

John Archibald Wheeler

Die Experimente der verzögerten Entscheidung und der Dialog zwischen Bohr und Einstein

Das Quantenprinzip und das Universum

Das Quantenprinzip, das umwälzendste und seltsamste aller Grundsätze der Wissenschaft, enthüllt nur langsam seine rätselhaften Züge. Es führt zu immer tieferen Fragen über das Verhältnis von Mensch und Universum. Nirgendwo ist das Erstaunliche an diesem Problem deutlicher zu sehen als in dem 30 Jahre währenden Gespräch zwischen Niels Bohr und Albert Einstein. Nirgendwo begegnet man tieferen Fragen als bei den Experimenten der verzögerten Entscheidung.

Das Laplace'sche Bild des Universums als einer riesigen Maschine, die ihrem deterministischen Lauf durch starre Gesetze und im Augenblick der Entstehung vorgegebene Anfangsbedingungen unaufhaltsam folgt, ist schwer erschüttert. Der Beobachter spielt über sein Meßgerät eine unausweichliche Rolle im tatsächlichen Geschehen. Die mechanistisch-deterministische Tradition der Physik liefert kein adäquates Verständnis dieser neuen Situation. Mehr als je zuvor bedarf die Physik der Philosophie im weitesten Sinne für Hilfe und Leitung. Jeder, der um die tiefen Einsichten der Denker der Vergangenheit zum Problem der Erkenntnis weiß, wird sich von diesen Fragen angesprochen fühlen.

Rutherford als früher Beobachter individualistischer Quantenphänomene

Lord Rutherford war Präsident der ‚Royal Society‘ als im September 1934 diese Gesellschaft einen Abendempfang für die Teilnehmer der historischen Internationalen Physiker-Konferenz in London gab. Vom Standpunkt eines damals 23jährigen aus gesehen, war Rutherford eine unvergeßliche und beeindruckende Gestalt. Erst Jahre später begann der damalige Beobachter zu verstehen, daß der große Pionier des Atomkerns unwissentlich auch ein Pionier der Quantenphysik gewesen ist. Im gleichen Jahre, 1900 nämlich, in dem Max Planck¹, der in Berlin arbeitete, das Quantenprinzip entdeckte, jenes Geheimnis und jene Leitidee der Physik des 20. Jahrhunderts, erkannte Rutherford, daß das individuelle Ereignis einer radioaktiven Umwandlung eines Atoms vom Zufall beherrscht ist.²

1. M. Planck: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, S. 237-245 (1900).

2. E. Rutherford: „Induced radioactivity“, Philosophical Magazine 49, S. 161-192 (1900); E. Rutherford and D. Soddy: „The radioactivity of thorium compounds: I. Investigation of the radio-“

Den meisten von uns ist es nicht beschieden, im Leben auch nur einen individuellen Quanteneffekt zu beobachten. Einige unserer Freunde suchen nach Uranerz, indem sie einen Geigerzähler über das Gelände bewegen und nach den bekannten Klicks lauschen. Astronomen, ausgestattet mit Photovervielfachern, die am richtigen Punkt in der Brennebene eines Teleskopes postiert sind, sammeln die seltenen zufälligen Photonen, ein Lichtquantum nach dem anderen, die eine ferne extrem schwache Galaxis ausgesandt hat.

Für jemanden, der es vorher noch nicht gesehen hat, ist es eine erstaunliche Sache zu beobachten, wie sich der Zufall in der Welt des Kleinen manifestiert. Wer vor Rutherford hat dies aufgezeigt? Was braucht man dazu? Zuerst ein Auge. Setzen wir uns eine halbe Stunde ins Dunkle und besorgen uns eine kleine radioaktive Quelle, am besten in der Form eines leuchtenden Uhrzeigers. Eine Glasplatte, die mit etwas Zinksulfid bestrichen ist, sendet einen Lichtblitz aus, wenn sie von einem Alpha-Teilchen der radioaktiven Quelle getroffen wurde. Beobachten wir die Blitze, so erhalten wir sofort einen Eindruck, daß die Alpha-Teilchen zufällig ausgesandt werden, sowohl in bezug auf die Emissionsrichtung als auch in bezug auf die Ankunftszeit.

Rutherford war es somit, der, wie sich Einstein später ausdrückte, ‚Gott beim Würfeln‘ ertappte.

Planck entdeckte das Wirkungsquantum, ohne zu sehen, daß es Zufall bedeutete. Rutherford entdeckte den Zufall, ohne zu sehen, daß damit das Wirkungsquantum involviert war.

Columbus machte eine Entdeckung. Es dauerte Jahrzehnte um zu verstehen, was er entdeckt hatte. Planck entdeckte, daß die Energie in unteilbaren Einheiten oder Quanten paketiert ist. Die Bedeutung der ‚Quanten‘ verstehen wir heute noch kaum. Keineswegs sollte man sich den Weg für ein tieferes Verständnis durch eine voreilige Definition der ‚Quanten‘ verstellen.

Bohr und Einstein als Führer zur Quantenwelt

Es bedurfte eines großen Teils dieses Jahrhunderts um zu verstehen, wie eng die Verbindung zwischen der Quantenwelt und dem Zufall ist. Eine große Zahl von bedeutenden Männern war hierzu notwendig, unter ihnen Albert Einstein, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und Paul Dirac. Niemand hat mehr getan als Bohr und Einstein, um uns zum Kern der Quantenwelt zu führen.

Das Treffen des 34jährigen Niels Bohr mit dem 41jährigen Albert Einstein im Frühjahr 1920 war der Beginn einer lebenslangen Freundschaft. Nach dem Treffen schrieb Einstein an Bohr „Ich studiere Ihre großartigen Arbeiten und wenn ich dabei von etwas besonders gefesselt werde, habe ich nun das Vergnügen Ihr freundliches junges Gesicht vor mir zu sehen, das mir alles erklärt.“³ Bohr sprach ebenfalls mehrfach von seiner Hochachtung und

active emanation“, *Journal of the Chemical Society (London)* 81, S. 321-350 (1902); „II. The cause and nature of radioactivity“, *ibid.* S. 837-860 (1902).

3. A. Einstein, Letter of May, 2. 1920, nach der Begegnung mit Bohr.

Freundschaft für Einstein. Im Sammelband für Einsteins 70. Geburtstag⁴ begann Bohrs Beitrag⁵ damit, daß er sich darauf bezieht „was unsere gesamte Generation der Führung seines (Einsteins) Genies verdankt“. Anschließend gab er seine heute noch unübertroffene Darstellung seines großen Dialoges mit Einstein über die Bedeutung der Quantentheorie.

Auf Dialoggrundlage geführt war die Debatte freundlich, jedoch tödlich ernst. Sie gehört zu den großen dramatischen Begegnungen in der Geschichte der Physik.⁶

Der Gegenstand der Auseinandersetzung war die Kausalität. Kein mögliches Stück Information erlaubt uns, die Emissionsrichtung oder Ankunftszeit des nächsten Teilchens von einem radioaktiven Uhrzeiger vorauszusagen. In diesem Sinn ist das Band zwischen Gegenwart und Zukunft zerschnitten. Ist dieses Verlassen der Kausalität bei der Beschreibung des atomaren Prozesses eine zwischenzeitliche Ersatzlösung — Einsteins Position — oder bedeutet es eine neue Sicht der Natur — Bohrs Meinung?

Das Ergebnis läßt sich durch ein Wort andeuten. Einsteins Zögern, die Kausalität zu verlassen, zwang Bohr dazu, den Term „Phänomen“ ins Gespräch zu bringen.⁷ Nur so konnte er die Lektion der Quantenmechanik verdeutlichen; in modernen Worten: „Kein elementares Phänomen ist ein Phänomen, ehe es nicht ein gemessenes (beobachtetes) Phänomen geworden ist“.⁸ Das ist auch heute noch das Kernstück. In einem Experiment der verzögerten Entscheidung entdeckt man, daß eine Wahl, die jetzt und hier getroffen wurde, unausweichliche Konsequenzen hat für das, was man rechtens über das sagen kann, was schon längst in den frühesten Tagen der Universums passiert ist, lange ehe die Erde existierte.

