welchem ‘Weg’ sich der Zustandsvektor von $|\phi\rangle$ nach $|\phi'\rangle$ ‘bewegt’ hat, lässt sich wegen des wesentlichen Einflusses der Messapparatur überhaupt nicht im unitären Raum des Messobjekts beschreiben. Für eine Behandlung des Messprozesses ist vielmehr der direkte Pro-

duktraum vom Messobjekt und Messapparatur $U_{\text{obj}} \times U_{\text{App}}$ notwendig. Wir wollen jedoch hierauf nicht näher eingehen.”

Quel dommage! Wirklich EWIG schade!

Blochinzew (32) zieht sich ganz auf statistische Ensembles zurück; mikroskopische Einzelobjekte sind für ihn nicht real.

(32p63) “Die Messung muss so eingerichtet werden, dass letzten Endes nur ihre klassischen Eigenschaften zur Anwendung gelangen, d.h. solche Eigenschaften, in denen die Planck’sche Konstante h keine Rolle spielt.”

(32p67) “Die Messung verwandelt eine reine Gesamtheit in eine gemischte. Diese Umwandlung einer reinen Gesamtheit in eine gemischte ist nichts anderes als die praktische Verwirklichung der spektralen Zerlegung der ursprünglichen Gesamtheit in das Spektrum der reinen Gesamtheiten, die durch die Messvorrichtung ausgesondert werden ... Man darf sich diese Spektralanalysatoren nicht ausschließlich als Laboratoriumsgeräte vorstellen. ... Wo immer in der Natur eine solche Situation verwirklicht wird, in der die spektrale Zerlegung einer ursprünglichen Gesamtheit eintritt, kommt es zur Bildung neuer Gesamtheiten, die durch neue Merkmale bestimmt sind, d.h. es geht das vor sich, was man als ‘Störung durch die Messung’ zu bezeichnen pflegt. Ob dieser Vorgang von einem Beobachter verfolgt wird oder nicht, steht in keinem Zusammenhang mit dem Vorgang als solchen.”

Wigner (551) Wigner meint, **R** erfolgt erst bei Kenntnisnahme durch ein beobachtendes “Bewusstsein”, was immer das genau sein mag.

Bohm (36) Der Übergang von **U** nach **R** wird vom Quantenpotenzial gesteuert (verborgene Variable); alles könnte auch deterministisch sein. **R** kann als ein zu **U** “korrespondierender” Grenzzustand ausgelegt werden. Der prinzipielle Unterschied zwischen **U** nach **R** hebt sich im Quantenpotenzial auf.

Everett (551) 1957: **R** erfolgt nie, alle in **U** erfassten Zustände bleiben bis in alle Ewigkeit. An den Stellen, wo in diesem unseren Universum **R** erfolgt, ist in Wirklichkeit eine Verzweigung in die Welt, in der zufällig Sie, liebes Leser, und ich leben. Jeder mögliche Pfad durch diese Verzweigungen ist eine “Welt”, der ein bestimmtes Wahrscheinlichkeitsmaß zugeordnet wird; da es davon viele gibt, heißt dies die “Viele-Welten-Interpretation” der QM.

(13p249) “Was passiert ..., wenn wir den Quantenformalismus wörtlich nehmen. Nehmen wir an, er beschrieb wirklich alles, sogar den Messprozess.”

(13p250) Die “Viele-Welten-Deutung ... wird aus einem Grund ernstgenommen: sie folgt unleugbar, wenn der mathematische Formalismus der QM für alles in der Welt gelten soll. Wenn ihre Schlüsse vermieden werden sollen, müssen wir annehmen, dass die QM nicht den Messprozess beschreibt.”

(13p251) Die Viele-Welten-Deutung fordere keine lokalen Wechselwirkungen; das bellsche Theorem gelte nicht.

Tatsächlich liefere die EPR-Messung darauf hinaus, festzustellen, ich welche Welt ich geraten bin: die, in dem das eine Teilchen Spin UP, und das andere DOWN hat, oder umgekehrt.

Gell-Mann(184p208f) interpretiert Everetts Welten als alternative “Geschichten” des Universums, die vollständig und disjunkt sind. A und B seien Geschichten, $A+B$ sei die Kombination zweier Geschichten (lies: A **oder** B). Dann lässt sich eine Dekohärenzfunktion $D(A, B)$ definieren mit den Eigenschaften:

$$0 \leq D(x, x) \leq 1 \quad \text{und} \quad D(A+B, A+B) = D(A, A) + D(B, B) + D(A, B) + D(B, A).$$

Für alle Geschichtspaare (A, B) mit Interferenzterm $D(A, B) + D(B, A) = 0$ können die Selbst-Dekohärenzen $D(X, X) = w(X)$ wie Wahrscheinlichkeiten und die Geschichten X als Ereignisse interpretiert werden.

