

Abschlussvorlesung WS 04/05

Über Schrödingers Katze

Detlef Dürr, Institut für Mathematik, LMU

1 Der Artikel

Erwin Schrödingers Artikel: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* erschien 1935 in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*, Heft 48, Seite 52. Der Artikel ist sehr prosaisch und enthält kaum Formeln. Es ist zweifelhaft—und wenn man die Wirkung des Artikels beachtet sogar deutlich so—dass kaum ein namhafter Physiker—außer Einstein natürlich—den Artikel überhaupt begriffen hat. Der Stil ist fast der eines Essays, mit einem leichten Hauch Ironie. Die Dinge werden nicht mit penetranter Deutlichkeit gesagt, sondern spiraland einengend aber niemals endgültig. Was wohl Schrödinger bewegt hat, in dieser Form zu schreiben? Im Paragraph 5 des Artikels: *Sind die Variablen wirklich verwaschen?* nimmt Schrödinger die Idee auf, daß die Wellenfunktion die Materie selbst darstellt, die dann, auf Grund der Wellennatur der Wellenfunktion, “verwaschen“ ist. Diese Verwaschenheit wäre im atomaren Bereich akzeptabel, aber nicht in unserer groben Welt:

Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den Zugriff der Katze sichern muß): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radiokativer Substanz, *so* wenig, daß im Laufe einer Stunde *vielleicht* eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sagen, daß die Katze noch lebt, *wenn* inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die ψ Funktion des Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s.v.v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.

Das Typische an diesen Fällen ist, daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in einen grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung *entscheiden* läßt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein “verwaschenes Modell“ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielte es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.

Das erste Lesen dieser Zeilen verwirrt, insbesondere die beiden letzten Sätze kommen so unvermittelt daher und der abschließende Satz hat keinen Anschluss an das Vorhergehende. Es ist als ob Schrödinger mit dem letzten Satz auf etwas antwortet, oder eine verfrühte Moral zieht, für die der Leser noch nicht bereit ist. Schrödinger sagt die Sachen genau richtig, und genau das, was zu sagen ist, aber er ist nicht freundlich mit dem Leser. Er nimmt ihn nicht an die Hand, um ihn freundschaftlich durch die Gedanken zu führen.

Nun ist er ein bekannter Mann, er kann es sich leisten, die Dinge zu sagen wie sie sind, und abzuwarten, bis er verstanden wird. Aber erstens ging das schief und zweitens: Warum sollte Schrödinger Formulierungen wählen, die so schwierig sind, begriffen zu werden? Man kann meinen, dass Schrödinger schon wusste, was seine Physikerkollegen dazu zu sagen hätten, er wird die Argumente alle schon gehört haben, die am Ende besagen, dass es in der Katzensituation doch beinahe so ist, als wüsste man nur nicht, in welchem Zustand die Katze ist. Beinahe ist aber nicht gut genug. *Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.*

Die Katzensgeschichte wurde weltberühmt, aber die begleitenden unsinnigsten Erklärungen veränderten den Gehalt und die Genesis des Problems bis zur Unkenntlichkeit: Gequälte theoretische Physiker verstehen überhaupt von Anfang an nicht was hier das Problem ist. Da solle doch der Schrödinger erstmal einen Kasten quantenmechanisch beschreiben. Das sei über alle Maßen kompliziert, und solange das nicht richtig gemacht wird, gibt es keinen Kasten und auch keine Katze und erst recht kein Problem. Das Problem sei also eines der unerlaubten Vereinfachung eines komplexen Sachverhaltes. Offenbar hatte Schrödinger eine klarere Sicht als diese Physiker.

Schrödinger beschreibt mit der Katzensgeschichte das Meßproblem der Quantenmechanik und er benutzt dazu die Prinzipien der Quantenmechanik. Er hätte die Geschichte anders schreiben können, statt Katze einen Apparat oder seinen Freund, dem statt der Blausäure ein Glas voll Whisky, das im Falle des Atom-Zerfalls von einem mechanischen Ober hätte dargeboten werden können. Soviele eingängige Möglichkeiten und Schrödinger wählt eine Katze. Es gibt nämlich auch Physiker, die der Ansicht sind, dass so eine Katze nicht genügend Bewusstsein hat, um selber wahrzunehmen, ob sie nun tot oder lebendig ist. Nein, Schrödinger ist nicht freundlich mit den Physikern. Er sagt seine Sachen und lehnt sich zurück, womöglich grinsend wie die Cheshire cat, denn Schrödinger schrieb den Artikel in Oxford, wo 1832-1898 Charles Lutwidge Dodgson Professor für Mathematik war, der unter dem Pseudonym Lewis Carroll *Alice in wonderland* verfasste.

