

23 Wider die „Messung“

Sicher sollten wir nach 62 Jahren eine exakte Formulierung eines erheblichen Teils der Quantenmechanik haben? Mit „exakt“ meine ich natürlich nicht „exakt wahr“. Ich meine nur, dass die Theorie vollständig in mathematischen Begriffen formuliert sein sollte, und nichts im Ermessen der theoretischen Physiker bleibt ... bis praktikable Näherungen für Anwendungen benötigt werden. Mit „erheblich“ meine ich, dass ein ziemlich substantieller Bruchteil der Physik abgedeckt werden sollte. Die nichtrelativistische „Teilchen“-Quantenmechanik, vielleicht mit Einschluss des elektromagnetischen Feldes und einer cut-off-Wechselwirkung, ist ernsthaft genug. Denn sie deckt „einen großen Teil der Physik und die ganze Chemie“ ab [1]. Mit ernsthaft meine ich auch, dass der „Apparat“ nicht vom Rest der Welt in Blackboxen abgetrennt werden sollte, als ob er nicht auch aus Atomen bestünde und nicht durch die Quantenmechanik beherrscht würde. Die Frage, „... sollten wir nicht eine exakte Formulierung haben?..“ wird oft beantwortet mit einer von zwei anderen (oder allen beiden). Ich werde versuchen, auf diese zu antworten: *Wozu die Mühe? Warum nicht in einem guten Buch nachschlagen?*

Wozu die Mühe?

Der wohl namhafteste Vertreter von „wozu die Mühe?“ war Dirac [2]. Er teilte die Probleme der Quantenmechanik in zwei Klassen, diejenigen der ersten Klasse und diejenigen der zweiten. Die Probleme der zweiten Klasse waren im wesentlichen die Unendlichkeiten der relativistischen Quantenfeldtheorie. Sie störten Dirac sehr, und er war nicht überzeugt von den „Renormierungs“-Prozeduren, mit denen sie umgangen werden. Dirac gab sich größte Mühe, um diese Probleme der zweiten Klasse auszuräumen und motivierte andere, das Gleiche zu tun. Die Probleme der ersten Klasse betrafen die Rolle des „Beobachters“, die „Messung“, und so weiter. Dirac dachte, dass diese Probleme nicht reif für eine Lösung seien, und für später aufgehoben werden sollten. Er erwartete Entwicklungen in der Theorie, die diese Probleme in völlig neuem Licht erscheinen lassen würden. Es wäre Verschwendung von Mühe, sich darüber übermäßig den Kopf zu zerbrechen; insbesondere, da wir in der Praxis sehr gut zurechtkommen, ohne sie zu lösen.

Dirac gibt denjenigen, die diese Fragen stören, wenigstens soviel Trost: Er sieht, dass sie existieren und schwierig sind. Viele andere namhafte Physiker tun das nicht. Es scheint mir, unter den am meisten selbstsicheren Quantenphysikern, denjenigen, die

es *in ihren Knochen haben*, findet man die stärkste Ablehnung der Meinung, dass die „Grundlagen der Quantenmechanik“ etwas Aufmerksamkeit benötigen könnten. Instinktiv wissend, was richtig ist, können sie bei kleinlichen Unterscheidungen zwischen Theoremen und Annahmen etwas unduldsam werden. Wenn sie auch eine Unklarheit in den üblichen Formulierungen zugeben, werden sie wahrscheinlich darauf beharren, dass die gewöhnliche Quantenmechanik doch „für alle praktischen Zwecke“ völlig ausreichend ist. Ich stimme ihnen darin zu: GEWÖHNLICHE QUANTENMECHANIK IST (soweit ich weiß) FÜR ALLE PRAKTISCHEN ZWECKE VÖLLIG AUSREICHEND.

Auch wenn ich selbst beginne, darauf zu beharren; und das in großen Buchstaben, wird im Verlauf der Diskussion wahrscheinlich wiederholt darauf zu beharren sein. Darum ist es zweckmäßig, eine Abkürzung für die letzte Phrase zu haben: FÜR ALLE PRAKTISCHEN ZWECKE (FOR ALL PRACTICAL PURPOSES) = **FAPP**.

Ich kann mir einen praktisch veranlagten Geometer vorstellen, vielleicht einen Architekten, der sich nicht mit Euklids fünftem Postulat (oder Playfairs Axiom) anfreunden kann: In einer Ebene kann man *selbstverständlich* nur eine Gerade durch einen gegebenen Punkt ziehen, die parallel zu einer gegebenen Gerade ist. Der Gedankengang eines solchen geborenen Geometers mag nicht auf pedantische Präzision gerichtet sein; und neue Behauptungen, in den Knochen als wahr bekannt, können in jeder Phase hinzukommen, auch wenn sie weder unter den ursprünglichen Annahmen waren, noch aus ihnen als Theoreme abgeleitet wurden. Vielleicht sollten diese speziellen Argumentationen in einer systematischen Präsentation, durch diese Marke – FAPP – gekennzeichnet werden, und die Schlussfolgerungen ebenso: QED FAPP.

Ich erwarte, dass Mathematiker solche unscharfe Logiken klassifiziert haben. Jedenfalls haben Physiker sie oft benutzt.

Aber gibt es da nicht etwas zu sagen für den Ansatz von Euklid? Auch jetzt, wenn wir wissen, dass die Euklidische Geometrie (in gewissem Sinne) nicht absolut wahr ist? Ist es nicht gut zu wissen, was woraus folgt, auch wenn es nicht wirklich notwendig FAPP ist? Zum Beispiel angenommen, man findet heraus, dass sich die Quantenmechanik der präzisen Formulierung *widersetzt*. Angenommen, dass, wenn eine Formulierung hinter FAPP versucht wird, wir einen unbeweglichen Finger finden, der stur auf etwas außerhalb des Themas zeigt: Zum Geist des Beobachters, zu den heiligen Schriften der Hindu, zu Gott, oder auch nur zur Gravitation? Wäre das nicht sehr, sehr interessant?

Ich muss jedoch gleich anmerken, dass es nicht die mathematische, sondern die physikalische Präzision ist, mit der ich mich hier beschäftige. Ich bin nicht penibel, was Deltafunktionen angeht. Aus dieser Sicht ist der Ansatz in von Neumanns Buch nicht dem von Dirac vorzuziehen.

Warum nicht in einem guten Buch nachschlagen?

Aber *welches* gute Buch? In der Tat ist es selten, dass eine „kein Problem“-Person bereit ist, bei genauer Überlegung eine schon in der Literatur vorhandene Abhandlung zu befürworten. Normalerweise ist die gute, unproblematische Formulierung noch im Kopf der fraglichen Person; die mit praktischen Problemen zu beschäftigt ist, um sie zu Papier zu bringen. Ich denke, dass dieser Vorbehalt, was die Formulierungen in den guten Büchern angeht, gute Gründe hat. Denn die guten Bücher, die mir bekannt sind, kümmern sich nicht besonders um physikalische Präzision. Das wird schon durch ihr Vokabular deutlich.

Hier sind einige der Worte, die zwar legitim und notwendig für Anwendungen sind, aber in einer *Formulierung* mit einem Anspruch auf physikalische Präzision keinen Platz haben: *System, Apparat, Umgebung, mikroskopisch, makroskopisch, reversibel, irreversibel, Observable, Information, Messung*.