- Prigogine (410) **R** ist ein irreversibler Prozess, auf Quantenchaos rückführbar
- Penrose (393) **U** und **R** sind Grenzfälle einer hypothetischen Quantengravitationstheorie: “In einem gewissen Stadium [von **U**] verwandelt sich diese komplexe lineare Superposition in eine reelle wahrscheinlichkeitsgewichtete Gesamtheit von *tatsächlichen* Alternativen, indem nach dem Verfahren **R** die Absolutquadrate der komplexen Amplitudengewichte gebildet werden. Nur *eine* dieser Alternativen wird ... realisiert ... Ich vertrete nun den Standpunkt, dass dieses Stadium eintritt, sobald die Differenz zwischen den Gravitationsfeldern der verschiedenen Alternativen das Ein-Graviton-Niveau erreicht”. (393p360) Letztlich sind auch hier **U** und **R** derselbe Prozess. Deterministische und indeterministische Beschreibungen sind möglich. Die Reduktion des Wellenpaketes ist damit bei Penrose wie bei Gell-Mann ein irreversibler, objektiver, vom Beobachter unabhängiger, rein physikalischer Prozess. Nur von einem solchen Standpunkt aus lässt sich Quanten-Kosmologie betreiben und vom Quantenzustand des Universums sprechen, der “Wellenfunktion der Welt”.
- Barrow (13p245) “Während die [sich gemäß der Schrödingergleichung entwickelnde] Wellenfunktion deterministisch, linear, stetig und lokal ist und keine ausgezeichnete Zeitrichtung kennt, ist der Messvorgang fast zufällig, nichtlinear, unstetig, nichtlokal und nicht umkehrbar. Zwei Phänomene könnten nicht verschiedener sein.”
- (13p246-p247) “Schrödinger wollte mit der Aufstellung seines Katzenparadoxons darauf hinweisen, dass die Quantentheorie die physikalische Wirklichkeit nicht vollständig beschreibt. Wir sollten unser Wissen von der Katze in einem verschwommenen Zustand sehen, und nicht die Katze selbst. Bohr dagegen hätte behauptet, dass es so etwas wie die Katze selbst nicht gibt. Die einzig existierende Wirklichkeit ist unser Wissen über die Katze. [Was hat Bohr selbst gesagt?] ... Während einige angesehene Physiker behauptet haben, diese begrifflichen Probleme [mit der Messung], belegten die Auflösung der traditionellen Begriffe von ‘Beobachter’ und Beobachtungsgegenstand oder sogar der klassischen Begriffe der Logik, haben andere, vor allem Wigner und von Neumann [?!] sich zu der überraschenden Einstellung bekannt, dass nur bestimmte Arten von Messgeräten, solche, die ein Bewusstsein haben, das dem des Menschen ähnelt, Wellenfunktionen kollabieren lassen können. Es sei, behaupten sie, nicht möglich, die Sätze der QM in einer völlig konsistenten Art zu formulieren, wenn nicht ausdrücklich die Tatsache genutzt wird, dass die letzten Instanzen der Beobachtungsvorgänge bewusste Wesen sind. Eine solche Position erfordert, dass wir glauben, menschliches Bewusstsein sei etwas, das sich ganz anders verhält als alles, was p²⁴⁷ uns sonst in der Natur begegnet. Insbesondere wird sich dann auch die Frage stellen, was passiert, falls die intelligenten Beobachter einmal aussterben sollten...”
- Zurek 80er Jahre: Dekohärenztheorie, konform mit Quantenkätzchen-Experimenten 1996.
- (571) Quantenkohärenz wird durch Wechselwirkung mit Außenwelt zerstört. “Außenwelt” ist alles, was mit dem System wechselwirken kann, mehr als ein bloßes Rauschen, sondern “ein Apparat, der das System fortwährend überwacht”. Zurek: Ein “System wird dekohärent, weil Information nach außen sickert”.
- Je mehr Partikel ein System enthält, mit desto mehr Umgebungsparametern wechselwirkt es, und umso kürzer wird die Kohärenzdauer. Bei einem Pendel mit 1g Masse “schrumpfen die in der Wellenfunktion des Systems enthaltenen Interferenzterme innerhalb einer Nanosekunde um dem Faktor $2,7^{1000}$ ”, und etwaiges “Quantenverhalten verschwindet praktisch augenblicklich.” Das Modell beschreibt dynamische Aspekte des Übergangs, kann aber nicht angeben, welcher Zustand ausgewählt wird. Zurek selber glaubt, dass dies in einer Art von Mini-Evolution von der Umgebung determiniert wird. Eine “umgebungsinduzierte Super-

selektion” verwerfe alle unrealistischen Quantenzustände und lässt am Ende nur die bestehen, die “klassisch werden können”. Zurek: “Die Auswahl wird von der Umgebung getroffen; darum kann man nicht vorhersagen, welche der zulässigen Möglichkeiten realisiert werden.”

Kritik von Chris Monroe: verführerisch, aber zu sehr ad hoc. “Zurek kehrt Einiges unter den Teppich, nur lässt sich schwer sagen, unter welchen.” Zirkuläre Argumentation: “Quantensuperpositionen müssen irgendwie Resultate haben, die unseren Alltagserfahrungen entsprechen” \Rightarrow “Die makroskopischen Ereignisse gehen aus der Quantenwelt hervor, weil sie eben diejenigen sind, die wir erleben.”

In der Tat ein ziemlicher UHU! \rightarrow WT-73

GRW-Theorie

Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini, Tullio Weber: Verwandter von Penroses Quantengravitationstheorie. Wellenfunktionen laufen mit der Zeit auseinander, stoßen irgendwann “auf ein geheimnisvolles Etwas im Hintergrund” und werden dadurch lokalisiert; einem einsamen Partikel passiere das im Schnitt alle zehn Millionen Jahre. Ein Katze besteht aus 10^{27} Elementarteilchen; alle 100 Picosekunden landen die einen Treffer, und der klassische Zustand der Katze geht aus einer Folge von Mini-Kollapsen hervor.

Dekohärenz- und GRW-Theorie sagen unterschiedliche Obergrenzen voraus und sind darum experimentell unterscheidbar.

Quantisierung und die Folgen

(13p²³⁴)

“Die Quantisierung der Energie ist der Grund dafür, dass alle Wasserstoffatome gleich sind.”

(393p³⁹³)

”Die Quantendiskretheit lässt sich nicht allein aus der Wirkung von **U** herleiten. Im Gegenteil – die Schrödinger-Gleichung ist sogar noch viel *schlechter* als die Gleichungen der klassischen Physik geeignet, die unerwünschte Ausbreitung und den ‘Verlust an Genauigkeit’ zu verhindern! ... Auch kompliziertere Systeme wären manchmal Opfer eines solchen unvernünftigen Mangels an Lokalisation (man denke an Schrödingers Katze!), gäbe es nicht von Zeit zu Zeit die Einwirkung von **R**.”