Nun ist seit dem Erscheinen des Artikels fast ein Jahrhundert vergangen. Das Messproblem ist benannt und bekannt und es findet sich kaum noch jemand, der das nicht wahr haben will.

2 Das Problem der Quantenmechanik

Um es einfach zu machen: Das Problem der Quantentheorie ist dieses. Es gibt nur eine Gleichung und eine Größe, die die Theorie definieren – die Schrödingergleichung und die zugehörige Wellenfunktion – und diese beschreiben nicht die Phänomene. Das ist schnell zu sehen, und das bespreche ich gleich im Abschnitt „Meßproblem“. Das ist auch allen Physikern im Prinzip bekannt und zwar seit Beginn der modernen Quantentheorie, das heißt seit der Findung der Schrödingergleichung im Jahre 1926. Es ist bekannt, aber es wurde lange nicht anerkannt, denn anstatt dieses Faktum abzuhaken, wurde und wird geredet: Das Problem wird wortreich zerredet, indem Glauben gemacht wird, daß die „neue Physik“ eben nicht mehr über das ist, was man naiver Weise meinen könnte der Inhalt jeglicher Physik sei, nämlich zu sagen, was Sache ist. Und im folgenden gehe ich auf diese Reden ein, aber nur zur Unterhaltung, denn das Problem ist klar benannt:

Die Schrödingergleichung und die Wellenfunktion, deren zeitliche Entwicklung sie bestimmt, beschreiben nicht die Phänomene, d.h. entweder ist die Gleichung falsch oder es fehlen weitere Gleichungen für weitere Bestimmungsgrößen des physikalischen Geschehens. Das ist ein Faktum!

3 Was gesagt wurde, worüber Quantenmechanik ist

Quantenmechanik ist über die atomare Materie. Sollte man meinen. Aber fragt man: „Über *was* ist Quantenmechanik?“ und das gelehrte Gegenüber ahnt was man mit der Frage im Schilde führt, antwortet „Über das, was wir (die Beobachter) messen.“ Und das scheint so in Ordnung, denn die atomaren Dinge sind so klein, die kann man nur noch mit Apparaten messen. Ein ungebildeter Interessent an den Naturwissenschaften wird womöglich dennoch fragen: „Aber *was* ist denn das, was gemessen wird? Sind das Teilchen? Was läuft denn da wirklich ab?“ Ein müdes Lächeln des Gebildeten bringt hervor, daß das *eine unwissenschaftliche Frage* sei. Insistierend aber, der Interessent: „Aber woher weiß man dann, daß überhaupt gemessen wird? Woher weiß man, wann etwas eine Messung ist?“ Verstehendes Lächeln des Gebildeten bemüht sich dann zu erklären, daß man dazu ja das physikalische Praktikum mache. Da lerne man, was eine Messung ist.

In der Bohr-Heisenbergschen Formulierung der Quantentheorie – welche von von Neumann mathematisch rigoros formuliert wurde – sind die Begriffe „Beobachter“, „Messung“, „System“, „Apparat“, „Observable“ (d.h. „Meßgröße“) Bestimmungsstücke der Theorie. Sie sind primitive Größen, die nicht weiter erklärt werden können, von denen man sozusagen von Einsicht her „wissen sollte“, was sie bedeuten. Das ist jedoch offener Unsinn. Dennoch mußten Einstein, Schrödinger, Bell u.a., darauf hinzuweisen, daß diese Begriffe eine physikalisch komplexe Natur haben, so daß sie eben nicht zur grundlegenden Formulierung einer Theorie taugen. Das ist ganz einfach zu sehen. Quantentheorie macht ja

nicht halt vor der Größe (\sim Teilchenzahl) eines Systems (für das Quantentheorie gilt), so daß man sich leicht einen Apparat (einen Beobachter) als System denken kann, für das dann Quantentheorie noch gilt, aber wenn Quantentheorie immer noch gilt: Was macht dann einen Beobachter aus? Worüber ist dann Quantenmechanik wirklich?