Das unerwartete Eindringen des Quantenprinzips in die Welt der Physik

Die Inseln von Hawaii, ein Garten der Welt, sind aus fruchtbarer Vulkanasche und zersetzter Lava aufgebaut. Wenn wir jedoch die Berge der Insel auf der Karte betrachten und darin einzelne Stadien der Entstehung verfolgen, ahnen wir indirekt das Feuer, das dies in vielen

4. P.A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (Library of Living Philosophers. Evanston, Ill., 1949).

5. N. Bohr: „Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics“. S. 201-241 in P.A. Schilpp, ed., *op. cit.*

6. Man vergleiche dazu die zwei einschlägigen Kapitel in M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley, New York, 1974); und A. Pais, „Subtle is the Lord ...“: *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, New York 1982), Teil VI.

7. Eine vorläufige Darstellung der Entwicklungsstadien von Bohrs Gebrauch dieses Terms findet sich in A. Petersen, *Quantum Mechanics and the Philosophical Tradition* (M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1968).

8. Formulierung des Autors in „Beyond the black holes“ in: H. Woolf, ed., *Some strangeness in the proportion: A Centennial Symposium in Celebrate the Achievements of Albert Einstein* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980), S. 341-375.

Eruptionen hervorbrachte. Auch heute schwankt die Erdkruste noch oft, spuckt Feuer und Rauch aus und bedroht die Bewohner.

Ebenso hat die Quantentheorie als feurige schöpferische Kraft der modernen Physik einen revolutionären Umbruch nach dem anderen hervorgebracht und es kann leicht sein, daß die größte Umwälzung noch kommen wird.

Der Umbruch von 1900, eingeleitet von Max Planck¹, lehrte uns, daß die Energie nur in unteilbaren Quanten existiert. Deutsche Freunde erzählten uns von der Rationierung während des Krieges, von Butter- und Brot-Quanten, die man mit den Lebensmittelmarken mit Mühe bekommen konnte. Die Ausdruckskraft des deutschen Wortes ist im Englischen nicht so gut durch das elegante Wort „Quantum“ als viel mehr durch den kernigen Begriff des „Brockens“ eingefangen. Energie gibt es nur brockenweise. Genauer gesagt, elektromagnetische Energie, eingesperrt in eine Schachtel, existiert in Brocken. Das war Plancks Entdeckung.

1905 kam der zweite Umbruch. Einstein⁹ erkannte, daß die Aufteilung der Lichtenergie in Stücke sowohl für Licht gilt, das aus einem Loch einer erhitzten Schachtel kommt wie aus irgendeiner anderen Quelle, ebenso aber auch für eingesperrte Strahlung gilt (Abb. 1).

Ort und Zeit der Ankunft eines einzelnen Quantums elektromagnetischer Energie – oder eines ‚Photons‘ wie der große amerikanische Chemiker Gilbert N. Lewis es später nannte – sind rein zufällig. Der Einstein, der in seinem späteren Leben so vehement dafür argumentierte, daß ‚Gott nicht würfelt‘, deutlicher noch als Rutherford und Soddy² es taten, lehrte die Welt, daß „Gott in der Tat würfelt“.

1913 kam der dritte Umbruch. Bohr fand, daß das Atom durch „stationäre Zustände der Bewegung“ charakterisiert ist und daß der Unterschied zwischen zwei solchen Zuständen gerade ein Lichtquant ausmacht.¹⁰

1916 hatte Einstein die Sprünge des Bohrschen Elektrons und Rutherfords teilchenausendenden Kern mit statistischen Gesetzen erfaßt.¹¹ Noch einmal veränderte sich die Situation mit dem Auftauchen der Wellenmechanik. Louis de Broglie entdeckte 1923 die Wellennatur des Elektrons.¹² Werner Heisenberg fand 1925 die Mechanik dieser Wellen, die sich formal eng an die Newtonsche Mechanik anschließt¹³ und Erwin Schrödinger gab 1926 die mathematische Beschreibung der Wellen.¹⁴

9. A. Einstein, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, Annalen der Physik 17, S. 132-148 (1905).

10. N. Bohr, „Constitution of atoms and molecules“, Philosophical Magazine 26, S. 1-15 (1913).

11. A. Einstein, „Strahlungs-emission und -absorption nach der Quantentheorie“, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18, S. 318-323 (1916); „Quantentheorie der Strahlung“, Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft, Zürich 16, S. 47-62 (1916).

12. L. de Broglie, „Les ondes et les quanta“, Académie des Sciences Paris, Comptes Rend. 177, S. 507-510 (1923); „Les quanta de lumière, la diffraction, et l'interférence“, ibid., S. 548-550; „Les quanta, la théorie cinétique des gases, et le principe de Fermat“, ibid., S. 630-632.

13. W. Heisenberg, „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“, Zeitschrift für Physik 33, S. 879-892 (1925).

14. E. Schrödinger, „Quantisierung als Eigenwertproblem“, Ann. der Physik 79, S. 361-376 (1926).

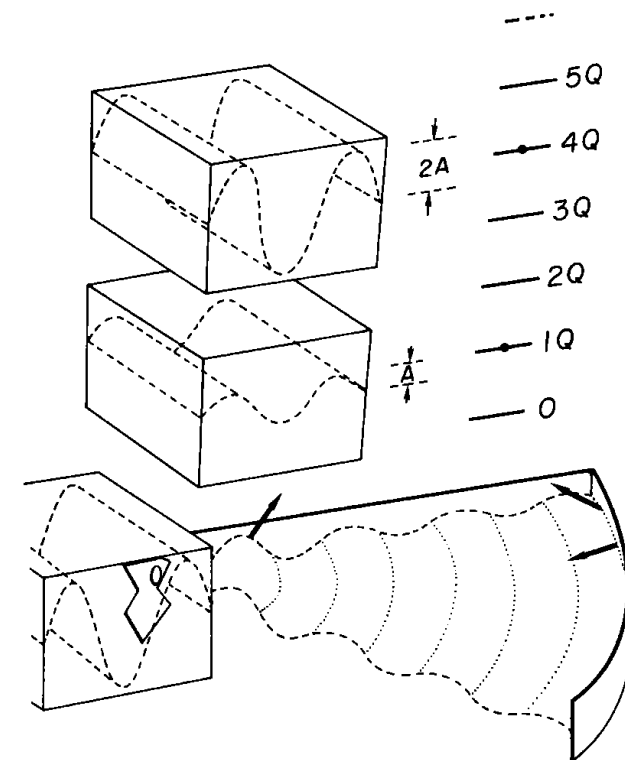


Abb. 1: Der Schritt von Planck (1900; gefangene Energie ist gequantelt) zu Einstein (1905; auch reisende Energie ist gequantelt), symbolisch dargestellt. Obere 2 Diagramme: Schematische Wiedergabe einer elektromagnetischen Welle, die durch die Wände einer aufgeheizten Schachtel erzeugt und festgehalten wird (schwarzer Hohlraum). Diese eine ‚stehende‘ Lichtwelle hat die doppelte Amplitude und die 4fache Energie der anderen. Planck zeigte, daß die zeitliche Änderung der Energie in dem Maße erfolgt, wie die Lichtwelle mit der Wand des schwarzen Hohlraumes Energie austauscht. Diese Energieänderungen erfolgen immer in ganzen Vielfachen der Grundeinheit des Energiequantums Q (je nach der Frequenz der in Frage stehenden Welle). Unteres Diagramm: Das Licht einer bestimmten Frequenz entkommt einem Loch der erhitzten Schachtel und breitet sich immer weiter aus. Obwohl die Welle an Intensität und Amplitude mit wachsender Entfernung abnimmt, gibt sie an ein Elektron in jeder Distanz die Standardmenge von Energie, nämlich Q ab. Wo das Lichtquantum ein Stück Materie trifft, ist reiner Zufall: „Gott würfelt eben“.

Uneinigkeit über die Rolle des Beobachters

So weit gingen Bohr und Einstein den gleichen Weg. Im folgenden entdeckten jedoch Bohr und Heisenberg, daß man zwar den Ort eines Elektrons oder dessen Impuls bestimmen kann, aber nicht beide Größen auf einmal. Welche dynamische Variable gewählt wird, muß durch die Wahl des Beobachtungsgerätes festgelegt werden.