Determinismus

Realer Determinismus beruht auf der Festigkeit der Materie (mechanische Rechenmaschinen) oder, noch näher am Ideal, auf den diskreten Energiezuständen elektronischer Digitalrechner. Beides geht auf Quanteneffekte zurück! Determinismus und – damit eng verwandt – exakte Algorithmen werden gerade durch die QM ermöglicht. Die klassische Mechanik wäre von ihrer mathematischen Struktur her nichtvorhersagbar; die Festigkeit der Materie ist ein ihren Gleichungen von außen aufgesetzte, meist unbewusste Randbedingung. (393 p³⁹³)

Bohm

Zitate aus (36) über Renormalisation als physikalisch unbefriedigende ad-hoc-Theorie, Motivation zur Neufassung der QM als Synthese aus QM und AR;

!!! TO DO !!!

(36p⁹⁹⁻¹⁵²)

Aufsatz “Verborgene Variable in der Quantentheorie” referieren
Exzerpte aus *R/N HN* p^{110f} einfügen

Irrungen und Wirrungen

Quantensolipsismus

(13p²⁴⁸) “Für jemanden, der meint, das Bewusstsein erschaffe die Wirklichkeit, ist angesichts der Übereinstimmung unserer Beobachtungen das schwierigste Problem, die Verwandtschaft dieser Einstellung mit einer Form von ‘Quantensolipsismus’. Wie kann es sein, dass all diese verschiedenen menschlichen ‘Bewusstheiten’, die so leidenschaftlich über alles, von Tapeten bis zu Sozialhilfe, verschiedener Meinung sind, sich – soweit wir es feststellen können – völlig über die beobachtbaren Tatsachen der Quantenwirklichkeit, die Ergebnisse der Doppelspaltex-

perimente, über das Aussehen von Sternen und den Unterschied zwischen lebenden und toten Katzen einig sind?“

<Quantengequengel> Wissenschaftstheoretischer Verriss der QM durch Lakatos (297)

Lakatos, Popper u.a. führende Wissenschaftstheoretiker schlagen sich voll auf die Seite Einsteins, Schrödingers und Ehrenfest, gegen Bohr, Heisenberg und die Kopenhagener Deutung, die man ja nach wie vor als die Vorherrschende ansehen kann:

(297p⁵⁹⁻⁶⁰)

“Die moderne Quantentheorie ist in ihrer ‘Kopenhagener Deutung’ zum Bannerträger des philosophischen Obskurantismus geworden. In der *neuen* Theorie inthronisierte Bohrs berüchtigtes ‘Komplementaritätsprinzip’ (schwache) Widersprüche als einen grundlegenden, faktisch endgültigen Zug der Natur und verschmolz einen subjektivistischen Positivismus, eine antilogische Dialektik und selbst die Philosophie der Alltagssprache zu einer unheiligen Allianz. Nach 1925 haben Bohr und seine Verbündeten [*Heisenberg, Dirac, Pauli, Jordan, Born*] eine neue beispiellose Niveausenkung kritischer Maßstäbe für wissenschaftliche Theorien herbeigeführt. Dies führte zu einer Niederlage der Vernunft in der modernen Physik und zu einer anarchistischen Kultivierung von unverständlichem Chaos. Einstein protestierte: ‘Die heisenbergsche Beruhigungsphilosophie – oder Religion? – ist so fein ausgeheckt, dass sie den Gläubigen einstweilen ein sanftes Ruhekissen liefert, von dem er nicht so leicht sich aufscheuchen lässt.’²⁰⁸) Auf der anderen Seite waren es wohl Einsteins allzu hohe Maßstäbe, die ihn ^{p60} hinderten, das Bohr-Modell und die Wellenmechanik zu entdecken (oder vielleicht nur zu veröffentlichen[??]).

Kopenhagener ‘Anarchie’

Unter den Kritikern der Kopenhagener ‘Anarchie’ müssen wir – außer Einstein – Popper, Landé, Schrödinger, Margenau, Blochinzew, Bohm, Fényes und Janossy erwähnen. Eine Verteidigung der Kopenhagener Interpretation lieferte Heisenberg (K29); eine schlagende neue Kritik findet sich bei Popper(1967[?]).

(297p⁶⁰)

Einstein und seine Verbündeten haben die Schlacht nicht gewonnen. Lehrbücher der Physik sind heutzutage voll von Behauptungen wie dieser: ‘Die beiden Gesichtspunkte, Quanten und elektromagnetische Feldstärken, sind komplementär im Sinne von Bohr. Diese Komplementarität ist eine der großen Errungenschaften der Naturphilosophie, durch die die Kopenhagener Interpretation der Epistemologie der Quantentheorie den uralten Konflikt zwischen der korpuskularen und der Wellentheorie des Lichts gelöst hat. Beginnend mit den Eigenschaften der Reflexion und geradlinigen Ausbreitung Herons von Alexandrien im ersten Jahrhundert unserer Zeitrechnung tobte dieser Streit bis zu den Interferenz- und Welleneigenschaften von Young und Maxwell im 19. Jahrhundert. Die Quantentheorie der Strahlung der letzten fünfzig Jahre hat die Dichotomie in auffallend hegelischer Weise völlig gelöst.’(K30)²⁰⁹)”

²⁰⁹) “Völlig ist hier wörtlich gemeint. Wie man in *Nature* (222, 1969, S. 1034-1035) liest: ‘Es ist undenkbar, dass ein grundlegendes Element der [Quanten]theorie falsch sein könnte... Das Argument, dass wissenschaftliche Argumente immer provisorisch sind, lässt sich nicht halten. Es sind die Gedankengänge der *Philosophen* über die moderne Physik, die provisorisch sind, denn sie haben noch nicht eingesehen, wie tief die Entdeckungen der Quantenphysik die ganze Erkenntnistheorie affizieren... Die Behauptung, dass die Alltagssprache die allerletzte Quelle der Unzweideutigkeit physikalischer Beschreibungen sei, wird durch die Beobachtungsbedingungen in der Quantenphysik auf höchst überzeugende Weise verifiziert.’”