J.S. Bell [1] gab folgende Liste von schlechten Wörtern zur Theoriebildung:

system
apparatus
environment
microscopic, macroscopic
reversible, irreversible
observable
information
measurement.

Über diese Begriffe ist Quantenmechanik. Wie konnte diese Theorie – als physikalische Theorie – bestehen?

4 Quantenmechanik kann gar nicht schlecht sein

Bell schrieb 1966 über seine Sicht, daß Kopenhagener Quantentheorie als Theorie nicht in Ordnung sei in [2]:

„...We emphasize not only that our view is that of a minority, but also that current interest in such questions is small. The typical physicist feels that they have long been answered, and that he will fully understand just how if ever he can spare twenty minutes to think about it.“

Hier legt also der in Bells Worten typische Physiker seinen Kopf auf das Bohrsche Ruhekkissen. Die Sache ist schon in Ordnung, man hat nur keine Zeit darüber nachzudenken.

Ein gerne zitiertes Argument für die Güte der Quantenmechanik ist dann, daß ihre „Vorhersagen“ mit einer phantastischen Präzision bestätigt werden. Keine andere physikalische Theorie konnte Vergleichbares leisten. Ein weiteres Argument ist, daß der typische Physiker damit problemlos zurecht kommt. Auch weiß der sich im Bedarfsfall zu verteidigen: die Frage nach dem, was wirklich in der physikalischen Welt passiert sei „metaphysikalisch“. Und das ist selbstverständlich nichts Gutes. Bei den meisten ist wohl das folgende Argument am weitesten verbreitet: Wenn irgend etwas mit der Quantenmechanik nicht in Ordnung wäre, dann wäre das ja allgemein bekannt und sie würde nicht mehr so gelehrt werden. Naja.

Ich könnte dies so stehen lassen, unkommentiert, in der Hoffnung, daß diese Argumente sich selbst erledigen, aber das wäre wohl ungerecht denen gegenüber, die wirklich wissen wollen, was ich dazu (außer naja) zu sagen habe. Aber ein

Gegenargument zu geben ist schwierig, man müßte weit ausholen: Warum wird gelehrt, was nicht in Ordnung ist? Physiker hängen sehr an Autoritäten, und Bohr-Heisenberg ist gleich ein Autoritätspaar, das Physik romantisch machte, alles wurde mystisch und unverständlich, zugleich aber auch mit einem enorm schlagkräftigen Formalismus. So kann man sich technisch elegant zu Neuem bewegen, ohne dabei verstehen zu müssen. Das kann reizvoll sein.

Ich hänge auch an Autoritäten und wenn jemand sagt, Einstein habe in seiner speziellen Relativitätstheorie einen Fehler gemacht, dann höre ich nicht mehr hin. Aber bei der Quantenmechanik ist es anders. Da sagt Einstein, daß die Sache nicht in Ordnung ist, und dann sagt irgendeiner, daß Bohr die Debatte mit Einstein gewonnen hat. Warum die weitaus meisten Physiker sich dem Irgendeinen angeschlossen haben, mag mit einem Hang zum Mystizismus verbunden sein, es kann aber Gründe haben, die man erst noch destillieren muss. Am Ende steht auf jeden Fall für mich: Der Quantenformalismus ist hervorragend. Deshalb muss man verstehen was er bedeutet.

5 Das Meßproblem

In der Quantenmechanik wird der *Zustand* eines N -Teilchensystems durch eine komplexe Funktion $\psi(\mathbf{x})$ auf dem Konfigurationsraum \mathbb{R}^{3N} beschrieben. Was bedeutet das? Eine naheliegende Möglichkeit ist, daß mit Teilchen *nicht* Teilchen gemeint sind, denn deren Zustand würde ja *mindestens* durch deren Konfiguration $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{3N}$ zu beschreiben sein, wobei je nach Art der Mechanik sogar noch mehrere Bestimmungsstücke hinzutreten könnten, wie z.B. Impulse in der Newtonschen Mechanik.