Die Unbestimmtheit wurde von Heisenberg 1927¹⁵ entdeckt und in Form der ‚Komplementarität‘ von Bohr in Como im gleichen Jahr¹⁶ begrifflich fixiert. Die Erforschung eines Aspektes der Natur (z.B. des Ortes eines Elektrons) hindert einen daran, zur selben Zeit den komplementären Zug (in diesem Fall den Impuls des Elektrons) zu ermitteln, welcher aber in einem anderen Zusammenhang unverzichtbar für die Naturbeschreibung ist.¹⁷ In dieser Zeit besuchte Schrödinger Kopenhagen und als er von den neuen Ideen zur ‚Unbestimmtheit‘ und ‚Komplementarität‘ hörte, äußerte er sich dazu: „Wenn ich gewußt hätte, daß meine Arbeiten Anlaß für diese Herumspringerei geben würden, hätte ich mich nie damit befaßt.“ Bohr antwortete darauf, daß seine Gruppe froh sei, daß Schrödinger seine Pionierleistung vollbracht habe und daß er hoffe, Schrödinger noch mit den neuen Ideen zu versöhnen. Einstein jedenfalls konnte sich nicht mit der neuen Situation abfinden. Das war der Beginn des großen Dialoges.

Am Anfang versuchte Einstein die logische Widersprüchlichkeit der Quantentheorie zu zeigen, aber Bohr wendete all seine Gedankenexperimente als Beispiele für die innere Konsistenz der Theorie. Nur so ist es verständlich, daß die Quantentheorie heute die Grundlage für das Verständnis aller Naturobjekte ist, vom Elementarteilchen bis zum Aufbau der Kerne, von der Struktur des Siliziums bis zur Supraleitung von kaltem Blei.

In der zweiten Phase des Dialoges, der in Europa begann, aber sich in Amerika fortsetzte und zwar von Einsteins Ankunft in Princeton (Oktober 1933) bis zu seinem Tod (April 1955), versuchte Einstein nachzuweisen, daß die Quantentheorie unvereinbar mit jeder nur denkbaren vernünftigen Vorstellung von Realität¹⁸ sei, weil das, was tatsächlich geschieht davon abhängt, was dem Beobachter zu messen beliebt. Bohrs Reaktion kann leicht zusammengefaßt werden:¹⁹ Euer Realitätsbegriff ist einfach zu eingeschränkt.

15. W. Heisenberg, „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, Zeitschrift für Physik 43, S. 172-198 (1927).

16. N. Bohr, „The quantum postulate and the recent development of atomic theory“, Vortrag bei der Hundertjahrfeier für A. Volta in Como am 16. Sept. 1927, publiziert in Nature (London) 121, S. 580-590 (1928); wiederabgedruckt in N. Bohr, Atomic Theory and the Description of Nature (Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1934), S. 52-91.

17. Diese Formulierung lehnt sich an Bohrs Ausdrucksweise in ‚Atomic Theory and the Description of Nature‘ an, *ibid.*, S. 35.

18. A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?“ Physical Review 47, S. 777-780 (1935).

19. N. Bohr, „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?“ Physical Review 48, S. 696-702 (1935).

Die Strahlenspaltung

Das einfachste idealisierte Experiment, bei dem man den Diskussionspunkt der beiden Kontrahenten leicht einsehen kann, ist die Strahlenspaltung (Abb. 2).

Setzt man den halbversilberten Spiegel in die Experimentalanordnung ein, registriert der Photodetektor (im Bild unten rechts) Klick nach Klick die einlaufenden Photonen, der andere Zähler registriert jedoch nichts. Dies stützt die Annahme der Interferenz der Strahlen 4a und 4b; in der Photonsprache, es stützt, daß jedes ankommende Lichtquant über beide Wege, A und B gelaufen ist. Einstein meinte, daß man an solchen Experimenten²⁰ sieht, wie unglaublich es ist, daß ein einziges Photon gleichzeitig auf zwei Wegen gelaufen ist. Entfernt man den halbversilberten Spiegel (im Bild unten links), findet man, daß der eine oder andere Zähler anspricht. Danach hat das Photon sich nur über *einen* Weg bewegt. Es reist auf einem Weg, aber dennoch auf zwei Wegen; es reist auf beiden Wegen, aber es reist nur auf einem Weg. Welch ein Unsinn. Die Quantentheorie muß doch widersprüchlich sein!

Bohr betonte, daß hier kein Widerspruch vorliegt. Es handelt sich einfach um zwei verschiedene Experimente. Im Fall, da der Spiegel fehlt, können wir den Weg bestimmen. Ist der Spiegel eingesetzt, müssen wir annehmen, daß das Photon über beide Wege lief. Man kann nicht beide Experimente auf einmal machen. Man kann einen Zug der Natur studieren, aber auch sein komplementäres Gegenstück, jedoch nicht beide zugleich. Die Wahl der Meßanordnung hat einen unwiderruflichen Einfluß auf das Meßergebnis.

Das Experiment der verzögerten Entscheidung

Heutzutage kann man den springenden Punkt durch die Experimente der verzögerten Entscheidung deutlicher herausstellen.²¹ Hier wird die Entscheidung, ob der letzte halbversilberte Spiegel in die Experimentalanordnung eingesetzt wird oder nicht, bis zur letzten Picosekunde verschoben, auf einen Zeitpunkt, zu dem das Photon seinen Weg längst beendet hat. So gesehen, haben wir es mit einer seltsamen Umkehr der Zeitordnung zu tun. Durch Einsetzen oder Weglassen des Spiegels können wir in die Vergangenheit des Photons eingreifen.

Phänomen

Die Abhängigkeit des Beobachtungsergebnisses von der Wahl der Experimentalanordnung störte Einstein, denn es steht mit der Auffassung von der objektiven bewußtseinsunabhän-

20. Beim Bohr-Einstein-Dialog wurde mehr der Zweispalt-Versuch verwendet als die Strahlenspaltung der Abb. 2. Die letztere läßt jedoch den zentralen Streitpunkt besser heraustreten, ohne auf die Physik der Interferenzmuster eingehen zu müssen.

21. J.A. Wheeler, „The ‚past‘ and the ‚delayed-choice‘ double-slit experiment“, in A.R. Marlow, ed., Mathematical Foundations of Quantum Theory (Academic Press, New York, 1978), S. 9-48.