Abschied von der Objektivität?

Zumindest Heisenberg hat Bohrs in dem Sinne verstanden, wie sie von Lakatos beschimpft wird:

(223p124)

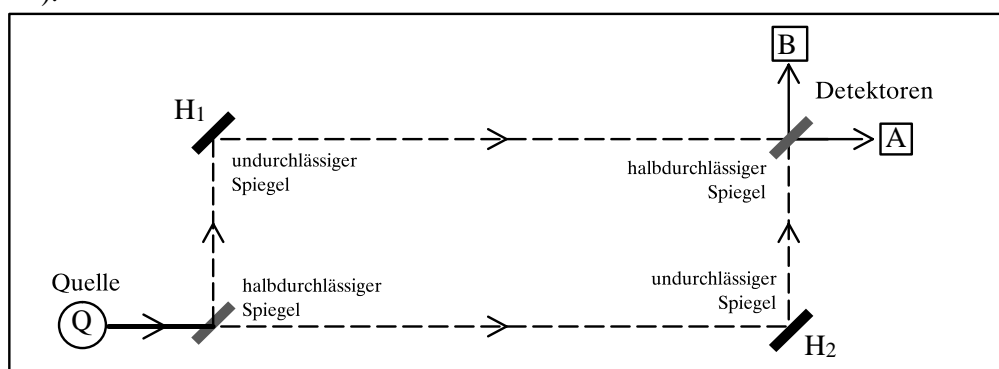
Heisenberg berichtet, Bohr empfinde es als eine Befreiung unseres Denkens, “dass wir aus der Entwicklung der Physik in den letzten Jahrzehnten gelernt haben, wie problematisch die Begriffe ‘objektiv’ und ‘subjektiv’ sind... In der QM wird die Abkehr [vom Ideal der objektiven Beschreibung] noch viel radikaler vollzogen. Was wir mit einer objektivierenden Sprache im Sinne der früheren Physik übertragen können, das sind nur noch Aussagen über das Faktische, etwa: ‘Hier ist die fotografische Platte geschwärzt’ oder ‘Hier haben sich Nebeltröpfchen gebildet.’ Über die Atome wird dabei nicht geredet; aber was sich aus dieser Vorstellung für die Zukunft schließen lässt, hängt ab von der experimentellen Fragestellung, über die der Beobachter frei entscheidet[?]. Es ist natürlich auch hier gleichgültig, ob der Beobachter ein Mensch, ein Tier oder ein Apparat ist [frei entscheidende Apparate], aber die Prognose über das zukünftige Geschehen kann nicht ohne Bezugnahme auf den Beobachter oder das Beobachtungsmittel ausgesprochen werden. Insofern enthält in der heutigen Naturwissenschaften jeder physikalische Sachverhalt objektive und subjektive Züge.”

Ich bin gar nicht sicher, ob hier Bohrs Ansicht richtig wiedergegeben ist; Heisenbergs Ansicht ist es sicher. Ich halte dies für undurchdachte, äußerst fragwürdige und voreilige Schlussfolgerungen.

Objektive Realität der quantenmechanischen Zustandsfunktion

 ψ -Funktion

Wieweit ist der Zustandsvektor “real”? Penrose (393^{274f}), vgl. auch Davies (95 p21):



Die Abstände in der gezeigten Apparatur können so eingestellt werden, dass ein von Quelle Q ausgesandtes, einzelnes Photon mit 100% Wahrscheinlichkeit in Detektor A gemessen wird und mit 0% in B. Der Zustandsfunktion “mit 2 Orten” – nämlich je einem auf beiden Wegen – kommt also eine gewisse Realität zu; denn der Effekt kommt durch die Interferenz beider Wege zu Stande.

Insbesondere findet an den halbdurchlässigen Spiegeln H₁ und H₂ keine Reduktion des Wellenpakets statt – obwohl die Kristallstrukturen der Spiegel als makroskopische Strukturen anzusprechen wären. *Ad hoc* könnte man argumentieren, der Spiegel werde ja nicht makroskopisch verändert durch die Reflexion; d.h. er wirkt eben doch nur mikroskopisch; die Wechselwirkung zwischen Photon und Metallgitter ändert nur einen Mikrozustand. Kein irreversibler Prozess, würde Prigogine sagen.

Quantenmechanik und Willensfreiheit

(223p128)

Bohr zu Heisenberg über die Implikationen der QM für das Problem der Willensfreiheit: “Ich bin überzeugt, dass es sich einfach um ein Missverständnis handelt. Man darf die verschiedenen Fragestellungen nicht durcheinanderbringen, die, wie

ich glaube, zu verschiedenen zueinander komplementären Betrachtungsweisen gehören. Wenn wir vom freien Willen reden, so sprechen wir von der Situation, in der wir Entscheidungen zu treffen haben. Diese Situation steht in einem ausschließenden Verhältnis zu der anderen, in der wir die Motive für unser Handeln analysieren oder auch zu der, in der wir die physiologischen Vorgänge, etwa die elektrochemischen Prozesse im Gehirn studieren. Hier handelt es sich also um typisch komplementäre Situationen, und daher hat die Frage, ob die Naturgesetze das Geschehen vollständig oder nur statistisch determinieren, nicht unmittelbar mit der Frage des freien Willens zu tun. Natürlich müssen die verschiedenen Betrachtungsweisen schließlich zusammenpassen, d.h. sie müssen ohne Widersprüche als zu dergleichen Wirklichkeit gehörig erkannt werden; aber wie das im Einzelnen geschieht, wissen wir einstweilen noch nicht.”