Die Konzepte „System“, „Apparat“, „Umgebung“ implizieren unmittelbar eine künstliche Teilung der Welt, und eine Absicht, die Wechselwirkung durch die Grenze zu leugnen, oder nur eine schematische Darstellung davon zu geben. Die Begriffe „mikroskopisch“ und „makroskopisch“ widersetzen sich einer präzisen Definition. Das gilt auch für die Begriffe „reversibel“ und „irreversibel“. Einstein sagte, dass die Theorie entscheidet, was eine „Observable“ ist. Ich denke, er hat recht – „Beobachtung“ ist eine komplizierte und theoriebeladene Angelegenheit. Dann sollte dieser Begriff nicht in der *Formulierung* der fundamentalen Theorie auftauchen. *Information? Wessen Information? Information worüber?*

Auf dieser Liste der schlechten Worte aus guten Büchern, ist „Messung“ das schlimmste von allen. Es muss einen eigenen Abschnitt bekommen.

Wider die „Messung“

Wenn ich sage, das Wort „Messung“ ist noch schlimmer als die anderen, habe ich nicht die Verwendung dieses Wortes in Sätzen wie „Messung der Masse und Breite des Z-Bosons“ im Sinn. Ich habe seine Verwendung in den grundlegenden, interpretativen Regeln der Quantenmechanik im Sinn. Hier sind sie, wie zum Beispiel von Dirac angegeben:

... jedes Ergebnis einer Messung einer reellen dynamischen Variablen ist einer ihrer Eigenwerte. . .

... wenn die Messung der Observablen. . . vielfach ausgeführt wird, dann wird der Mittelwert aller Ergebnisse sein. . .

... eine Messung veranlasst das System immer, in einen Eigenzustand der dynamischen Variablen, die gemessen wird, zu springen. . .

Es könnte den Anschein haben, dass sich die Theorie ausschließlich mit „Ergebnissen von Messungen“ beschäftigt, und nichts über irgendetwas anderes zu sagen hat. Was genau qualifiziert irgendwelche physikalischen Systeme, die Rolle des „Messenden“ zu spielen? Hat die Wellenfunktion der Welt Tausende von Millionen von Jahren darauf gewartet, zu springen, bis ein einzelliges Lebewesen erschien? Oder musste sie etwas länger warten, auf ein besser qualifiziertes System. . . mit einem Dokortitel? Wenn die Theorie auf etwas anderes, als hochidealisierte Laboroperationen angewandt werden soll, sind wir dann nicht gezwungen, zuzugeben, dass mehr oder weniger „messungsähnliche“ Prozesse mehr oder weniger jederzeit, mehr oder weniger überall stattfinden? Haben wir das Springen dann nicht ständig?

Der erste Anklagepunkt gegen die „Messung“ in den grundlegenden Axiomen der Quantenmechanik ist, dass sie eine fragwürdige Spaltung der Welt in „System“ und „Apparat“ verankert. Ein zweiter Anklagepunkt ist, dass das Wort mit Bedeutungen aus dem täglichen Leben beladen ist; Bedeutungen, die im Quantenkontext völlig ungeeignet sind. Wenn gesagt wird, dass etwas „gemessen“ wird, ist es schwer, sich das Ergebnis nicht als bezüglich auf eine zuvor vorhandene Eigenschaft des fraglichen Objektes vorzustellen. Das ignoriert Bohrs Bestehen darauf, dass an Quantenphänomenen sowohl der Apparat als auch das System maßgeblich beteiligt sind. Wenn das nicht so wäre, wie könnten wir sonst verstehen, dass zum Beispiel die Messung einer Komponente des „Drehimpulses“ – in einer willkürlich gewählten Richtung – eine diskrete Menge von Werten ergibt? Wenn man die Rolle des Apparats vergisst, was das Wort „Messung“ allzu wahrscheinlich bewirkt, gibt man alle Hoffnung auf gewöhnliche Logik auf – folglich „Quantenlogik“. Wenn man die Rolle des Apparats bedenkt, ist die gewöhnliche Logik völlig ausreichend.

In anderen Zusammenhängen konnten Physiker Worte aus der Alltagssprache nehmen und als technische Begriffe nutzen, ohne großen Schaden anzurichten. Nehmen wir zum Beispiel „Strangeness“, „Charm“ und „Beauty“ in der Elementarteilchenphysik. Niemand wird mit dieser „Babysprache“, wie Bruno Touschek sie nannte, getäuscht. Ich wollte, es wäre ebenso mit der „Messung“. Aber tatsächlich hat das Wort einen solch schädlichen Effekt auf die Diskussion gehabt, dass ich denke, es sollte jetzt gänzlich aus der Quantenmechanik verbannt werden.

Die Rolle des Experiments

Ich denke, sogar in einer anspruchslosen, praktischen Darstellung, wäre es gut, das Wort „Messung“ durch „Experiment“ in der Formulierung zu ersetzen. Denn das letztere Wort ist alles in allem weniger irreführend. Jedoch auch die Vorstellung, dass sich die Quantenmechanik, unsere fundamentalste Theorie, ausschließlich mit Ergebnissen von Experimenten beschäftigt, würde unbefriedigend bleiben.

Am Anfang versuchten die Naturphilosophen, die Welt um sich herum zu verstehen. Bei diesem Versuch kamen sie auf die großartige Idee, künstlich einfache Situationen zu entwerfen, in denen die Zahl der Faktoren auf ein Minimum reduziert ist. Tei-

le und herrsche. Die experimentelle Wissenschaft war geboren. Aber das Experiment ist nur ein Hilfsmittel. Das Ziel bleibt: Die Welt zu verstehen. Die Quantenmechanik ausschließlich auf lächerliche Laboroperationen zu beschränken, heißt, das große Vorhaben zu verraten. Eine ernsthafte Formulierung wird die große Welt außerhalb des Laboratoriums nicht ausschließen.

Die Quantenmechanik von Landau und Lifschitz

Wir wollen uns das Buch von L. D. Landau und E. M. Lifschitz [4] ansehen. Ich kann drei Gründe für diese Wahl anführen:

- (i) Es ist tatsächlich ein gutes Buch.
- (ii) Es hat einen sehr guten Stammbaum. Landau war ein Schüler Bohrs. Bohr selbst hat niemals eine systematische Darstellung der Theorie verfasst. Vielleicht ist die von Landau und Lifschitz diejenige, die Bohr am nächsten kommt.
- (iii) Es ist das einzige Buch zu dem Thema, von dem ich jedes Wort gelesen habe. Dazu kam es, weil mein Freund John Sykes mich als technischen Assistenten anwarb, als er die englische Übersetzung machte. Meine Empfehlung dieses Buches hat aber nichts damit zu tun, dass ein Prozent von dem, was Sie dafür bezahlen, bei mir ankommt.

LL betonen [4], Bohr folgend, dass die Quantenmechanik für ihre Formulierung „klassische Konzepte“ benötigt – eine klassische Welt, die in das Quantensystem eingreift; und in der experimentelle Ergebnisse vorkommen (Die Klammern nach den Zitaten geben die Seitennummern an):¹

...Die Formulierung der Grundsätze der Quantenmechanik ist prinzipiell unmöglich, ohne die klassische Mechanik heranzuziehen. (2)

... Um die Bewegung eines Elektrons quantitativ beschreiben zu können, müssen auch physikalische Objekte vorhanden sein, die mit genügender Genauigkeit der klassischen Mechanik gehorchen. (3)

In diesem Zusammenhang nennt man das „klassische Objekt“ gewöhnlich *Gerät*, den Vorgang der Wechselwirkung mit dem Elektron bezeichnet man dabei als *Messung*. Man muss jedoch betonen, dass man damit keineswegs einen *Messprozess* meint, an dem ein physikalischer Beobachter teilhat. Unter einer Messung versteht man in der Quantenmechanik jeden Wechselwirkungsprozess zwischen einem klassischen und einem Quantenobjekt, der unabhängig von irgendeinem Beobachter abläuft. Es war N. Bohr, der die große Rolle des Begriffes der Messung in der Quantenmechanik klargestellt hat. (3)

¹AdÜ: Zitate und Seitennummern der deutschen Ausgabe, erschienen im Akademie-Verlag, Berlin, 1965.