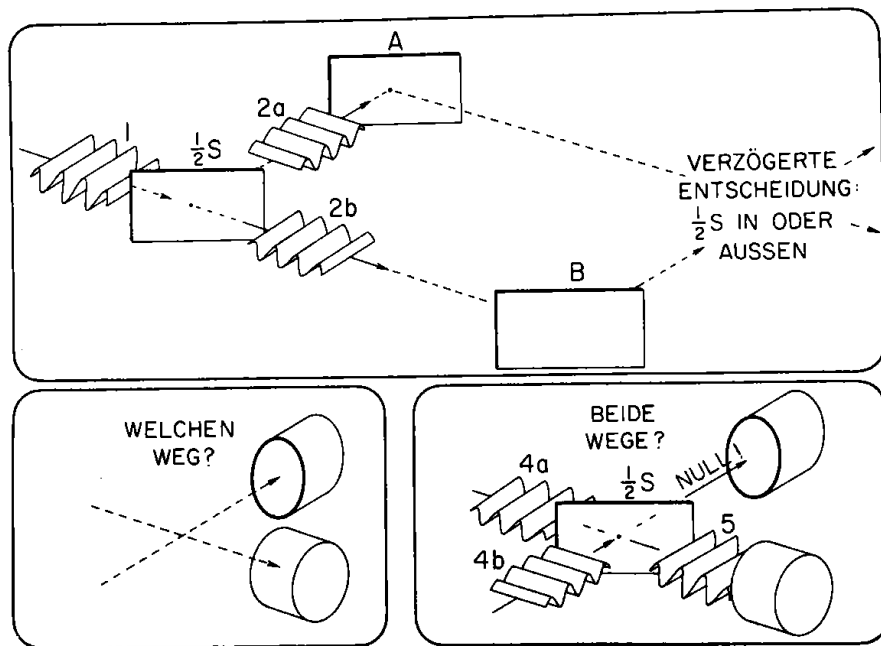


Abb. 2: Strahlaufspaltung (oben) und ihre Verwendung in einem Experiment der verzögerten Entscheidung. Eine elektromagnetische Welle läuft bei 1 ein und begegnet dem halbversilberten Spiegel, bezeichnet mit $\frac{1}{2}S$, der die Welle in 2 Strahlen, 2a und 2b, mit gleicher Intensität aufspaltet. Diese beiden Strahlen werden von zwei Spiegeln, A und B, wieder in den rechten Kreuzungspunkt reflektiert. 2 Zähler (unten links), die hinter dem Kreuzungspunkt stehen, zeigen an, welchen Weg das Photon genommen hat. Bei der anderen Anordnung (unten rechts) wird ein halbversilberter Spiegel am Kreuzungspunkt eingesetzt. Auf der einen Seite bringt er die Strahlen 4a und 4b in destruktive Interferenz, so daß der Zähler auf dieser Seite niemals etwas registriert. Auf der anderen Seite werden die Strahlen zur konstruktiven Interferenz gebracht und bilden so einen Strahl 5 der ursprünglichen Stärke 1. Jedes Photon, das in 1 vorhanden ist, wird im 2. Zähler registriert, wenn die Spiegel ideal sind und der Photodetektor einen Wirkungsgrad von 100 % zeigt. Mit der Anordnung unten links findet man heraus, *welchen* Weg das Photon genommen hat. In der anderen Anordnung unten rechts zeigt sich, daß das Photon über beide Wege kam. Bei der verzögerten Entscheidungsversion des Experimentes entscheidet man das Einsetzen oder Weglassen des halbversilberten Spiegels erst in letzter Minute. Dadurch bestimmt man, ob das Photon seinen Weg über eine oder über beide Routen genommen hat und zwar zu einem Zeitpunkt, wo seine Reise *längst abgeschlossen* ist. So versteht man, daß niemals die eine oder andere Ausdrucksweise („beide Wege“ bzw. „welcher Weg“) gestattet ist. Im Gegenteil, man muß von einem Elementarphänomen sprechen, das gar kein Phänomen ist, ehe es nicht durch einen nicht umkehrbaren Akt der Verstärkung zum Abschluß gebracht worden ist.

gigen Struktur der Welt im Widerspruch. Bohr hingegen begrüßte die Abhängigkeit von der Experimentalsituation als einen neuen Zug der Welt, der uns zu einem tieferen Verständnis der Natur führt. Um Einstein den Kern seiner Auffassung zu explizieren, verwendete Bohr den Ausdruck ‚Phänomen‘²¹. Heute kann man Bohrs und der Quantentheorie zentralen Punkt in dem einfachen Satz fassen: „Kein elementares Phänomen ist ein Phänomen ehe es nicht ein registriertes (beobachtetes) Phänomen geworden ist“²² Es ist falsch, vom ‚Weg‘ des Photons beim Strahlaufspaltungsexperiment zu sprechen. Das Photon ist keine greifbare Entität, die man auf ihrem Flug zu jedem Zeitpunkt verfolgen kann.

Ein Phänomen existiert erst, wenn es in einem irreversiblen Akt der Verstärkung, wie dem Schwärzen eines Kornes Silberbromid oder dem Auslösen eines Photodetektors, manifestiert worden ist.²² Einfacher gesagt, die Natur ist auf der Quantenebene keine Maschine, die unaufhaltsam ihren Weg geht. Die Antwort, die wir erhalten, hängt von der Frage ab, die wir stellen, dem Experiment und der Registrierung, die wir wählen. Wir sind unausweichlich in die Tatsachen mit verstrickt.²³

Die Beobachter-Teilnahme heute

Die meisten Anwendungen der Quantentheorie handeln von den stationären Zuständen der Elementarteilchen, Atomkerne, Atome, Moleküle und größeren Systeme und von den Stößen der Quantensysteme untereinander. Erst in jüngster Zeit ist man zu dem zentralen Punkt der Bohr-Einstein Kontroverse zurückgekehrt, dem elementaren Quantenphänomen, dem Meßprozeß und dem seltsamen Einfluß des Registriergerätes beim Entstehen der Tatsachen. Wie kann man über Indeterminismus, Komplementarität und Phänomene nachdenken, ohne sich an die Worte von Gertrud Stein über moderne Kunst zu erinnern? „Es schaut seltsam aus, seltsam und nochmals seltsam; und plötzlich sieht es gar nicht mehr seltsam aus und man versteht nicht, warum es am Anfang so seltsam war“. Viele Forscher sind der Meinung, daß die größten Einsichten aus den seltsamsten Zügen der Natur zu gewinnen sind, versuchen in vielen Untersuchungen, dem Wesen der eigenartigen ‚Beobachter-Teilnahme‘ der Quantenmechanik auf die Spur zu kommen.²⁴

22. Zum Begriff des ‚Abschlusses durch einen irreversiblen Verstärkervorgang‘ vgl. N. Bohr: *Atomic Physics and Human Knowledge*, (Wiley, New York, 1958).

23. Die Veranschaulichung dieser Idee ist durch das Party-Spiel der 20 Fragen in der „Überraschungsversion“ gegeben; der Leser findet es in dem Aufsatz des Autors „Beyond the black hole“, in: H. Woolf (ed.), *Some Strangeness in the Proportions: An Einstein Centenary Celebration* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980).

24. Siehe z.B. J.A. Wheeler und W.H. Zurek, eds., *Quantum Theory and Measurement* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1983).

Viele Quanten und ein Quantum

Wie unterscheidet sich die Aussage der Quantenmechanik von dem Prinzip Berkeleys „Esse est percipi“²⁵ Existiert der Baum im Wald noch, wenn ihn keiner mehr sieht? Unterscheiden sich die Auffassungen Bohrs und Berkeleys bezüglich der Rolle des Beobachters? Ja, in einer wesentlichen Hinsicht. Bohr spricht von einem individuellen Quantenprozeß. Berkeley — wie jeder von uns im Alltag — redet über vielfältige Quantenvorgänge.

In Gedanken über den Unterschied zwischen dem individuellen Quantenphänomen und dem Baum, der unbeobachtet im Wald fällt, wandern wir durch eine Kunstgalerie, um unser Lieblingsbild zu sehen. Wir kommen an dem Gemälde „Impressionen“ vorbei, das Claude Monet 1863 im Salon des Refusés ausgestellt hat. Von einem winzigen Farbpunkt der Leinwand erreichen 50.000 Photonen/sec. die Pupille unseres Auges, wobei Richtung und Ankunftszeit zufällig sind. Diese Quanten, die die Information übertragen, sind so zahlreich, daß sie den Eindruck einer ständigen Beleuchtung erwecken. Wer von uns beschäftigten Sterblichen hätte Zeit sie zu zählen? Wir verlassen uns stattdessen auf ein einfaches Maß der Intensität, das das Auge an das Gehirn weiterleitet. Bei diesem Maß ist es unangebracht, von einer mittleren quadratischen Abweichung von z.B. 224 relativ zu einer mittleren Zahl von 50.000 Photonen zu sprechen. Man braucht nichts über Quanten zu wissen, um einen Farbfleck zu orten.

Plötzlich geht das Licht aus. Ein Museumswärter mit einer Taschenlampe führt uns zum Ausgang. Unser Auge erhält keine Photonen mehr von den Punkten der Leinwand. Aber ein kurzes Hinfühlen gibt uns Aufschluß, daß sie immer noch da ist. Es würde alle Möglichkeiten des Zählens überschreiten, die 10^{16} atomaren Berührungspunkte zwischen Finger und Bilderrahmen oder die noch viel zahlreicheren Quantenprozesse, die zwischen dem Rahmen und den Fingerspitzen stattfinden, zu erfassen. Ohne eine lange Kette von theoretischen interpretativen Schritten kommen wir zu dem Schluß, daß der Farbfleck immer noch vorhanden ist. Oder war vielleicht der leuchtende Farbfleck eine Täuschung, hervorgerufen durch einen Beleuchtungstrick einer verborgenen Lampe? Auf den ersten Blick wäre es denkbar, aber angesichts des seriösen Museums und der Schwierigkeit eines solchen Unternehmens doch unwahrscheinlich. Im dunklen Ausgang wäre eine Täuschung noch denkbar, aber wenn man alle indirekte Stützung berücksichtigt, ist es anzunehmen, daß das Gemälde mit all seinen Farbflecken noch da hängt.