So ganz wohl ist einem bei dieser Auffassung von Komplementarität nicht. Da steht immer der Verdacht der Problemumgehung im Raume.

Niels Bohr und das Hufeisen

(223p¹²⁹⁻³⁰)

“Niels schloss das Gespräch ab mit einer jener Geschichten, die er bei solchen Gelegenheiten gerne erzählte. ‘In der Nähe unseres Ferienhauses wohnt ein p¹³⁰ Mann, der hatte über der Eingangstür seines Hauses ein Hufeisen angebracht, das nach einem alten Volksglauben Glück bringen soll. Als ein Bekannter ihn fragte: Aber bist du denn so abergläubisch? Glaubst du wirklich, dass das Hufeisen dir Glück bringt, antworte er: natürlich nicht; aber man sagt doch, dass es auch dann hilft, wenn man nicht daran glaubt.’”

Anmerkung: Diese Geschichte habe ich schon mehrfach gehört und gelesen, und meist wurde die von Bohr nur referierte Haltung Bohr selber zugeschrieben, und gelegentlich in bierernst-hämischer Absicht.

(223p¹⁴³)

Bohr: “Das Gegenteil von einer richtigen Behauptung ist eine falsche Behauptung. Aber das Gegenteil von einer tiefen Wahrheit kann wieder eine tiefe Wahrheit sein.”

‘Die Beobachtung stört das Phänomen’

(223p¹⁴⁶)

Diese Formulierung findet Bohr “ungenau und irreführend. In Wirklichkeit haben wir doch bei den atomaren Erscheinungen von der Natur die Belehrung empfangen, dass man das Wort ‘Phänomen’ gar nicht verwenden kann, ohne gleichzeitig genau zu sagen, an welche Versuchsanordnung oder welche Beobachtungsmittel dabei gedacht werden soll. Wenn eine bestimmte Versuchsanordnung beschrieben ist, und wenn dann ein bestimmtes Beobachtungsergebnis vorliegt, so kann man schon von ‘Phänomen’ reden, aber nicht von einer Störung des Phänomens durch die Beobachtung. Es ist wahr, dass man die Ergebnisse verschiedener Beobachtungen nicht mehr so einfach aufeinander beziehen kann, wie das in der früheren Physik möglich p¹⁴⁷ war; aber man sollte das nicht als ‘Störung des Phänomens durch die Beobachtung’ auffassen, sondern sollte eher von der Unmöglichkeit sprechen, das Ergebnis der Beobachtung so zu objektivieren, wie das in der klassischen Physik oder in der täglichen Erfahrung geschieht. Verschiedene Beobachtungssituationen, und damit meine ich die Gesamtheit von Versuchsanordnung, Ablesung der Instrumente usw., sind eben häufig komplementär zueinander, d.h. sie schließen einander aus, können nicht gleichzeitig verwirklicht werden, und die Ergebnisse der einen können nicht eindeutig mit denen der anderen verglichen werden.”

Thermodynamische Unschärfe

(223p¹⁴⁷)

Darum sei der Unterscheid zwischen thermodynamischer und quantenmechanischer Statistik gar nicht so groß: “Wenn ein System aus vielen Teilchen besteht, der

Umgebung oder mit anderen großen Systemen in ständigem Energieaustausch steht, so schwankt zwar die Energie des einzelnen Teilchens ständig, auch die des gesamten Systems; aber die Mittelwerte über viele Teilchen und längere Zeiten entsprechen sehr genau den Mittelwerten über dieser Normalverteilung... Und eine Temperatur kann man eben nur durch Energieaustausch definieren. Eine genaue Kenntnis der Temperatur ist also nicht vereinbar mit einer genauen Kenntnis der Orte und Geschwindigkeiten der Moleküle.”

(223p148-149)

Es gebe auch eine Art Unbestimmtheitsrelation zwischen Temperatur und Energie im Tee. Die Temperatur eines einzelnen Moleküls sei genauso hoch wie die des Tees p149 wegen des Wärmeaustauschs mit den anderen Teemolekülen. Da seine Energie wegen des Wärmeaustauschs schwankt, kann man nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Energie angeben. Misst man nun umgekehrt die Molekülenergie und nicht die Teetemperatur, so folgt daraus wiederum nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Temperatur. “Die relative Breite dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung, also die Ungenauigkeit der Werte für Temperatur oder Energie, ist bei einem so kleinen Objekt ... verhältnismäßig groß, daher fällt sie hier auf.” Bei größeren Objekten, etwa einer kleinen Teemenge innerhalb des gesamten Tees, sei sie sehr viel geringer und könne vernachlässigt werden. Große Objekte haben sozusagen gleichzeitig Temperatur und Energie.”

EPR-Paradoxon, Quantenverbundenheit

(393 p391)

Quantenkohärenz ist nach Penrose solange gewährleistet, als die bei einem Quantenprozess beteiligten Teilchen das 1-Graviton-Kriterium nicht erfüllen, also solange U anhält. Solange bleibt auch die quantenmechanische Verbundenheit erhalten.

Schärfe

Unschärferelation ist eher eine Schärfereleation! Klassische Newtonsche Theorie lässt lokal und global beliebige Unschärfe zu, wo die Heisenbergsche Schärfereleation dieselbe begrenzt! Siehe *Gelbes Buch* p168f

(393p177)

“Angesichts der Ausbreitung [aller klassisch-dynamischen Systeme] im Phasenraum ist man versucht zu fragen, wie es überhaupt möglich ist, in der klassischen Mechanik Vorhersagen zu treffen? Das ist in der Tat eine gute Frage. Die Ausbreitung besagt: Selbst wenn wir den Anfangszustand eines Systems noch so genau (innerhalb vernünftiger Grenzen) kennen, werden die Unschärfen mit der Zeit tendenziell zunehmen, und unsere anfängliche Information wird vielleicht letztlich fast nutzlos. In diesem Sinne ist die klassische Mechanik im wesentlichen *unvorhersehbar*.”