Und mit Bohr bestehen sie wieder auf der „Inhumanität“ des Ganzen:

Wir wollen noch einmal folgendes hervorheben: Wenn wir hier schreiben „gemessen werden“, dann meinen wir immer die Wechselwirkung eines Elektrons mit einem klassischen „Gerät“ und setzen keinesfalls die Anwesenheit eines fremden Beobachters voraus. (4)

Die Quantenmechanik nimmt also eine sehr eigenartige Stellung unter den physikalischen Theorien ein: Sie enthält die klassische Mechanik als Grenzfall und bedarf gleichzeitig dieses Grenzfalles zu ihrer eigenen Begründung. (3)

Wir betrachten ein System aus zwei Teilen: einem klassischen Gerät und einem Elektron. . . Die Zustände des Gerätes werden durch quasiklassische Wellenfunktionen beschrieben, die wir mit $\Phi_n(\xi)$ bezeichnen werden. Der Index n entspricht der „Anzeige“ g_n des Gerätes, ξ bedeutet die Gesamtheit seiner Koordinaten. Der klassische Charakter des Gerätes kommt dadurch zum Ausdruck, dass man in jedem gegebenen Zeitpunkt mit Sicherheit behaupten kann, es befinde sich in einem bekannten Zustand Φ_n mit irgendeinem bestimmten Wert der Größe g . Für ein quantenmechanisches System wäre eine solche Behauptung selbstverständlich falsch. (23-24)

Es sei $\Phi_0(\xi)$ die Wellenfunktion im Anfangszustand des Gerätes. . . $\Psi(q)$ ist eine beliebige Wellenfunktion für den Anfangszustand des Elektrons . . . die Wellenfunktion für den Anfangszustand des gesamten Systems ist deshalb das Produkt $\Psi(q)\Phi_0(\xi)$. . . Nach dem Messprozess . . . erhalten wir eine Summe der Gestalt

$$\sum_n A_n(q)\Phi_n(\xi)$$

die $A_n(q)$ sind dabei irgendwelche Funktionen von q . (24)

Jetzt tritt der „klassische Charakter“ des Gerätes in Erscheinung sowie die zwiespältige Rolle der klassischen Mechanik als Grenzfall und gleichzeitig als Grundlage der Quantenmechanik. Wie schon erwähnt wurde, hat die Größe g („die Anzeige des Gerätes“) wegen des klassischen Charakters des Gerätes in jedem Zeitpunkt einen bestimmten Wert. Daher kann man behaupten, dass der Zustand des Systems Gerät + Elektron nach der Messung in Wirklichkeit nicht durch die ganze Summe (7,2) beschrieben wird, sondern nur durch das eine Glied, das zu der „Anzeige“ g_n des Gerätes gehört: $A_n(q)\Phi_n(\xi)$. $A_n(q)$ ist folglich proportional zur Wellenfunktion des Elektrons nach der Messung. (24)

Das Letzte ist der (bzw. eine Verallgemeinerung des) Dirac-Sprung(s) – hier nicht als Annahme, sondern als Theorem. Man beachte jedoch, dass es zu einem Theorem nur dadurch wurde, dass ein anderer Sprung angenommen wurde: Der eines „klassischen“

Gerätes in einen Eigenzustand seiner „Ablesung“. Es wird später nützlich sein, sich auf letzteres, den *spontanen* Sprung eines makroskopischen Systems in eine bestimmte, makroskopische Konfiguration, als den LL-Sprung, zu beziehen. Und den *erzwungenen* Sprung eines Quantensystems als ein Ergebnis der „Messung“ – *ein externer Eingriff* – als den Dirac-Sprung. Damit will ich nicht andeuten, dass diese Männer die Erfinder dieser Konzepte waren. Sie benutzen sie in den Verweisen, die ich angeben kann.

Nach LL [4] (S. 26) „...schafft der Messprozess [ich denke, sie meinen den LL-Sprung] einen neuen Zustand... In der Natur des Messprozesses selbst ist also die Nichtumkehrbarkeit tief verankert. ...dass die beiden Zeitrichtungen physikalisch nicht äquivalent sind, d. h., es entsteht ein Unterschied zwischen der Zukunft und der Vergangenheit.“

Die LL-Formulierung, mit einem vage definierten Wellenfunktions-Kollaps, wenn sie mit gutem Geschmack und Vorsicht benutzt wird, ist ausreichend FAPP. Es bleibt, dass die Theorie prinzipiell zweideutig ist – darüber, wann und wie genau der Kollaps vorkommt, darüber, was mikroskopisch und was makroskopisch ist, was quantenmäßig und was klassisch. Wir dürfen fragen: Wird diese Uneindeutigkeit durch experimentelle Fakten vorgeschrieben? Oder könnten es die theoretischen Physiker besser, wenn sie sich größere Mühe geben würden?

Die Quantenmechanik von K. Gottfried

Das zweite Buch, das wir hier betrachten wollen, ist das von Kurt Gottfried [5]. Ich kann wieder drei Gründe für diese Wahl angeben:

- (1) Es ist tatsächlich ein gutes Buch. Die CERN-Bibliothek hatte vier Kopien davon. Zwei sind gestohlen worden – schon ein gutes Zeichen. Die zwei übrigen fallen vom vielen Gebrauch auseinander.
- (2) Es hat einen sehr guten Stammbaum. Kurt Gottfried war inspiriert von den Abhandlungen von Dirac und Pauli. Seine persönlichen Lehrer waren J. D. Jackson, J. Schwinger, V. F. Weisskopf und J. Goldstone. Als Berater hatte er P. Martin, C. Schwartz, W. Furry and D. Yennie.
- (3) Ich habe einiges davon mehr als einmal gelesen.

Letzteres ergab sich wie folgt. Ich hatte oft das Vergnügen, diese Dinge mit Viki Weisskopf zu diskutieren. Er endete immer mit „Sie sollten Kurt Gottfried lesen“. Darum las ich schließlich einige Teile von KG wieder, und wieder, und wieder, und wieder.

Am Anfang des Buches gibt es eine Erklärung der Prioritäten (S. 1):

„...Die Schaffung der Quantenmechanik in der Periode 1924–28 rückte die logische Folgerichtigkeit an ihren rechten Platz in der theoretischen Physik zurück. Von noch größerer Wichtigkeit ist, dass sie uns eine Theorie gebracht hat, die in

vollständiger Übereinstimmung mit unserem empirischen Wissen über alle nicht-relativistischen Phänomene zu sein scheint. . . “

Der ersten dieser beiden Aussagen, zugegebenermaßen die unwichtigere, wird im Buch allerdings recht wenig Beachtung geschenkt. Im begrenzten Kontext dieser speziellen Untersuchung kann man das etwas bedauern – im Interesse der Präzision. Im allgemeinen sind die Prioritäten von KG die aller vernünftigen Menschen.

Das Buch selbst ist vor allem pädagogisch. Der Student wird sanft bei der Hand genommen und ertappt sich sobald selbst beim *Ausüben* der Quantenmechanik, schmerzlos – und fast gedankenlos. Die wesentliche Trennung der Welt von KG in System und Apparat, Quanten- und klassische Welt, eine Vorstellung die den Studenten stören könnte, ist sanft implizit, anstatt brutal explizit. Es gibt keine explizite Anleitung, wie diese fragwürdige Teilung in der Praxis auszuführen ist. Es wird einfach dem Studenten überlassen, gute Gewohnheiten anzunehmen – indem ihm gute Beispiele gezeigt werden.