Wenn wir die Kunsthalle verlassen und wieder über den Baum nachdenken, erkennen wir, daß das Problem sich von dem Fall des Bildes nur in der Größenordnung, aber nicht dem Wesen nach unterscheidet. Den Fall des Baumes können wir immer besser prüfen, wenn wir mit viel Aufwand die Aufschlagstelle, Erdverschiebungen und Schallberichte prüfen. Makroereignisse der Vergangenheit führen zu reichen Folgeerscheinungen in der Gegenwart, egal ob es sich um einen fallenden Baum, ein Gemälde auf der Leinwand oder die Bewegung des Mondes handelt, in jedem Fall ist die Zahl der beteiligten Quanten so

25. G. Berkeley (1685—1783) in M.W. Calkins, ed., Berkeley: Essays, Principles, Dialogs with Selections from Other Writings (Scribner, New York, 1929, as reprinted in 1957), S. 125-126.

enorm, daß die unsichtbare Quantenindividualität des Beobachtungsaktes kaum das beobachtete Ereignis beeinflusst.

Im Gegensatz dazu hat die Art der Fragestellung einen entscheidenden Einfluß auf²⁶ das elementare Quantenphänomen. Man denke nur an die „Spur“ des Photons in Abbildung 2 oder den „Weg“ des Elektrons beim Zweispaltversuch oder die „Bewegung“ eines Elektrons in einem Atom. Bei all diesen Beispielen hat mindestens eine stellbare Frage (welchen Weg das Photon oder das Elektron nahm, oder welchen Ort oder Impuls das Elektron im Atom besitzt) keine vorhersehbare Antwort. Wir können 10^6 Photonen durch eine Aufspaltvorrichtung vom Typ der Abbildung 2 senden. Dann können wir sicher sein, daß $5 \cdot 10^5$ Photonen (statistische Variationen in der Größenordnung von ± 500) von jedem Zähler aufgezeichnet werden. In bezug auf ein einzelnes Photon haben wir bei der gleichen Anordnung nicht die geringste Chance, vorher zu sagen, welcher Zähler getroffen wird.

Quantenergebnis: Ist es durch verborgene Parameter gesteuert?

Gibt es vielleicht eine Substruktur unter der Quantenwelt, die eine Vorhersage der quantenmechanischen indeterminierten Ereignisse ermöglicht? Eine geheime Steuerung durch verborgene Variable? Alle empirischen und theoretischen Versuche, solch eine Hypothese zu verteidigen, müssen als gescheitert angesehen werden.²⁷ Bis jetzt ist kein Hinweis gefunden worden, der die Voraussagen der Quantenmechanik in Zweifel ziehen könnte, vor allem nicht die Voraussage, daß Voraussagen nicht möglich sind.

Wahrscheinlichkeit? Ja. Feste Voraussagen? Nein. Einstein würde unglücklich sein, daß „Gott würfeln“; aber Bohr konnte im Spaß sagen, „daß er aufhören solle, Gott zu erzählen, was er tun soll“.²⁸

Quantenergebnis: Allahs Wille?

Wenn es keinen identifizierbaren Mechanismus gibt, der dem einzelnen Photon seinen exakten Weg weist, ließe es sich dann behaupten, daß hier Allahs Wille am Werk ist und er ebenso jeden einzelnen Quantenprozeß steuert?

26. Warum kann man den Passus „hat einen entscheidenden Einfluß auf ...“ nicht durch den Passus „liefert alle Unterschiede beim elementaren Quantenphänomen“ ersetzen? Der Ausdruck „Unterschied“ wäre unstatthaft. Man kann das eine oder andere Experiment durchführen, aber nicht beide an einem Ort zu einer Zeit. Es handelt sich um ein Phänomen, einen Entstehungsakt. Die Individualität der Quantenphänomene erlaubt keinen Vergleich zwischen dem was ist und dem was hätte sein können.

27. Für eine Übersicht zu den einschlägigen Experimenten vgl. F.M. Pipkin, „Atomic physics tests of the basic concepts in quantum mechanics“, S. 281-340, in: Advances in Atomic and Molecular Physics (Academic Press, New York, 1978).

28. N. Bohr zitiert bei J. Bronowski, „The Ascent of Man“ (Little, Brown and Co. Boston/Toronto 1973), S. 122.

Ein solcher Vorschlag, wie schon öfter gezeigt wurde,²⁹ kann durch die Logik allein nicht zurückgewiesen werden, man muß zu pragmatischen Argumenten greifen. Im Überlebenskampf (*ceteris paribus*) wird jene Lebensart untergehen, die allem, was sich ereignet, mit blindem fatalistischem Geist begegnet. Um Gefahren auszuweichen und günstige Gelegenheiten zu nützen, müssen alle Fähigkeiten aktiviert werden um die Zukunft zu erkennen. Die Gesellschaft verlangt von der Wissenschaft Vorhersagen und die Wissenschaft macht Fortschritte hiermit. Beim einzelnen Quantenprozeß kommt jedoch die Vorhersage an ein Ende. Die Wissenschaft braucht sich darüber nicht zu grämen, sie soll es nur ehrlich sagen. Wie kann man von der Wissenschaft den Nachweis von Ursachen verlangen, wenn es keine Ursachen gibt?

Quantenergebnis: Elementarer Entstehungsakt?

Wie entstand das Universum? Geschah dies durch einen völlig unbekanntem, dem rationalen Verständnis unzugänglichen Vorgang oder spielte hier ein Mechanismus eine Rolle, den wir schon lange kennen?

Eine der zentralen Eigenschaften der Quantenphänomene, woran man sieht, daß es sich um einen nicht weiter reduzierbaren Entstehungsvorgang handelt, ist die Unberührbarkeit. Bei dem Strahlaufspaltungsexperiment in der Version der verzögerten Entscheidung können wir z.B. nicht sagen, was das Photon auf seinem langen Weg vom Eintrittspunkt bis zum Detektor eigentlich treibt. Vor dem Akt der Aufzeichnung ist das zukünftige Phänomen noch kein Phänomen. Wir hätten natürlich irgendwo auf seinem Weg ein anderes Meßgerät einschieben können, aber dann hätte dieser andere Registrierungsvorgang ein entsprechend neues Phänomen konstituiert. Damit zeigt sich das „Innen“ eines Phänomens als gänzlich unberührbar. Der Entstehungsvorgang, der doch unentwegt passiert, scheint einen Hauch von Magie zu besitzen. Paßt er vielleicht auch auf die kosmologische Situation?

Verzögerte Entscheidung im kosmologischen Bereich

Der erstaunlichste Zug des Entstehungsaktes der elementaren Quantenphänomene ist beim Experiment der verzögerten Entscheidung zu beobachten. Hier scheint eine Wirkung in die Vergangenheit zurückzulaufen im Gegensatz zur normalen Zeitordnung. Die zurückgelegte Entfernung bei einem Strahlaufspaltungsexperiment im Labor mag 30 m und die Zeit 1/10 Mikrosec. sein; aber die Entfernung könnte ebensogut einige 10⁹ Lichtjahre und die Zeit 10⁹ Jahre betragen. Das Meßgerät hier und jetzt, je nachdem wie es in der letzten Minute gestellt wird, hat eine unausweichliche Folge für das, was man rechtens über ein Photon sagen kann, das schon längst existierte ehe es Leben im Universum gab.