NB Im nichtlinearen Fall und wenn der so genannte Ljapunov-Koeffizient $\lambda > 1$ ist, ist Anfangsinformation nicht nur “letzlich fast”, sondern “sehr bald völlig” nutzlos und das Verhalten nicht mehr vorherberechenbar: *Turbulenz, Chaos*.

Bei der Himmelsmechanik ist die Newtonsche Theorie anwendbar, weil “man es bei Sonne, Planeten und Monden mit einer vergleichsweise kleinen Anzahl kompakter Körper von höchst unterschiedlicher Masse zu tun hat; darum kann man in erster Näherung die Störung durch die masseärmeren Körper ignorieren und die größeren Massen als nur wenige einander beeinflussende Körper behandeln.“ Außerdem könne man die Detailbewegungen der Körper vernachlässigen und diese als Massenpunkte idealisieren.

(393p178)

“Wie vermag ein fester Körper, der aus einer Unzahl punktförmiger Teilchen zusammengesetzt ist, seine Form zu behalten, wenn die Ordnung seines Aufbaus wegen der Ausbreitung im Phasenraum kontinuierlich abnimmt? Wie wir heute wissen, lässt sich die Struktur von Festkörpern nur mit Hilfe der Quantentheorie wirklich verstehen. Irgendwie vermögen Quanteneffekte die Ausbreitung im Phasenraum zu verhindern.”

- (13p237) Zwei Photonen werden simultan erzeugt. Zwischen ihnen herrscht Quantenverbundenheit. “Die Wahrscheinlichkeiten für beide Richtungen [des Drehimpulses] sind gleich groß. Aber selbst wenn wir sie bis bis an entgegengesetzte Enden des Weltalls fliegen lassen, sollten wir sofort, wenn wir den Drehimpuls eines der Teilchen messen, ohne den geringsten Zweifel wissen, dass der Drehimpuls des anderen dem des eben gemessenen entgegengesetzt gleich ist. Das wissen wir, *ohne* es gemessen zu haben. Also, behaupten Einstein, Podolsky und Rosen, muss der nichtgemessene Drehimpuls des anderen Photons ihrer Definition der physikalischen Wirklichkeit entsprechend als real angesehen werden, weil er vorhersagbar ist. Er muss deshalb mit einem Element einer vom Beobachter unabhängigen Wirklichkeit in Beziehung stehen.”

Quantenkohärenz im Mesokosmos

- (K42p98f) Supraleitung: spin-up/spin-down-Wechselwirkung orchestriert die Wellenfunktion. Nicht reduktionistisch erklärbar, kein ‘vorhersehbarer’ Effekt.
- Suprafluider Zustand.
- (K42p101) Plasmaschwingungen.
- (K42p103) DNS: “Versuchte man die Art, wie sich ein DNA-Strang entwindet, durch lokale Quantenereignisse und Wechselwirkungen zu erklären, würde der gesamte Prozess viel zu lange dauern und Leben in der uns bekannten Form wäre nicht möglich.”
- (K42p112,114) Quasikristalle und Penrose-Parkettierungen mit 5-zähliger Symmetrie: richtige Anlagerung ist nicht lokal entscheidbar; man muss etwas über das übergeordnete Muster wissen, um die Elemente lückenlos zu platzieren. p114 “Im Jahre 1984 hat der israelische Physiker Danny Sheshtman entdeckt, dass sich aus einer Aluminium-Mangan-Legierung ein Quasikristall züchten lässt, der die ‘unnatürliche’ 5-zählige Symmetrie aufweist. Seither ist die Existenz von Quasikristallen wiederholt bestätigt worden.
- Diese Strukturen scheinen die herrschende Auffassung zu widerlegen, dass Kristalle aufgrund eines rein lokalen Prozesses wachsen, in dem sich beispielsweise jedes sich anlagernde Atom an seinen Nachbarn ausrichtet. Eine echter Quasikristall kann nur wachsen, wenn er dem Plan des Gesamtmusters folgt, an dass er sich halten muss.”

Quantenkorrelationen und die bellsche Ungleichung (2)

- Neuerer Review über den Stand der Forschung über Quantenkohärenz; Quantenverbundenheit; makroskopischer Quanteneffekt, nichtlokale Korrelationen quantenmechanischer Teilchen.
- Originalarbeiten über neuere Experimente:
- Genf: W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden und N. Gisin, Phys. Rev. Lett. 81, 3563 (1998)
- Innsbruck: G. Weihs, T. Jennewein, Ch. Simon, H. Weinfurter und A. Zeilinger Phys. Rev. Lett. 81, 5039 (1998)

EPR

“Das EPR-Experiment brachte die bizarr anmutenden Vorhersagen der Quantentheorie auf den Punkt: Entweder, so die Schlussfolgerung, die Quantenmechanik ist nichtlokal, oder sie ist unvollständig. Nichtlokal heißt hier, dass die Messung an einem Teilchen die Messung an einem anderen Teilchen unmittelbar beeinflussen kann, auch wenn beide weit voneinander entfernt sind. Mit der Nichtlokalität verschränkter Systeme konnten sich Einstein, Podolsky und Rosen nicht anfreunden, daher schlossen sie auf die Unvollständigkeit der Quantenmechanik.” (129)

Verschränkte Quantenzustände

“Die **Gesamtit# über ein Quantenst** wird durch einen Zustandsvektor $|\psi\rangle$ im Hilbertraum [*Quantenzustand, Zustandsfunktion*] beschrieben... Insbesondere können charakteristische Eigenschaften des Quantenzustandes eines Gesamtsystems zwischen zwei oder mehreren Subsystemen *verschränkt* sein, wobei keines der einzelnen Subsysteme jeweils für sich alleine diese Charakteristika aufweist. Folglich reichen lokale Messungen an den Subsystemen nicht aus, um den quantenmechanischen Gesamtzustand zu rekonstruieren. Das Ergebnis einer Messung an einem Subsystem hängt entscheidend davon ab, welche Größe an den anderen Subsystemen beobachtet wird. Erst mit diesen nichtlokalen Korrelationen ergibt sich eine quantenmechanisch vollständige Beschreibung des Gesamtsystems: ‘Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.’”