KG erklärt [5], dass es die Aufgabe der Theorie ist (S. 16) „. . . die Ergebnisse von Messungen am System vorherzusagen. . .“. Die Grundstruktur der Welt von KG ist dann $W = S + R$, wobei S das Quantensystem ist und R der Rest der Welt, von dem aus Messungen an S ausgeführt werden. Wenn unsere *lediglich* interpretativen Axiome von Messergebnissen (oder Befunden (S. 11)) handeln, *brauchen* wir unbedingt eine solche Basis R , von der aus Messungen gemacht werden können. Die Frage nach der Identifizierung des Quantensystems S mit der ganzen Welt W stellt sich nicht. Ohne die Axiome zu ändern, stellt sich die Frage nicht, die fragwürdige Spaltung zu beseitigen. Manchmal scheinen einige Autoren von „Quantenmessungs“-Theorien genau das zu versuchen. Es ist wie eine Schlange, die sich selbst vom Schwanz her schlucken will. Es funktioniert – bis zu einem gewissen Punkt. Aber es wird befremdlich für die Zuschauer, noch bevor es ungemütlich für die Schlange wird.

Aber es gibt etwas, das kann und muss getan werden – eine theoretische Analyse; nicht, um den Riss zu *beseitigen* (was mit den üblichen Axiomen nicht möglich ist), sondern, um ihn zu *verschieben*. Das wird in KGs Kapitel 4: „Der Messprozess. . .“ zur Sprache gebracht. Der „Apparat“ kann sicherlich als aus Atomen aufgebaut betrachtet werden? Häufig passiert es, dass wir nicht wissen (oder nicht gut genug), weder *a priori* noch aus Erfahrung, wie ein System funktioniert, das wir als „Apparat“ A aus dem Rest der Welt R betrachten, und behandeln es zusammen mit S als Teil eines vergrößerten Quantensystems S' : $R = A + R'$; $S + A = S'$; $W = S' + R'$. Die ursprünglichen Axiome über die „Messung“ (was auch immer sie genau sein mögen), werden dann nicht auf die S/A -Schnittstelle angewandt, sondern auf die A/R' -Schnittstelle – wo es aus irgendeinem Grund als sicherer angesehen wird. Im wirklichen Leben wäre es nicht möglich, irgend einen *solchen* Teilungspunkt zu finden, der *genau* sicher wäre. Es wäre zum Beispiel, streng genommen, nicht gerade sicher, ihn zwischen den Zählern und, sagen wir, dem Computer zu wählen – indem man sauber zwischen den Atomen der Drähte durchschneidet. Aber mit etwas Idealisierung, die „. . . hoch stilisiert [sein könnte] und nicht der enormen Komplexität eines realen Laborexperimentes gerecht

wird...“ (S. 165), könnte es möglich sein, mehr als einen, nicht zu unglaubwürdigen Weg zu finden, die Welt in Stücke zu teilen. Offensichtlich ist es notwendig, zu prüfen, dass verschiedene Auswahlmöglichkeiten widerspruchsfreie Ergebnisse ergeben (FAPP). Ein Dementi am Ende von KGs Kapitel 4 legt nahe, dass dies, und nur dies, das bescheidene Ziel dieses Kapitels ist (S. 189): „... wir unterstreichen, dass unsere Diskussion lediglich aus verschiedenen Demonstrationen der inneren Widerspruchsfreiheit bestand...“. Das Lesen deckt jedoch andere Ambitionen auf.

Bei Vernachlässigung der Wechselwirkung von A mit R' wird das verbundene System $S' = S + A$ gemäß der Schrödinger-Gleichung nach der „Messung“ an S mit A in einem Endzustand aufgefunden

$$\Psi = \sum_n c_n \Psi_n,$$

wobei jeder der Zustände Ψ_n eine bestimmte Zeigerablesung g_n des Apparates haben soll. Die entsprechende Dichtematrix ist

$$\rho = \sum_n \sum_m c_n c_m^* \Psi_n \Psi_m^*.$$

An diesem Punkt besteht KG nachdrücklich darauf, dass sowohl A , als auch S' makroskopische Systeme sind. Für makroskopische Systeme, behauptet er, (S. 186) gilt „... $\text{tr} A \hat{\rho} = \text{tr} A \rho$, für alle Observablen A , die in der Natur bekannt sind...“, wobei

$$\hat{\rho} = \sum_n |c_n|^2 \Psi_n \Psi_n^*.$$

D. h. $\hat{\rho}$ wird aus ρ erhalten durch Weglassen der Interferenzterme, die Paare von makroskopisch verschiedenen Zuständen betreffen. Dann (S. 188) „... dürfen wir nach der Messung ρ durch $\hat{\rho}$ ersetzen, im sicheren Wissen, dass der Fehler niemals gefunden werden wird...“

Nun, obwohl mir ziemlich unwohl ist bei dem Konzept „aller bekannten Observablen“, bin ich völlig überzeugt von der praktischen Unauffindbarkeit – sogar der Abwesenheit FAPP – der Interferenz von makroskopisch verschiedenen Zuständen [6]. Darum wollen wir mit KG fortfahren und sehen, wohin es führt: „... Wenn wir die Ununterscheidbarkeit von ρ und $\hat{\rho}$ ausnutzen, um zu sagen, dass $\hat{\rho}$ der Zustand nach der Messung ist, dann erscheint die intuitive Interpretation von c_m als Wahrscheinlichkeitsamplitude ohne weitere Umstände. Das ist der Fall, weil c_m in $\hat{\rho}$ nur mittels $|c_m|^2$ eingeht, und die letztere Größe erscheint in $\hat{\rho}$ in genau derselben Weise, wie die Wahrscheinlichkeiten in der klassischen statistischen Physik...“

Ich bin davon ziemlich verblüfft. Wenn man nicht tatsächlich nach Wahrscheinlichkeiten Ausschau halten würde, denke ich, wäre sogar von $\hat{\rho}$ die offensichtliche Interpretation, dass das System in einem Zustand ist, in dem die verschiedenen Ψ s irgendwie koexistieren: $\Psi_1 \Psi_1^*$ und $\Psi_2 \Psi_2^*$ und...

Das ist in keiner Weise eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation, in der die verschiedenen Terme nicht als koexistierend, sondern als Alternativen angesehen werden: $\Psi_1 \Psi_1^*$ oder $\Psi_2 \Psi_2^*$ oder...

Die Vorstellung, dass die Eliminierung der Kohärenz in der einen oder anderen Weise, auf die Ersetzung von „und“ durch „oder“ hinausläuft, ist unter den Lösern des „Messproblems“ sehr verbreitet. Mich hat das stets verblüfft.

Die Bedeutung, die von KG der Ersetzung von ρ durch $\hat{\rho}$ beigemessen wird, kann schwerlich überbewertet werden: „...Insoweit nichtklassische Interferenzterme (wie $c_n c_m^*$) in dem mathematischen Ausdruck für ρ vorkommen. ... sind die Zahlen c_m nicht intuitiv interpretierbar, und die Theorie bleibt ein leerer mathematischer Formalismus ...“ (S. 187).

Das legt aber nahe, dass die originale Theorie – „ein leerer mathematischer Formalismus“ – nicht bloß approximiert, sondern verworfen und ersetzt wird. Und noch an anderer Stelle scheint KG klar zu sein, dass es das Geschäft der Approximation ist, das ihn beschäftigt – Approximation der Sorte, die Irreversibilität in den Übergang von der klassischen Mechanik zur Thermodynamik einbringt: „... In diesem Zusammenhang sollte man beachten, dass man durch die Approximation von ρ durch $\hat{\rho}$ Irreversibilität einbringt, weil die zeitinvertierte Schrödinger-Gleichung nicht ρ aus $\hat{\rho}$ zurückgewinnen kann.“ (S. 188).