Es gibt zwei astronomische Objekte, bekannt als 0957 + 561 A,B (Abb. 3), die man frü-

29. In bezug auf diesen Punkt bin ich Prof. Andrew Gleason verpflichtet.

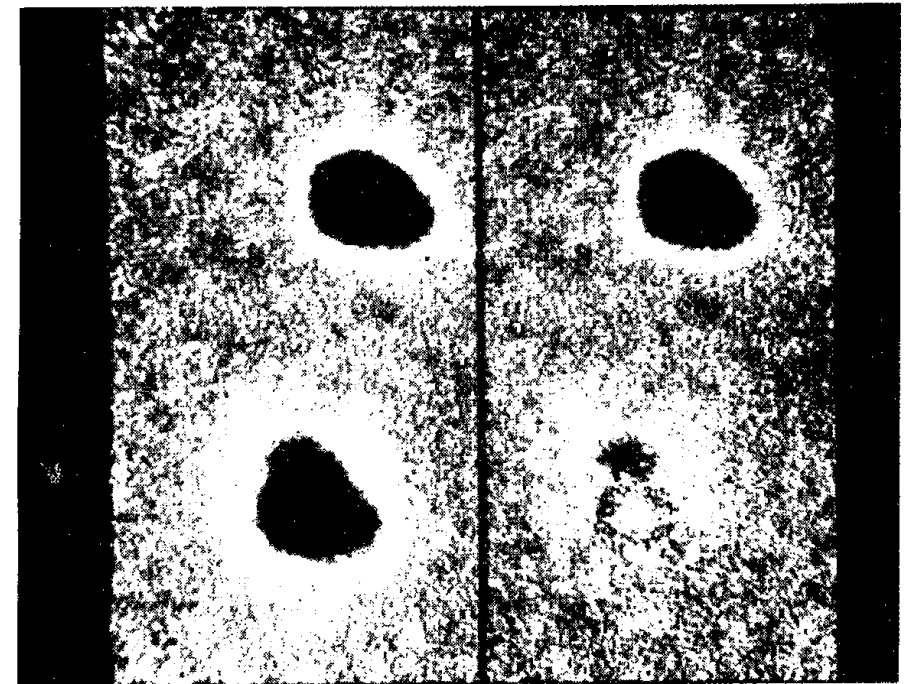


Abb. 3: Links das doppelte quasistellare Objekt (Quasar: Rotverschiebung $z = 1,41$), identifiziert durch die Rektaszension und Deklination als 0957 + 561A, B. Man nimmt an, daß es die 2 Bilder — hervorgebracht durch den Gravitationslinseneffekt — von ein und demselben Quasar sind. Diese Photographie, die mit dem Teleskop der Universität Hawaii von Alan Stockton gemacht und von Derek Will von der Universität Texas übermittelt wurde, ist die digitale Summe von 5 einminütigen Belichtungen im roten Licht (5700 bis 7000 Å). Die Sternbilder erscheinen gedehnt auf Grund eines Mitführungsproblems für das Teleskop.

Rechts dieselbe digitale Photographie, nachdem ein Sternprofil vom südlichen Bild (B) abgezogen wurde, der Rest ist vereinbar mit der Existenz einer Galaxis in der Nähe von B, welche den Linseneffekt auslöst. Young, Gunn, Kristian, Oke und Westphal von Caltech fanden empirische Stützung für die Existenz einer solchen Galaxis (0,02" westlich und 0,8" nördlich von B; $z = 0,39$) also viel näher an B als an A (A liegt 1,2" westlich und 6" nördlich von B). Diese Galaxis ist Mitglied einer Gruppe von 1000 bis 10000 Galaxien (deren Zentrum 2" westlich und 15" nördlich von B liegt).

her für zwei verschiedene quasistellare Objekte oder Quasare hielt, weil sie durch 6 Bogensek. getrennt sind. Heute hält man sie für 2 Bilder eines einzigen Quasars.³⁰ Man fand Indizien für das Vorhandensein einer Galaxis, die sich etwa 1/4 des Weges zwischen uns und dem Quasar befindet. Die Berechnungen zeigen³¹, daß eine normale Galaxis in dieser Entfernung in der Lage ist, 2 Lichtstrahlen, die sich 100.000 Lichtjahre bei ihrem Weg vom Quasar voneinander getrennt haben, so zusammenzuführen, daß sie sich auf der Erde treffen. Diese und andere Fälle von Gravitationslinsenwirkungen³² erlauben es, das Strahlenspaltungs-Experiment in der Version der verzögerten Entscheidung auf den kosmologischen Bereich zu übertragen (Abb. 4).

Morgens stehen wir auf und überlegen uns tagsüber, ob wir eine Beobachtung der Art machen sollen, wo nach der Wegalternative gefragt wird oder eine Beobachtung von der Art, wo eine Interferenz zwischen beiden Wegen stattfindet. Wenn die Nacht kommt und das Teleskop verwendbar wird, setzen wir den halbversilberten Spiegel ein oder lassen ihn weg, wie eben unsere Entscheidung gefallen ist. Ein Filter, der nur monochromatisches Licht durch das Teleskop laufen läßt, setzt die Zählrate stark herab. Es kann eine Stunde dauern, bis das erste Photon kommt. Wenn es den Zähler auslöst, erfahren wir durch die eine Anordnung, auf welchem Weg es gekommen ist; durch die andere Anordnung erkennen wir die relative Phase der Welle, die mit dem Durchgang des Photons von Quelle zu Empfänger auf beiden Wegen verbunden ist — wobei die beiden Wege vielleicht 100.000 Lichtjahre auseinanderliegen, wenn sie die refokussierende Galaxis G-1 passieren. Nun hat das Photon die Galaxis bereits vor Milliarden von Lichtjahren passiert, lange also ehe unsere Entscheidung fiel. In diesem Sinne, einfach ausgedrückt, entscheiden wir, was das Photon

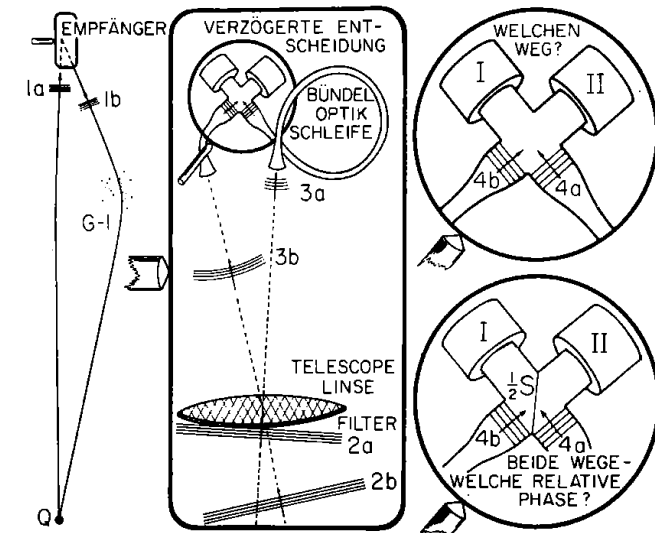


Abb. 4: Vorschlag eines Experimentes der verzögerten Entscheidung, das sich über einen kosmologischen Raumzeit-Bereich erstreckt.

Links: Quasar Q erscheint am Empfänger als 2 Quasare auf Grund der Gravitationslinsenwirkung, die von der dazwischenliegenden Galaxis G — 1 ausgeht.

Mitte: Schema eines Empfängers für ein Experiment der verzögerten Entscheidung

a) Filter, der nur Wellenlängen in einem engen Intervall durchläßt; sie entsprechen einem langen Wellenzug, der für Interferenz-Experimente geeignet ist.

b) Linse, um die beiden scheinbaren Quellen auf die Aufnahmeträger der 2 optischen Fasern zu fokussieren.

c) Verzögerungsschleife in einer dieser Fasern, die so lang ist und deren Länge sich so mit der Zeit verändert, daß die Wellen, die auf den 2 verschiedenen Wegen laufen, fast genau die gleiche Phase besitzen.

Rechts: Die Entscheidung. Oberes Diagramm: Am Kreuzungspunkt der beiden optischen Fasern wird den beiden Wellen nichts in den Weg gestellt. Welle 4a läuft zum Zähler I, 4b zum Zähler II. Derjenige von diesen Photodetektoren, der anspricht, signalisiert — unscharf ausgedrückt — auf welchem Weg a oder b das Photon vom Quasar zum Empfänger gereist ist.