WS *Man könnte auch sagen, dass es sich von Vornherein nur um ein einziges System handelt, von dem räumlich getrennte Teilaspekte misst.*

verschränkt

nicht faktorisiert (Zustand nicht als Produkt zweier anderer Zustände darstellbar)

Nach Stand der Forschungen (zuletzt Genf und Innsbruck) kein seltsamer Zug der theoretischen Beschreibung (kein mathematisches Artefakt), sondern mit ziemlicher Sicherheit ein real existierendes Phänomen, dessen Implikationen nicht nur auf den Mikrokosmos beschränkt bleiben.

Korrelationen in “verschränkten Quantenzuständen” treten über “makroskopische Distanzen (> 10 km)” auf. “Das Potenzial möglicher Anwendungen reicht von der Quantenkryptografie über Quantenteleportation bis hin zum Quantencomputer” möglicherweise “eine der Zukunftstechnologien des neuen Jahrhunderts.”

Bellsche Ungleichungen

1964

aufgestellt von **John Bell** als mathematische Konsequenz verschränkter Zustände. Diese Ungleichungen gestatten eine experimentelle Abgrenzung zwischen der quantenmechanischen Theorie von lokalen und kausalen Theorien (LRT=lokale realistische Theorien). Die Vorhersagen der bellschen Ungleichungen sind statistischer Natur und erfordern eine Präzision, die erst ab den 80er Jahren zur Verfügung stand. Experimente von Aspect u.a. ergeben Korrelationen, die mit einer LRT nicht verträglich sind.

“Im Genfer Experiment wurden quantenmechanische Korrelationen, die die bellschen Ungleichungen verletzen, sogar über makroskopische Distanzen von rund 11 km nachgewiesen. Das dabei verwendete Photonenpaar wurde in Genf erzeugt, über Glasfaserkabel in die Orte Bellevue und Bernex gesandt und in diesen Orten detektiert. Die Verletzung der [LRT-]Ungleichung betrug 16 Standardabweichungen.”

Verbliebene Schlupflöcher(loopholes) lokaler Argumentation

Nach den klassischen Experimenten von Aspect bleiben zwei Schlupflöcher für verborgene-Parameter-Theorien (kausale Theorien, lokale realistische Theorien, LRT):

- (1) *locality* oder *communication loophole*: Teilchen oder Messvorrichtungen für Teilchen könnten klassisch miteinander kommunizieren;
Bereits Innsbruck 1998 geschlossen:
 - Messvorrichtungen 400 Meter räumlich getrennt, d.h. Lichtlaufzeiten 1.3 Mikrosekunde, länger als ein Einzelexperiment.
 - Einsatz nicht deterministischer, unabhängiger Zufallsgeneratoren (im Unterschied zu Aspect)

- ⇒ lokal vermittelte kausale Korrelationen (“Kommunikation”) garantiert ausgeschlossen
- (2) *locality loophole*: wegen mangelnder Ausbeute der Photonendetektoren “muss angenommen werden, dass die registrierten Daten ein repräsentatives statistisches Ensemble darstellen (*fair sampling assumption*).”
- Bei bisherigen Experimenten Detektor-Effizienzen um 5%. “Dadurch war die Anzahl der registrierten Ereignisse immer wesentlich kleiner als die Anzahl der tatsächlich präparierten Photonenpaare.”
- Eine Theorie mit verborgenen Parametern könnte die im Experiment auftretende Auswahl-Wahrscheinlichkeit als abhängig von diesen verborgenen Parametern ansehen. Zur signifikanten Abwehr dieser Argumentation seien “Detektor-Effizienzen” unter 75% “aussichtslos”.
- Theoretische Erwägungen zeigen, dass spätestens ab 82,8% Effizienz die Lücke sicher geschlossen werden kann. Ob es auch dazwischen gehe, sei noch strittig.
- “Zur Zeit versuchen verschiedene Gruppen, das Nachweisverfahren [entsprechend] zu verbessern, um diese Argumentationslücke endgültig zu schließen.”

Verschrankungen mit drei Photonen

Von Greenberger, Horne und Zeilinger beschriebener Zustände dreier verschrankter Photonen: GHZ-Zustände. Präparation eines GHZ-Zustands im Labor erfordert “große Kunstfertigkeit”; dafür erübrigen sich die statistischen Messreihen wie bei 2-Photonen-Verschrankungen, sondern es genügt im Prinzip ein Experiment.

Quantenkätzchen und -mäuse: zum Stand des quantenmechanisches Messproblems

(571)

Experimente zur Untersuchung der Reduktion der Wellenfunktion.

In Bohrs Antwort auf Schrödingers Katze (Messproblem) zog letzterer sich darauf zurück, “dass Messungen stets mit einem klassischen Apparat ausgeführt werden müssen” und postulierte, “makroskopische Detektoren würden niemals in einen Zustand verschwommener Superpositionen geraten – ohne freilich genau zu erklären, warum. ‘Er legte recht willkürlich fest, was klassisch ist’, meint Wojciech Zurek vom Los-Alamos-Nationallaboratorium in New Mexico, ‘Messungen ereigneten sich einfach.’”

Wo ist die Grenze zwischen ‘mikrokosmisch’, ergo quantentheoretisch zu behandeln, ergo superponierende Zustände, und makrokosmisch, ergo klassisch zu behandeln, ergo kollabierter Zustand? Zwischen dem zerfallenden Isotop und der Katze?