Eine neuere Zusammenfassung [7] wirft ein neues Licht auf die Ideen von KG. Sie ist der Aussage gewidmet (S. 1): „... die Gesetze der Quantenmechanik bringen die Ergebnisse der Messungen hervor...“. Diese Gesetze werden angenommen als (S. 1): „(1) Ein reiner Zustand wird durch einen Vektor im Hilbert-Raum beschrieben, von dem Erwartungswerte von Observablen mit Standardmethoden berechnet werden; und (2) die zeitliche Entwicklung ist eine unitäre Transformation dieses Vektors“. Nicht einbezogen in die Gesetze ist (S. 1) von Neumanns „... berühmte-berichtigte Postulat: Der Akt der Messung ‚kollabiert‘ den Zustand in einen, in dem es keine Interferenzterme zwischen verschiedenen Zuständen des Messapparates gibt...“. In der Tat (S. 1) „das Reduktionspostulat ist eine hässliche Narbe auf dem, was eine wundervolle Theorie wäre, wenn es entfernt werden könnte...“

Vielleicht ist es nützlich, sich hier zu erinnern, wie das besagte, berichtigte Postulat wirklich von vN formuliert wurde [8]. Wenn wir zurückblicken, finden wir, was vN tatsächlich *postuliert* (S. 347ff und 418), ist, dass die „Messung“ – eine externe Einwirkung von R auf S – den Zustand

$$\Phi = \sum_n c_n \Phi_n$$

veranlasst, mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten in Φ_1 oder Φ_2 oder ... zu springen.

Von dem „oder“, das hier (als Ergebnis externer Einwirkung) das „und“ ersetzt, schließt vN, dass die resultierende Dichtematrix, gemittelt über die verschiedenen Möglichkei-

ten, keine Interferenzterme zwischen Zuständen des Systems hat, die verschiedenen Messergebnissen entsprechen (S. 347). Ich würde hier einige Punkte betonen wollen.

(1) von Neumann präsentiert das Verschwinden der Kohärenz in der Dichtematrix nicht als Postulat, sondern als Konsequenz eines Postulates. Das Postulat wird auf der Wellenfunktions-Ebene gemacht und ist dasselbe, das zum Beispiel schon Dirac machte.

(2) Ich kann mir nicht vorstellen, dass von Neumann in die entgegengesetzte Richtung argumentiert: Dass das Fehlen von Interferenz in der Dichtematrix ohne weitere Umstände, das Ersetzen von „und“ durch „oder“ auf der Wellenfunktions-Ebene bedeutet. Für diesen Effekt wäre ein spezielles Postulat notwendig.

(3) von Neumann befasst sich hier damit, was mit einem Zustand eines Systems passiert, das eine Messung erlitten hat – einen externen Eingriff. In Anwendung auf das erweiterte System $S' (= S + A)$ würde von Neumanns Kollaps nicht vor einem externen Eingriff von R' vorkommen. Es wäre überraschend, wenn diese Folge des externen Eingriffs auf S' aus der rein internen Schrödinger-Gleichung für S' gefolgert werden könnte. Nun geschieht KGs Kollaps – obwohl durch den Bezug auf „alle bekannten Observablen“ an der S'/R' -Schnittstelle gerechtfertigt – nach der „Messung“ von A an S , aber vor der Wechselwirkung durch S'/R' . Deshalb ist der Kollaps, den KG diskutiert, nicht der von vN „berücksichtigt“ postulierte. Es ist eher der LL-Kollaps, als der von von Neumann und Dirac.

Die explizite Annahme, dass die Erwartungswerte mit den üblichen Methoden berechnet werden sollen, beleuchtet das nachfolgende Herausfallen der üblichen Wahrscheinlichkeitsinterpretation „ohne weitere Umstände“. Denn die Regeln zum Berechnen der Erwartungswerte, zum Beispiel für Projektionsoperatoren, ergeben die Bornschen Wahrscheinlichkeiten für Eigenwerte. Das Geheimnis ist dann: Was hat der Autor tatsächlich abgeleitet, anstatt angenommen? Und warum besteht er darauf, dass Wahrscheinlichkeiten nur nach dem „Schlachten“ von ρ in $\hat{\rho}$ auftreten; und die Theorie ein „ein leerer mathematischer Formalismus“ bleibt, solange ρ beibehalten wird? Dirac, von Neumann und die anderen nahmen freizügig die üblichen Regeln für Erwartungswerte und so auch Wahrscheinlichkeiten im Kontext der „ungeschlachteten“ Theorie an. Der Bezug zu den üblichen Regeln für Erwartungswerte macht auch klar, *wovon* die Wahrscheinlichkeiten KGs, Wahrscheinlichkeiten sind. *Es sind Wahrscheinlichkeiten von „Messergebnissen“* – von externen Ergebnissen externer Einwirkungen, von R' auf S' in der Anwendung. Wir dürfen uns nicht dazu bringen lassen, sie uns als Wahrscheinlichkeiten von immanenten Eigenschaften von S' vorzustellen; unabhängig von (oder vor) der „Messung“. Derartige Konzepte haben keinen Platz in der orthodoxen Theorie.

Nachdem ich mein Bestes versucht habe, zu verstehen, was KG geschrieben hat, gestatte ich mir abschließend einige Vermutungen, was er im Sinn gehabt haben könnte. Ich denke, dass KG von Anfang an stillschweigend die Dirac-Regeln bei S'/R' annimmt – einschließlich des Dirac-von-Neumann-Sprungs, der gebraucht wird, um die Korrela-

tionen zwischen den Ergebnissen aufeinanderfolgender („moralischer“) Messungen zu bekommen. Dann sieht er (für „alle bekannten Observablen“), dass die Messergebnisse so sind, *als ob* (FAPP) der LL-Sprung in S' stattgefunden hätte. Das ist wichtig, denn es zeigt, FAPP, dass wir uns erlauben können, dem „Apparat“ klassische Eigenschaften zuzuordnen, obwohl wir glauben, dass er durch die Quantenmechanik bestimmt wird. Aber es bleibt eine Sprungannahme übrig. LL leiteten den Dirac-Sprung vom angenommenen LL-Sprung ab. KG leitet, FAPP, den LL-Sprung von Annahmen an der verschobenen Grenze R'/S' ab, die den Dirac-Sprung dort beinhalten.