Unteres Diagramm: Ein halbversilberter Spiegel, 1/2 S, wird am Kreuzungspunkt der beiden Fasern eingesetzt. Die Verzögerungsschleife wird so eingerichtet, daß beide Wellen die gleiche Phase haben. Dann wird Zähler I immer still bleiben, alle Photonen gelangen zu II. Dieses Ergebnis, auch vereinfacht ausgedrückt, besagt, daß die Photonen auf beiden Wegen gelaufen sind.

Zum Zeitpunkt, wo die Entscheidung fiel, den 1/2 S einzusetzen oder wegzulassen, war das Photon schon Milliarden Jahre auf dem Weg. Man kann ihm eben keinen Weg zuschreiben. Kein elementares Phänomen ist ein Phänomen, ehe es nicht ein registriertes Phänomen ist.

30. D. Walsh, R.F. Carswell und R.J. Weymann, „0957 + 561 A,B: twin quasistellar objects or gravitational lens?“ *Nature* 279, S. 381-384 (1979); R.J. Weymann, F.H. Chaffee Jr., M. Davis, N.P. Carleton, D. Walsh und R.F. Carswell, „Multiple-mirror observations of the twin QSO 0957 + 561 A,B“, *Astrophysical Journal* 233, L43-L46 (1979); P.J. Young, W.L.W. Sargent, J.A. Kristian und J.A. Westphal, „CCD photometry of the nuclei of three supergiant elliptical galaxies: evidence for a supermassive object in the center of the radiogalaxy NGC6251“, *Astrophysical Journal* 234, S. 76-85 (1979); D.H. Roberts, P.E. Greenfield und B.F. Burke, „The double quasar 0957 + 561: a radio study at 6 centimeters wavelength“, *Science* 205, S. 894-896 (1979); G.G. Pooley, I. Browne, E.J. Daintree, P.K. Moore, R.G. Noble und D. Walsh, „Radio studies of the double QSO 0957 + 561 A,B“, *Nature* 280, S. 461-464 (1979); P.E. Greenfield, D.H. Roberts und B.F. Burke, „The double quasar 0957 + 561: examination of the gravitational lens hypothesis using the very large array“, *Science* 208, S. 495-497 (1980); P.J. Young, *et. al.* „Q0957 + 561 A,B: detailed models of the gravitational lens effect“, *Astrophysical Journal*, 244, 736-755 (1981); B. Wills und D. Wills, „Spectrophotometry of the double QSO 0957 + 561“, *Astrophysical Journal* 238, S. 1-9 (1980); B.T. Soifer, G. Neugebauer, K. Matthews, E.F. Becklin, C.G. Wynn-Williams und R. Capps, „IR observations of the double quasar 0957 + 561 A,B and the intervening galaxy“, *Nature* 285, S. 91-93 (1980).

31. C.C. Dyer und R.C. Roeder, „Possible multiple imaging by spherical galaxies“, *Astrophysical Journal* 238, L67-L70 (1980). P. Young *et. al.*, Zitat. 30.

32. R.J. Weymann, D. Latham, J.R.P. Angel, R.F. Green, J.W. Liebert, D.A. Turnshek, D.R. Turnshek und J.A. Tyson, „The triple QSO PG1115 + 08; another probable gravitational lens“, *Nature* 205, S. 641-645 (1980).

getan haben wird, nachdem es dies schon längst getan hat. In Wirklichkeit ist es falsch, von dem Weg des Photons zu sprechen. Genauer gesagt ist es sinnlos, von dem Phänomen zu reden, ehe es durch einen irreversiblen Akt der Verstärkung zum Abschluß gebracht wurde. „Kein elementares Phänomen ist ein Phänomen, ehe es nicht ein registriertes (beobachtetes) Phänomen geworden ist.“

Vergangenheit im Lichte eines Experimentes der verzögerten Entscheidung

Anders ausgedrückt haben wir es mit einem elementaren Entstehungsakt zu tun. Er reicht von Milliarden Jahre in der Vergangenheit bis in die Gegenwart. Es ist falsch, die Vergangenheit als das anzusehen, das in jeder Einzelheit schon existiert. Die Vergangenheit ist theoretische Konstruktion. Die Vergangenheit existiert nur im Sinne der Berichte in der Gegenwart. Mit unseren quantenmechanischen Meßgeräten bestimmen wir, welche Fragen wir stellen wollen. Dabei sind wir in der Lage, über das mit Sicherheit zu bestimmen, was wir rechtens über die Vergangenheit der Welt sagen können.

Realität (Abb. 5) besteht aus einigen eisernen Pfosten der Beobachtung, die durch theoretische Konstruktion zu einem verständlichen Ganzen ergänzt werden.³³

In der Zeit vor der Quantenmechanik war die Raumzeit wie ein großes berichtendes Pergament. Die kontinuierlichen Träger aller zukünftigen, gegenwärtigen und vergangenen Ereignisse hatten eine feste Struktur mit Kurven, Wellen und Rippen. Jedes Ereignis, wie ein angeklebtes Sandkorn auf einem Blatt, hatte seinen festen Platz. Dieses eingefrorene Bild wurde durch die Quantenmechanik schwerwiegend verändert. Was wir rechtens über die vergangenen Ereignisse der Raumzeit sagen können, wird durch die Wahl der auszuführenden Messungen jetzt und hier entschieden.

Die Phänomene, die durch die Entscheidungen hervorgerufen werden, reichen bis in die frühesten Tage des Universums zurück. Die Meßgeräte, die heute zum Einsatz kommen, haben einen nicht zu vernachlässigenden Anteil daran, das hervorzubringen, was unserem Eindruck nach längst geschehen ist. Die Alltagsauffassung, daß die Welt eine von uns unabhängige Existenz besitzt, läßt sich nicht länger aufrechterhalten. In einem gewissen Sinne ist die Welt ein „Universum der Teilhabe“.

Von der Messung zur Bedeutung

Mit diesen Ausdrücken muß man vorsichtig umgehen. Außerdem ist eine Frage am Platz. Die Vorsicht betrifft das Bewußtsein. Damit hat der Quantenprozeß nichts zu tun, sondern mit einem Ereignis, das durch einen irreversiblen Verstärkungsakt, eine unauslöschli-

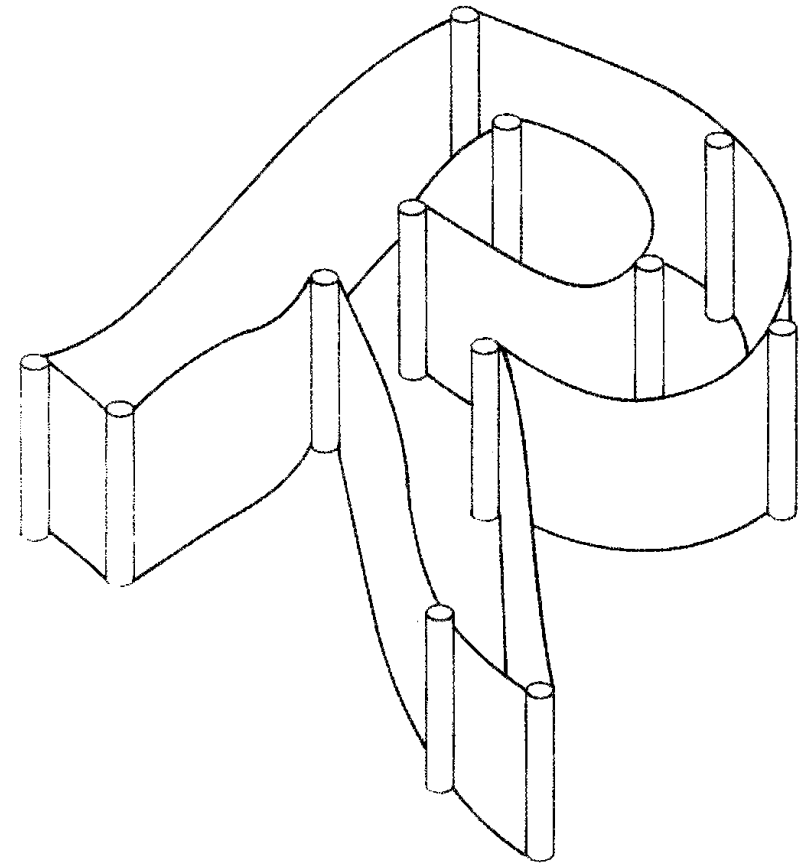


Abb. 5: Was wir „Realität“ nennen, symbolisiert durch den Buchstaben „R“ im Diagramm, besteht aus einer Papiermâché-Konstruktion von Vorstellung und Theorie, die in die Eisenpfosten der Beobachtung eingepaßt wird.