Wir diskutieren zuerst diese Möglichkeit, denn sie entspricht auch der Vorstellung, die Schrödinger einmal im Kopf hatte. Teilchen ist danach einfach die Bezeichnung für etwas Stoffliches, das in verschiedenen physikalischen Situationen durch Wellenfunktionen auf verschiedenen dimensionierten Räumen dargestellt wird, durch seltsame „Stofflichkeitsfelder“ also. Nun gehorcht die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion einer *linearen* Wellengleichung (daher der Name Wellenfunktion), der Schrödingergleichung, und dadurch widerspricht das Bild der Stofflichkeitsfelder dem experimentellen Befund. Was nämlich experimentell mit großer Präzision bestätigt wird, ist die Bornsche statistische Interpretation der Wellenfunktion. Danach kann mit Kenntnis der Wellenfunktion eines Systems die empirische Verteilung ρ der „Ortskoordinaten der Teilchen“ bei einer „Ortsmeßreihe“ vorausgesagt werden. $\rho(\mathbf{x}) = |\psi|^2(\mathbf{x})$ ist nämlich die Wahrscheinlichkeitsdichte, die „Teilchenkonfiguration“ bei \mathbf{x} zu finden. (Man beachte, daß auf Grund der Linearität die „Normierung“ der Wellenfunktion frei ist.) Das Meßproblem ergibt sich daraus in vielen Variationen, die einfachste entsteht, wenn der Meßapparat ebenfalls – und damit dann das Gesamtsystem – quantenmechanisch beschrieben wird. Angenommen, ein System wird durch Linearkombinationen von Wellenfunktionen φ_1 und φ_2 beschrieben und ein Apparat kann durch Wechselwirkung mit dem System („Messung“) entweder „ φ_1 “ oder „ φ_2 “ anzeigen. Das heißt, der Apparat hat Zustände Ψ_1 und Ψ_2 (Zeigerstellung „1“

und „2“, das sind also Wellenfunktionen, die im Konfigurationsraum disjunkte Träger haben, also keinen Überlapp) und eine Nullstellung Ψ_0 , so daß

$$\varphi_i \Psi_0 \xrightarrow{\text{Schrödingerentwicklung}} \varphi_i \Psi_i, i = 1, 2. \quad (1)$$

Die zeitliche Entwicklung ist aber linear, so daß (1) für die Systemwellenfunktion

$$\varphi = c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{C}, \quad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1,$$

folgendes ergibt:

$$\varphi \Psi_0 = (c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2) \Psi_0 \xrightarrow{\text{Schrödingerentwicklung}} c_1 \varphi_1 \Psi_1 + c_2 \varphi_2 \Psi_2. \quad (2)$$

Dies ist ein irreales Ergebnis. Es beschreibt eine Verschränkung der Wellenfunktionen von Zeiger und Apparat, so als ob die Zeigerstellungen „1“ und „2“ zugleich da wären. Das ist das Meßproblem.

Experimentell und gemäß der Bornschen statistischen Regel wird man entweder nur „1“ oder nur „2“ finden, und zwar würde bei genügend häufiger Wiederholung des Experimentes die relative Häufigkeit des Auftretens von „1“ $|c_1|^2$ annähern und die von „2“ $|c_2|^2$. Indem wir aber die Bornsche Regel ernstnehmen, brechen wir natürlich mit der Vorstellung von „Stofflichkeitsfeldern“: Die Zeigerteilchenkonfiguration steht mit Wahrscheinlichkeit $|c_1|^2$ auf „1“.

Das ist eine simple Rechnung, in der wir ausnützen, daß Ψ_1 und Ψ_2 örtlich gut getrennten Zeigerstellungen zugeordnet sind, da wo die eine Funktion nicht null ist, ist die andere (fast) null¹: Wenn der Konfigurationsraum des Gesamtsystems die Koordianaten $\mathbf{q} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ besitzt, wobei $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ die System- und $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ die Apparaturkoordinaten sind, ist²