Mir scheint, dass es dann eine konzeptionelle Drift in der Beweisführung gibt. Die Einschränkung „als ob (FAPP)“ wird fallengelassen, und es wird angenommen, dass der LL-Sprung tatsächlich stattfindet. Die Drift ist: Weg von der „Messungs“-Orientierung (... externe Einwirkung...) der orthodoxen Quantenmechanik, hin zu der Vorstellung, dass Systeme, wie oben S' , immanente Eigenschaften haben – unabhängig von, und vor der Beobachtung. Insbesondere wird angenommen, dass die Anzeigen des experimentellen Apparates wirklich da sind, bevor sie abgelesen werden. Das würde KGs Abneigung erklären, die „ungeschlachtete“ Dichtematrix ρ zu interpretieren, weil die Interferenzterme die scheinbar gleichzeitige Existenz von verschiedenen Anzeigen bedeuten könnten. Es würde seine Notwendigkeit erklären, ρ in $\hat{\rho}$ zu kollabieren – im Gegensatz zu von Neumann und den anderen, und ohne externen Eingriff durch die letzte Grenze S'/R' . Es würde erklären, warum er bestrebt ist, diese Reduktion von der internen Schrödinger-Gleichung von S' zu erhalten. (Es würde aber nicht seinen Bezug auf „alle bekannten Observablen“ erklären – an der S'/R' -Grenze). Die resultierende Theorie wäre eine, in der einige „makroskopische“, „physikalische Merkmale“ die ganze Zeit Werte *haben*, mit einer Dynamik, die irgendwie mit dem „Schlachten“ von ρ in $\hat{\rho}$ zusammenhängt – was irgendwie als nicht unvereinbar mit der internen Schrödinger-Gleichung des Systems angesehen wird. Eine solche Theorie, die immanente Eigenschaften annimmt, würde die fragwürdige Spaltung nicht brauchen. Aber die Beibehaltung des vagen Wortes „makroskopisch“ würde eine begrenzte Ambition aufdecken, was die Präzision angeht. Ich glaube, um die vage Unterscheidung von „mikroskopisch“ und „makroskopisch“ zu vermeiden – wieder eine fragwürdige Grenze – würde man dazu gebracht, Variablen einzuführen, die auch im kleinsten Maßstab Werte *haben*. Wenn die exakte Gültigkeit der Schrödinger-Gleichung beibehalten wird, glaube ich, dass dies zum Bild von de Broglie und Bohm führt.

Die Quantenmechanik von N. G. van Kampen

Wir wollen uns ein weiteres gutes Buch ansehen, nämlich *Physica A* **153** (1988), und darin insbesondere den Beitrag: „Zehn Theoreme über quantenmechanische Messungen“ von N. G. van Kampen [9]. Dieser Artikel ist insbesondere wegen seines robusten, gesunden Menschenverstands bemerkenswert. Der Autor übt keine Nachsicht mit „... solchen verwirrenden Phantasien wie der Viele-Welten-Interpretation...“ (S. 98). Er weist kurzerhand die Vorstellung von Pauli, von Neumann, Wigner zurück – dass die „Messung“ nur im Geiste des Beobachters vollendet wird: „... Ich finde es schwer

zu verstehen, dass jemand, der zu einer solchen Schlussfolgerung kommt, nicht nach dem Fehler in seiner Beweisführung sucht. . . “ (S. 101). Für vK ist „. . . der Geist des Beobachters belanglos . . . die quantenmechanische Messung ist beendet, wenn das Ergebnis makroskopisch aufgezeichnet worden ist. . . “ (S. 101). Darüber hinaus kommt für vK bei der „Messung“ keine spezielle Dynamik ins Spiel: „. . . der Akt der Messung wird vollständig durch die Schrödinger-Gleichung für das Zielsystem und den Apparat zusammen beschrieben. Der Kollaps der Wellenfunktion ist kein zusätzliches Postulat, sondern vielmehr eine Konsequenz. . . “ (S. 97)

Nach der Messung wird das Messinstrument zugegebenermaßen gemäß der Schrödinger-Gleichung in einer Superposition von verschiedenen Anzeigen sein. Zum Beispiel ist Schrödingers Katze in der Superposition $|Katze\rangle = a|Leben\rangle + b|Tod\rangle$. Und es könnte scheinen, dass wir es eher mit „und“ als mit „oder“ zu tun haben; wegen der Interferenz: „. . . zum Beispiel ist die Temperatur der Katze. . . der Erwartungswert einer solchen Größe G . . . nicht ein statistischer Mittelwert der Werte G_{ll} und G_{tt} mit den Wahrscheinlichkeiten $|a|^2$ und $|b|^2$, sondern enthält Kreuzterme zwischen Leben und Tod. . . “ (S. 103)

Aber vK ist nicht beeindruckt:

Die Antwort auf dieses Paradoxon ist wiederum, dass die Katze makroskopisch ist. Leben und Tod sind Makrozustände, die eine enorme Zahl von Eigenzuständen $|l\rangle$ und $|t\rangle$ enthalten. . .

$$|Katze\rangle = \sum_l a_l |l\rangle + \sum_t b_t |t\rangle$$

. . . die Kreuzterme im Ausdruck für $\langle G \rangle$. . . da es hier eine derartige Fülle von Termen gibt; alle mit verschiedenen Phasen und Magnituden, die sich gegenseitig aufheben und deren Summe praktisch verschwindet. Das ist die Art und Weise, in der die typische quantenmechanische Interferenz zwischen Makrozuständen unwirksam wird . . . (S. 103)

Mir scheint, dieses Argument für „keine Interferenz“ ist an sich nicht unmittelbar überzeugend. Sicherlich wäre es möglich, eine Summe aus sehr vielen Termen zu finden, mit verschiedenen Phasen und Magnituden, die nicht Null ist? Ich bin jedoch trotzdem überzeugt, dass die Interferenz zwischen makroskopisch verschiedenen Zuständen sehr, sehr schwer fassbar ist. Das zugegeben; will ich versuchen, auszudrücken, was das Argument meiner Meinung nach sein soll – für den Kollaps; als kein zusätzliches Postulat, sondern vielmehr eine „Konsequenz“.

Die Welt wird wieder unterteilt in „System“, „Apparat“ und den Rest: $W = S + A + R' = S' + R'$. Zuerst werden die üblichen Regeln für Quanten-„Messungen“ an der S'/R' -Schnittstelle angenommen – einschließlich des Kollaps-Postulats, das Korrelationen zwischen „Messungen“ vorschreibt, die zu verschiedenen Zeiten

gemacht wurden. Aber die „Messungen“ an S'/R' , die tatsächlich gemacht werden können, FAPP, zeigen keine Interferenz zwischen makroskopisch verschiedenen Zuständen von S' . Es ist, *als ob* das „und“ in der Superposition schon *vor* jeder dieser Messungen durch „oder“ ersetzt worden war. Damit *ist* das „und“ schon durch „oder“ ersetzt worden. Es ist, *als ob* es so wäre. . . und damit *ist* es so.

Das mag gute FAPP-Logik sein. Wenn wir pedantischer sind, scheint mir, dass wir hier keinen Beweis eines Theorems haben, sondern eine *Änderung der Theorie* – an einem strategisch gut gewählten Punkt. Die Änderung führt von einer Theorie, die *nur* von den Ergebnissen externer Eingriffe in das Quantensystem spricht, S' in dieser Diskussion, zu einer, in der dem System *immanente Eigenschaften* zugeschrieben werden – Leblosigkeit oder Lebendigkeit, im Fall von Katzen. Der Punkt ist strategisch gut gewählt, weil die Vorhersagen für Ergebnisse von „Messungen“ durch S'/R' noch dieselben sein werden . . . FAPP.

Ob durch Theorem oder durch Annahme; wir kommen schließlich zu einer Theorie, wie der von LL, in der Superpositionen von makroskopisch verschiedenen Zuständen irgendwie in einen ihrer Teile zerfallen. Wie zuvor können wir fragen, wie genau, und wie oft das passiert. Wenn wir wirklich ein Theorem hätten, wären die Antworten auf diese Fragen berechenbar. Aber die einzige Möglichkeit von Berechnungen, in Schemata wie denen von KG und vK, bedeutet, die fragwürdige Grenze weiter zu verschieben – und mit ihr die Fragen.

Für den Großteil des Artikels [9] scheint vKs Welt die winzige Welt des Labors zu sein, und diese auch nicht allzu realistisch behandelt: „. . . in diesem Zusammenhang wird Messung immer als augenblicklich angenommen . . .“ (S. 100).

Aber fast im letzten Moment eröffnet sich ein verblüffend neuer Ausblick – ein vollkommen unermesslicher:

Theorem IX: Das Gesamtsystem wird durchweg durch den Wellenvektor Ψ beschrieben und hat deshalb zu allen Zeiten null Entropie. . . (S. 111)

Dies sollte Spekulationen ein Ende machen, dass Messungen für die wachsende Entropie des Universums verantwortlich sind. (Das wird es natürlich nicht.)