“Bohr erkannte auch, dass die Grenze zwischen klassischer und quantenphysikalischer Domäne sich je nach experimenteller Anordnung verschieben kann. Dabei ist nicht unbedingt die Größe entscheidend: Eine Superposition kann weit oberhalb atomarer Dimensionen bestehenbleiben.”

“Manche Physiker bezweifeln allerdings, dass man es dabei mit ausgewachsenen Schrödingerkatzen zu tun bekommt – oft spricht man verniedlichend von Quantenkätzchen. Jedenfalls hört der Übergang vom quantenphysikalischen zum klassischen Bereich – in der Fachsprache Kollaps der Wellenfunktion oder Reduktion des Wellenpakets genannt – allmählich auf, Gegenstand reiner Gedankenexperimente zu sein.”

Rydberg-Atome mit Hüllenelektron-Kätzchen

Carlos Stroud und Jon Yeazell 1991: Kaliumatome mit extrem kurzen Laserpulsen beschossen, versetzt das äußerste Hüllenelektron in einen Riesen-Abstand von 0,5 μm vom Kern (sonst: $< 1 \text{ nm}$): ein derart kurzzeitig aufgeblähtes Atom nennt man Rydberg-Atom. Das Elektron wird dabei “in mehrere hochangeregte Zustände gleichzeitig” versetzt. “Die so erzeugte Superposition der Energienei-

veaus entspricht einem Wellenpaket, das den Kern ... umkreist; das recht kompakte Paket gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des hoch angeregten Elektrons an, das in diesem Spezialfall tatsächlich einen – allerdings verschmierenden und zerlaufenden – Planeten auf seiner Bahn um die Sonne gleicht.“ Nach einigen Umläufen bildem sich “zwei kleinere, einander auf der Umlaufbahn gegenüberliegende Pakete. Stroud und sein Mitarbeiter Michael W. Noel wiesen nun im September 1996 nach, dass die beiden Pakete eine winzige Schrödinger-Katze darstellen – ein einziges Elektron an zwei Orten.”

Beryllium-Kätzchen

Chris Monroe und David J. Wineland Mai 1996: Beryllium-Ionen durch Laserbeschuss erst extrem abgekühlt und dann durch zwei weitere Laserpulse Präparation einer Superposition (Spin-Up + Spin-Down). “Durch leichtes Variieren der Laser-Abstimmung” werde die Komponenten zu räumlichen Schwingung im Gegenteil angeregt. “Eine Momentaufnahme dieser quantenmechanischen Doppelschaukel würde in und dasselbe Ion an zwei physikalischen Orten zugleich zeigen: mit Aufwärts-Spin an der einen Stelle und mit Abwärts-Spin an der anderen. Die beiden Spinzustände entfernten sich im Laufe der Gegenschwingung immerhin bis auf 80 Nanometer voneinander – in atomaren Maßstäben ein gehöriges Stück.”

Monroe:

‘Wir brachten ein einzelnes Ion dazu, sich an zwei Orten aufzuhalten, die gegenüber seiner ursprünglichen Größe sehr weit voneinander entfernt waren.’

Zusammenbruch unter der Zeitlupe

Michel Brune, Serge Haroche, Jean-Michel Raimond 12.1996: die Forschergruppe “ließ gleichsam eine Quantenmaus vor ihrer Schrödinger-Katze baumeln”. “Als Katze diene ein eingesperrtes elektromagnetisches Feld – einige Mikrowellen-Photonen in einem Hohlraumresonator”. Dann wurde ein in zwei Energiezustände angeregtes Rydbergatom in den Resonator verbracht, das das elektromagnetische Feld “in eine Superposition zweier Schwingungszustände unterschiedlicher Phase” versetzte.

Diese doppelte Schwingungsmode hat nun nur geringe Lebensdauer und bricht zu der einen oder der anderen zusammen – typische “Reduktion” eines “Wellenpakets”.

Die Forscher schickten in Zeitabständen von 30 bis 250 μsec ein zweites Rydberg-Atom zur Sondierung des augenblicklichen Feldzustandes hinterher (die Quantenmaus zum Test, wie sehr die Katze noch zuckt) und konnten so den zeitlichen Verlaufs des Zusammenbruchs verfolgen. Außerdem ließ sich anhand der Photonenanzahl die Größe der Katze einstellen und untersuchen, wie sich dies auf den Vorgang auswirkte.

Haroche:

‘Zum ersten Mal können wir die Entwicklung von quantenphysikalischem zu klassischem Verhalten detailliert beobachten.’

Zurek:

‘Eine Schrödinger-Katze zu sehen ist schon verblüffend genug; aber erstmals beobachten zu können, wie sie gezwungen wird, zwischen lebendig und tot zu wählen, und wie das seltsame Quantenverhalten verschwindet – das ist der eigentliche Coup.’

Vor allem erfreute Zurek, dass die Resultate sich anscheinend gut mit den “einfachen Gleichungen” seiner Dekohärenztheorie deckten.

Zurek:

Das “System wird dekohärent, weil Information nach außen sickert”; aus dem Hohlraum entkommene Elektronen sagten dem Rest des Universums Bescheid. “Schrödingers Katze bekommt gewissermaßen Junge, die aus der Kiste kriechen.”

Maximale Quantenkätzchen

Durch Bestimmung der Obergrenze für superponierbare Systeme – dem maximalen Quantenkätzchen – lassen sich Entscheidungen zwischen konkurrierenden

Kollaps-Theorien treffen (Dekohärenz- und GRW-Theorie). In den spektakulärsten Experimenten wurden Quantenkätzchen aus 5000 Partikeln nachgewiesen – “weit entfernt von der für die Makrowelt typischen Zahl 10^{23} ”.