$$\mathbb{P}(\text{Zeiger auf 1}) = \int_{\text{supp } \Psi_1} |c_1 \varphi_1 \Psi_1 + c_2 \varphi_2 \Psi_2|^2 d^m x d^n y^2 \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} &= |c_1|^2 \int_{\text{supp } \Psi_1} |\varphi_1 \Psi_1|^2 d^m x d^n y \\ &+ |c_2|^2 \int_{\text{supp } \Psi_1} |\varphi_2 \Psi_2|^2 d^m x d^n y \\ &+ 2\Re(c_1 c_2 \int_{\text{supp } \Psi_1} (\varphi_1 \Psi_1)^* \varphi_2 \Psi_2) d^m x d^n y \quad (3b) \end{aligned}$$

$$\approx |c_1|^2 \int |\varphi_1 \Psi_1|^2 d^m x d^n y = |c_1|^2. \quad (3c)$$

Zu beachten ist, daß auch wegen der Disjunktheit der Träger der Zeigerwellenfunktionen der Realteil (3b) null ist. In dieser Betrachtungsweise fehlt also die Beschreibung des Realzustandes des Zeigers, wenn der aus Teilchen besteht, dann fehlen zumindest die Teilchenorte.

¹supp Ψ ist der Träger der Funktion Ψ , also der Bereich, wo sie nicht null ist.

²* indiziert die komplexe Konjugation

Nun geschah Folgendes: um weiterhin ohne die Vorstellung von tatsächlichen Teilchenkonfigurationen auskommen zu können, schließen Bohr, Heisenberg und von Neumann an die Schrödingersche zeitliche Entwicklung eine zufällige Dynamik an, die die Gesamtwellenfunktion (rechte Seite von (2)) mit Wahrscheinlichkeit $|c_i|^2$ auf den Zustand $\varphi_i\Psi_i$ kollabiert. Das Meßproblem bekommt in dieser Vorstellung die Gestalt, daß der physikalische Ablauf des Kollabierens nicht in der Theorie enthalten ist, d.h., daß die zugehörigen Gleichungen noch ausstehen. Das können entweder Gleichungen für die Teilchenorte sein (die dann womöglich einen Kollaps unnötig machen) oder, wenn man an der Idee von Stofflichkeitsfeldern festhalten möchte, eine neue Wellengleichung, die entsprechend den Kollaps beinhaltet: Die Theorie von Ghirardi, Rimini und Weber [4] basiert auf einer solchen Gleichung, ist also eine Quantentheorie, in welcher der Kollaps physikalischen Gesetzen unterliegt und damit Teil der Theorie ist.

In der Bohr-Heisenberg-von Neumann-Version offenbart sich das Meßproblem also dadurch, daß der Kollaps eine ausführende Eigenschaft des „Beobachters“ ist. Es ist genau diese Rolle, die der „Beobachter“ zu übernehmen hat, ja warum er überhaupt eingeführt wird. Wenn der „Beobachter“ „mißt“, wird die Wellenfunktion „kollabiert“. Was – und das ist das Problem – unterscheidet aber einen „Beobachter“ von einem Zeiger eines Apparates oder von dem Ausdruck des Meßwertes auf einem Stück Papier? Oder von einer verrückten Grinse - Katze? Noch einmal Bell, aus dem überaus wichtigen Artikel „Against ‚measurement‘“:

„It would seem that the theory is exclusively concerned about ‚results of measurement‘, and has nothing to say about anything else. What exactly qualifies some physical systems to play the role of ‚measurer‘? Was the wavefunction of the world waiting to jump for thousands of years until a single-celled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system...with a Ph.D.? If the theory is to apply to anything but highly idealized laboratory operations, are we not obliged to admit that more or less ‚measurement-like‘ processes are going on more or less all the time, more or less everywhere? Do we not have jumping then all the time?“

War für den typischen Physiker Schrödingers Katze nicht groß genug („vielleicht ist der Zeiger ja in einer Superposition der von links- und rechts-zeigend, und wird erst definitiv durch unser Hinschauen“), so ist das Universum als Katzenersatz unschlagbar. Das Meßproblem wird unausweichlich in der Quantenkosmologie oder Quantengravitation. Will man die Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall (vor $\sim 10^{10}$ Jahren) beschreiben – braucht man eine Quantentheorie *ohne* „Beobachter“. Das ist keine Laborphysik mehr. Es wird hier ganz praktisch offenbar, daß man über etwas anderes als Beobachter reden muss [3, 6, 7]. Die physikalische Frage kann nun wieder ohne Schamesröte gefragt werden: Was passiert wirklich?