Damit scheint vK, anders als viele andere, sehr praktisch veranlagte Physiker, bereit zu sein, das Universum als Ganzes zu betrachten. Sein Universum, oder irgendein „Gesamtsystem“ in einem beliebigem Maßstab, hat eine Wellenfunktion, und diese Wellenfunktion gehorcht einer linearen Schrödinger-Gleichung. Es ist jedoch klar, dass diese Wellenfunktion nicht die ganze Wahrheit von vKs Gesamtheit sein kann. Denn es ist klar, dass er erwartet, dass die Experimente in seinen Laboratorien bestimmte Ergebnisse ergeben, und seine Katzen tot oder lebendig sind. Er glaubt darum an Variablen X , die die Realitäten in einer Weise identifizieren, wie es die Wellenfunktion – ohne Kollaps – nicht kann.

Seine vollständige Kinematik ist dann vom dualen, de Broglie-Bohmschen, „verborgene Variablen“-Typ: $(\Psi(t, q), X(t))$.

Für die Dynamik hat er genau die Schrödinger-Gleichung für Ψ , aber ich weiß nicht, was er für das X genau im Sinn hat, das für ihn beschränkt wäre auf irgendeine „makroskopische“ Ebene. Tatsächlich würde er es vielleicht vorziehen, etwas unbestimmt darüber zu bleiben, weil:

Theorem IV: Jeder, der Ψ mit mehr Bedeutung ausstattet, als benötigt wird, beobachtbare Phänomene zu berechnen, ist verantwortlich für die Konsequenzen. . . (S. 99)

Zu einer präzisen Quantenmechanik

Anfangs versuchte Schrödinger, seine Wellenfunktion so zu interpretieren, dass sie auf irgendeine Art die Dichte des Stoffes angibt, aus dem die Welt gemacht ist. Er versuchte, sich das Elektron als Wellenpaket vorzustellen – eine Wellenfunktion, die nur in einem kleinen Raumbereich nennenswert von Null verschieden ist. Die Ausdehnung dieses Bereiches stellte er sich als tatsächliche Größe des Elektrons vor – sein Elektron war etwas unscharf. Zunächst glaubte er, dass kleine Wellenpakete, die sich gemäß der Schrödinger-Gleichung entwickeln, klein bleiben. Aber das war ein Irrtum. Wellenpakete zerfließen, und dehnen sich im Verlauf der Zeit unendlich aus – gemäß der Schrödinger-Gleichung. Aber wie weit auch immer die Wellenfunktion sich ausgedehnt hat – die Reaktion eines Detektors auf ein Elektron bleibt punktförmig. Darum hat Schrödingers „realistische“ Interpretation seiner Wellenfunktion nicht überlebt.

Dann kam Borns Interpretation. Die Wellenfunktion gibt nicht die Dichte von *Stoff*, sondern vielmehr (als Quadrat ihres Betrages) die Dichte von Wahrscheinlichkeit. Wahrscheinlichkeit *wovon* genau? Nicht davon, dass das Elektron dort *ist*, sondern dass es dort *gefunden* wird, wenn seine Position „gemessen“ wird.

Warum diese Abneigung gegen „sein“ und das Bestehen auf „finden“? Die Gründungsväter konnten kein klares Bild von den Dingen in der entfernten, atomaren Größenordnung formen. Sie wurden sich des dazwischenliegenden Apparates deutlich bewusst; und der Notwendigkeit für eine „klassische“ Basis, von der aus auf das Quantensystem eingewirkt wird. Deshalb die fragwürdige Spaltung.

Die Kinematik der Welt ist, in diesem orthodoxen Bild, gegeben durch eine Wellenfunktion (vielleicht mehr als eine?) für den Quantenteil und klassische Variablen – Variablen, die Werte *haben* – für den klassischen Teil: $(\Psi(t, q, \dots), X(t), \dots)$. Die X sind irgendwie makroskopisch. Das wird nicht sehr explizit gesagt. Auch die Dynamik wird nicht sehr genau formuliert. Sie beinhaltet eine Schrödinger-Gleichung für den Quantenteil, eine Art von klassischer Mechanik für den klassischen Teil und „Kollaps“-Rezepte für ihre Wechselwirkung.

Mir scheint, die einzige Hoffnung auf Präzision mit der dualen (Ψ, X) Kinematik ist, die fragwürdige Spaltung völlig wegzulassen und beide, Ψ und X , auf die Welt als

Ganzes zu beziehen. Dann dürfen die X nicht auf einen vagen makroskopischen Maßstab beschränkt werden, sondern müssen sich über alle Maßstäbe erstrecken. Im Bild von de Broglie und Bohm wird jedem Teilchen eine Position $X(t)$ zugeschrieben. Dann *haben* Instrumentzeiger – Zusammensetzungen von Teilchen – Positionen, und Experimente *haben* Ergebnisse. Die Dynamik ist gegeben durch die Schrödinger-Gleichung, plus präzise „Führungs“-Gleichungen, die vorschreiben, wie sich die $X(t)$ unter dem Einfluss von Ψ bewegen. Den Teilchen werden *nicht* Drehmomente, Energien, u.s.w zugeschrieben, sondern *nur* Positionen als Funktionen der Zeit. Spezielle „Messungs“-Ergebnisse von Drehmomenten, Energien, u.s.w entstehen als Zeigerpositionen in entsprechenden experimentellen Aufbauten. Überlegungen vom KG- und vK-Typ, über das Fehlen (FAPP) von makroskopischen Interferenzen, bekommen hier ihren Platz – und einen bedeutenden – indem sie aufzeigen, wie wir normalerweise (FAPP) nicht die ganze Welt berücksichtigen müssen, sondern nur ein Teilsystem und die Wellenfunktion vereinfachen können ... FAPP.

Die Kinematik vom Born-Typ (Ψ, X) hat eine Dualität, die das originale Bild von Schrödinger – „Dichte von Stoff“ – nicht hatte. Die Position des Teilchens war dort nur eine Eigenschaft des Wellenpakets, nichts Zusätzliches. Der Landau-Lifschitz-Ansatz kann als Beibehaltung dieser einfachen, nichtdualen Kinematik angesehen werden; aber mit einer Wellenfunktion, die kompakt ist im makroskopischen, anstatt im mikroskopischen Maßstab. Wir wissen, scheinen sie zu sagen, dass makroskopische Zeiger bestimmte Positionen *haben*. *Und* wir denken, dass es nichts gibt *außer* der Wellenfunktion. Deshalb muss die Wellenfunktion schmal sein, in Bezug auf die makroskopischen Variablen. Die Schrödinger-Gleichung erhält diese Schmalheit nicht (wie es Schrödinger selbst mit seiner Katze dramatisierte). Deshalb muss zusätzlich irgendeine Art von „Kollaps“ stattfinden, um für diese makroskopische Schmalheit zu sorgen. In gleicher Weise könnten wir, wenn wir Schrödingers Entwicklung irgendwie modifiziert hätten, das Ausbreiten seiner Wellenpaket-Elektronen vermeiden. Übrigens ist die Vorstellung, dass das Elektron im Grundzustand eines Wasserstoffatoms so groß wie das Atom ist (das dann vollkommen kugelsymmetrisch ist), vollkommen annehmbar – und vielleicht sogar reizvoll. Die Vorstellung, dass ein makroskopischer Zeiger gleichzeitig in verschiedene Richtungen zeigen kann, oder dass eine Katze mehrere ihrer neun Leben zur gleichen Zeit haben kann, ist schwerer zu schlucken. Und wenn wir keine Zusatzvariablen X haben, um die makroskopische Bestimmtheit auszudrücken, muss die Wellenfunktion selbst in makroskopischen Richtungen im Konfigurationsraum schmal sein. Das führt der Landau-Lifschitz-Kollaps herbei. Er tut das aber in einer ziemlich vagen Weise, zu ziemlich vage spezifizierten Zeiten.

Das Ghiradi-Rimini-Weber-Schema [11]

Das GRW-Schema stellt einen Vorschlag dar, der versucht, die Schwierigkeiten der Quantenmechanik, die von John Bell in diesem Artikel diskutiert werden, zu überwinden. Das GRW-Modell basiert auf der Anerkennung des Fakts, dass die Schrödinger-Dynamik, die die Entwicklung der Wellenfunktion regiert, durch die Aufnahme von stochastischen und nichtlinearen Effekten modifiziert werden muss. Offensichtlich müssen diese Modifikationen alle Standard-Quantenvorhersagen über Mikrosysteme praktisch unverändert lassen.

Im Einzelnen heißt das: Die GRW-Theorie erlaubt, dass die Wellenfunktion, neben der Entwicklung durch die Standard-Hamilton-Operator-Dynamik, zu zufälligen Zeiten spontanen Prozessen unterworfen ist, die Lokalisierungen von den Mikrobestandteilen jedes physikalischen Systems im Raum entsprechen. Die mittlere Frequenz dieser Lokalisierungen ist extrem klein, und die Lokalisierungsweite ist im atomaren Maßstab groß. Folglich wird keine Vorhersage des Standard-Quantenformalismus für Mikrosysteme in irgendeiner nennenswerten Weise geändert.

Der Vorzug des Modells ist, dass die Frequenz des Lokalisierungsmechanismus zunimmt, wenn die Zahl der Bestandteile eines zusammengesetzten Systems zunimmt. Im Fall eines makroskopischen Systems (das Bestandteile in der Größenordnung der Avogadro-Zahl enthält) werden lineare Superpositionen von Zuständen, die Zeiger „die gleichzeitig in verschiedene Richtungen zeigen“ beschreiben, in extrem kurzer Zeit dynamisch unterdrückt. Wie von John Bell festgestellt: In GRW „ist Schrödingers Katze nicht länger als den Bruchteil einer Sekunde zugleich tot und lebendig“.

G. C. Ghiradi, A. Rimini und T. Weber

Im Ghiradi-Rimini-Weber-Schema (siehe Kasten und die Beiträge von Ghiradi, Rimini, Weber, Pearle, Gisin und Diosi präsentiert in *62 Years of Uncertainty*, Erice, 5–14 August 1989 [10]) wird diese Vagheit durch mathematische Präzision ersetzt. Die Schrödinger-Wellenfunktion wird – selbst für ein einzelnes Teilchen – als instabil angesehen, mit einer vorgeschriebenen mittleren Lebenszeit pro Teilchen, gegenüber einem spontanen Kollaps mit vorgeschriebener Form. Die Lebenszeit und die Kollaps-Erweiterung sind von der Art, dass sich die Abweichungen von der Schrödinger-Gleichung für Systeme mit wenigen Teilchen sehr selten zeigen und sehr schwach sind. Aber in makroskopischen Systemen – *als Konsequenz der vorgeschriebenen Gleichungen* – zeigen Zeiger sehr schnell und Katzen werden sehr schnell getötet oder verschont.

Die orthodoxen Ansätze (gleich, ob die Autoren denken, sie haben Ableitungen oder Annahmen gemacht) sind völlig ausreichend FAPP – wenn sie mit gutem Geschmack und Vorsicht benutzt werden, die durch gute Beispiele erworben wurden. Mir scheint,

es gibt mindestens zwei Wege von hier zu einer präzisen Theorie. Beide beseitigen die fragwürdige Spaltung. Die Theorien vom de Broglie-Bohm-Typ behalten die lineare Wellengleichung exakt bei und führen darum Ergänzungsvariablen ein, um die Nichtwelligkeit der Welt im makroskopischen Maßstab auszudrücken. Die Theorien vom GRW-Typ haben in ihrer Kinematik nichts außer der Wellenfunktion. Sie gibt (in einem multidimensionalen Konfigurationsraum!) die Dichte von *Stoff* an. Um die Begrenztheit dieses Stoffs in makroskopischen Dimensionen darzustellen, muss die Schrödinger-Gleichung modifiziert werden – in diesem GRW-Bild durch einen mathematisch vorgeschriebenen Kollapsmechanismus.

Die große Frage ist meiner Meinung nach, welches (wenn überhaupt) dieser beiden präzisen Bilder in lorentz-invarianter Weise weiterentwickelt werden kann.

... Jede historische Erfahrung bestätigt, dass die Menschen das Mögliche nicht erreicht hätten, wenn sie nicht, wieder und wieder, das Unmögliche versucht hätten. (Max Weber)

... wir wissen nicht, an welcher Stelle wir irren, solange wir nicht den Kopf riskieren. (R. P. Feynman)

Anmerkungen und Literatur

- [1] P. A. M. Dirac, *Proc. R. Soc. A* **123**, 714 (1929)
- [2] P. A. M. Dirac, *Sci. American* **208**, May 45 (1963).
- [3] P. A. M. Dirac, *Quantum Mechanics*, Oxford University Press (1930).
- [4] L. D. Landau und E. M. Lifschitz, *Quantum Mechanics*, 3rd edition, Pergamon Press (1977). [Deutsche Ausgabe: *Lehrbuch der theoretischen Physik, Bd. III, Quantenmechanik*, 1. Aufl., Akademie-Verlag, Berlin, 1965.] (Landau und Lifschitz sind abgekürzt als LL)
- [5] K. Gottfried, *Quantum Mechanics*, Benjamin (1966). (Gottfried ist abgekürzt als KG.)
- [6] J. S. Bell und M. Nauenberg, „The moral aspects of quantum mechanics“. In *Preludes in Theoretical Physics* (in honour of V. F. Weisskopf), North Holland (1966), S. 278–86. [Kapitel 3 in diesem Buch]
- [7] K. Gottfried, „Does quantum mechanics describe the collapse of the wavefunction?“ In *62 Years of Uncertainty*, Erice, 5–14 August 1989, Plenum Publisher (1989).

- [8] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1955). (von Neumann ist abgekürzt als vN.)
AdÜ: Deutsches Original: J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Julius Springer-Verlag, Berlin (1932)²
- [9] N. G. van Kampen, „Ten theorems about quantum mechanical measurements“, *Physica A* **153**, 97 (1988). (van Kampen ist abgekürzt als vK.)
- [10] Publiziert in *62 Years of Uncertainty*, Erice, 5–14 August 1989, Plenum Publisher (1989).
- [11] Die originale und technisch detaillierte Darstellung von GRW ist in *Phys. Rev. D* **34**, 470 (1986) zu finden; eine brillante und einfache Darstellung ist von John Bell in „Gibt es Quantensprünge?“ (1987) gegeben worden [Kapitel 22 in diesem Buch]. Eine allgemeine Diskussion der konzeptionellen Auswirkungen des Schemas ist in *Foundation of Physics* **81**, 1 (1988) zu finden.
Das GRW-Modell ist Thema vieler aktueller Artikel, und es gibt eine lebhafteste Debatte über seine Auswirkungen. Das Modell ist kürzlich verallgemeinert worden, um den Fall identischer Teilchen abzudecken und die Forderungen der relativistischen Invarianz zu erfüllen.

²Das Buch ist online verfügbar unter:

<http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/img/?IDDOC=263758>