6 Keine Interferenz – kein Meßproblem?

Wir kommen nun zum häufigsten Lösungsversuchs des Schrödingerschen Katzenproblems, auf den Schrödinger bereits geantwortet hat.

Folgendes ist am weitesten verbreitet: Schrödingers Katze sei deswegen entweder tot oder lebendig, weil die *Interferenz* der „tote-Katze-Welle“ mit der „lebendige-Katze-Welle“ praktisch nicht möglich ist. Weitergehend: Der Kollaps ist eigentlich gar kein Problem, weil man ihn nämlich gar nicht braucht. Die praktische Unmöglichkeit der Interferenz bringt alles in Ordnung. Dann können wir praktisch nämlich nicht mehr ein *und* von einem *oder* unterscheiden. Die Überlagerung der toten und lebendigen Katze sei dann beinahe so, als wenn sie entweder tot oder lebendig sei, weil man die ja nicht mehr interferieren könne. Schrödinger habe also übersehen, dass die Interferenz praktisch gar nicht mehr möglich ist, so als wäre Schrödinger ein bisschen trottelig, (ähnlich wie man Einstein eine gewisse Engstirnigkeit des Alters nachsagte, weil er an seinem Grundprinzip festhielt, dass Physik über anderes als Beobachtung ist). Was soll man dazu sagen? *Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.*

7 Totales Durcheinander

Schrödingers Katzenproblem löste jeder Physiker für sich insgeheim auf, jeder hatte seine eigene Welt. Es gibt die Vorstellung, daß erst der menschliche Beobachter die Katze aus ihrem Überlagerungszustand holt, es gibt die Ansicht, daß es es keinen Überlagerungszustand gibt, weil die Interferenz der überlagernden Zustände nicht mehr möglich ist (das ist wohl die dümmste Argumentation), es gibt das Kopf in den Sand stecken: Die Frage, in welchem Zustand die Katze wirklich ist sei eine unwissenschaftliche Frage. In diese Sparte gehören auch die Informationsleute. Die Wellenfunktion drückt unseren Informationsstand aus, und der ist alles was *ist*. Da fehlen mir die Worte.

Auf höherer Ebene stimmten fast alle überein, daß die Wellenfunktion kein physikalisches Feld sein könnte (in Bohmscher Mechanik ist es das), denn physikalische Felder lebten auf dem physikalischen Raum, nicht dem Konfigurationsraum! Das wäre jedoch bestenfalls Definitionssache, warum sollte man eine solche Definition geben? Einstein hatte etwas gegen die Wellenfunktion als physikalisches Feld, weil es eine nichtlokale Wirkung bedeutet (Geisterfelder nannte er das). Obwohl in der Ablehnung Gemeinsamkeit bestand, herrschte in den Schlußfolgerungen Uneinigkeit. Für die meisten Physiker war die Wellenfunktion alles, für Einstein war sie nur eine phänomenologische Größe. Inzwischen wissen wir, dass Einstein irrte: Die Wellenfunktion ist ein physikalisches Feld und die Geisterwirkung ein Faktum der Natur. Aber das ist eine andere neue Geschichte. Und wir wissen, dass die Wellenfunktion, wenn sie alles beschreiben soll, nicht der Schrödingergleichung gehorchen kann.

Was bleibt sind fast ein Jahrhundert an Verwirrung über die Frage worüber

Physik eigentlich ist. Da ist es für einen Physiker wie Schrödinger vielleicht tatsächlich am besten man sagt seine Sache ein für allemal, lehnt sich zurück und grinst.

Literatur

- [1] Bell J. S., *Physics World* , **3**, 33 (1990)
- [2] Bell J. S., *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993,
- [3] Gell-Mann M., *Das Quark und der Jaguar*, Piper, München Zürich 1994.
- [4] Ghirardi G. C., Rimini A. und Weber T., *Phys. Rev. D***34** , 470 (1986). Bell J. S., *Are there Quantum Jumps?*, in: [2].
- [5] Goldstein S., *Quantum Theory without Observers I, II*, *Physics Today*, März und April 1998
- [6] t'Hooft G., *In search of the ultimate building blocks*, Cambridge 1997.
- [7] Gell-Mann M. und Hartle J. B., in: W. Zurek (Hg.), *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, Reading 1990, S. 425.