33. Vgl. hierzu E.H. Combrich, Art and Illusion: A Study in the Psychology of Pictorial Representation (Princeton University Press, Princeton, N.J., 1961, 2nd edition, revised), S. 273, 329 und 394.

che Spur³⁴, einen registrierten Bericht erkennbar ist. Dringt diese Information danach in das Bewußtsein eines Menschen, Tieres oder Computers ein? Erhält dadurch die Messung erst eigentlich ihren Sinn? Der Sinn wird hier als die „gemeinsame Einsicht der kommunikativen Gemeinschaft“ gefaßt.³⁵ Nur in dieser Verwendung ist die Sinnproblematik eine eigene Sache, die nicht mit dem Quantenphänomen zu verwechseln ist.

Ist das Universum aus Elementarphänomenen aufgebaut?

Jetzt müssen wir uns der oben erwähnten Frage zuwenden: Ist der elementare Quantenprozeß ein Entstehungsakt, braucht man einen Akt irgendeiner anderen Art, um alles Seiende hervorzubringen? Zuerst erscheint die Frage ausgesprochen lächerlich. Das Größenverhältnis von Quantenphänomen und dem Bereich des Universums scheint so eine Idee auszuschließen. Mißverhältnisse in den Proportionen jedoch sagen nicht alles. Wie hätten wir sonst entdecken können, daß die Wärme einer Wagenladung von geschmolzenem Roh-eisen für ihre Erklärung der Zufallsbewegung von Milliarden von Atomen und die Form des Elefanten der mikroskopischen Botschaft der DNS bedarf. Ist vielleicht der Ausdruck „Urknall“ nur eine Abkürzung für die Folge von Milliarden und aber Milliarden von Elementarereignissen der Beobachter-Teilhabe, die in die Vergangenheit zurückreichen (Abb. 6)?

Eine alte Legende beschreibt ein Gespräch zwischen Abraham und Jehovah. Jehovah schilt Abraham: „Du existierst nicht, wenn ich nicht wäre.“ „Ja, mein Gott, ich weiß, ich weiß“, antwortete Abraham: „aber Du wärest völlig unbekannt, wenn ich nicht wäre.“³⁶

In unserer Zeit haben sich die Teilnehmer des Dialogs geändert. Sie sind Universum und Mensch. Personifiziert sagt das Universum: Ich bin eine riesige Maschine. Ich liefere Raum und Zeit für deine Existenz. Vor mir war nichts und nach mir wird nichts sein. Du bist ein völlig unwichtiges Stück Materie in einer ebenso unwichtigen Galaxis.

Was sollen wir darauf sagen? Sollen wir sagen: „Ja, gutes Universum, ohne dich wäre ich heute nicht da. Aber du großes System bist aus Phänomenen aufgebaut und jedes Phänomen beruht auf einem Beobachtungsakt. Du wärest nicht ohne meine — und andere elementare — Akte der Registrierung“?

Sind nun die elementaren Quantenphänomene, diese unberührbaren unteilbaren Entstehungsakte tatsächlich das Baumaterial alles Seienden? Ist das Grundelement jenseits der Teilchen, Kraftfelder, Geometrie, Raum und Zeit der ätherische Akt der Beobachter-Teilhabe? Für Dr. Samuel Johnson war der Stein real, wenn er ihn anstieß. Die Entdeckung, daß die Materie des Felsens aus positiver und negativer elektrischer Ladung und mehr als

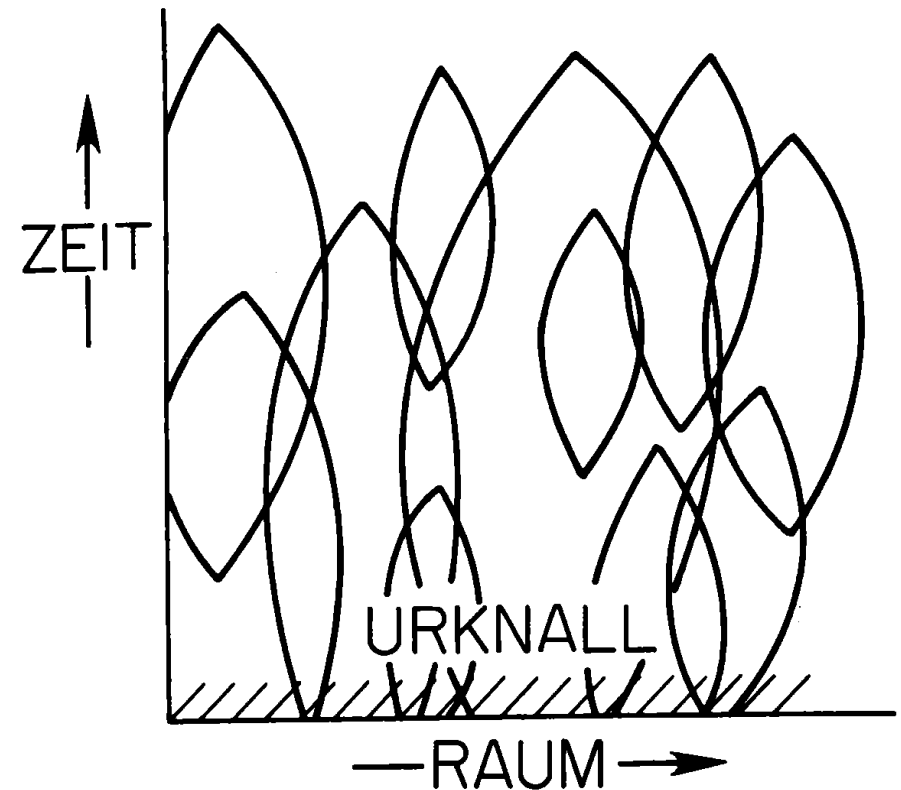


Abb. 6: Symbolische Darstellung wie das, was schon in der Vergangenheit geschehen ist, beeinflusst wird durch Wahlentscheidungen, die in der Gegenwart getroffen werden. Die obere Spitze eines Blattes symbolisiert einen elementaren Registriervorgang. Das untere Ende des Blattes steht für den Anfang des Elementar-Phänomens, das vom Meßgerät erforscht wird. Braucht man noch mehr, um Raum und Zeit und ihren gesunden physikalischen Inhalt aufzubauen als die Information, die vom elementaren Quantenereignis getragen wird?

34. F.J. Belinfante, *Measurements and Time Reversal in Objective Quantum Theory* (Oxford University Press, Oxford 1975).

35. D. Føllesdal, „Meaning and experience“ in: S. Guttenplan, ed., *Mind and Language* (Clarendon Press, Oxford 1975), S. 254. Føllesdals Aufsatz und die anderen Beiträge in diesem Band zeigen den repräsentativen Charakter dieses Zitats an.

36. Genaue Literaturangabe in der Originalveröffentlichung *Am. Phil. Soc. & Roy. Soc.* 1981, S. 37.

99,99% leerem Raum besteht, verringert nicht den Schmerz an den Zehen. Selbst wenn man eines Tages den Stein als völlig leer entdecken würde, wird sich hieran nichts mehr ändern.

Roland M. Frye erinnert uns an Shakespeare's Sehweise der Dinge³⁷ und an seine 400 Jahre alten Worte „So wie die Vorstellung die Form unbekannter Dinge verkörpert, so gibt ihnen die Feder des Dichters Gestalt und das luftige Nichts erhält Ort und Namen.“

Sind nun die Myriaden von Beobachter-Teilhabe-Akten die Basis aller Dinge? Heute können wir diese ontologische Frage über den Grundstoff des Universums nicht endgültig beantworten. Mit zunehmendem Wissen ist auch das Nichtwissen gewachsen. Schon die eigenartige Fragestellung weist darauf hin, wie unsicher wir über die tieferen Grundlagen und die Konsequenzen der Quantenmechanik sind.

Quantenmechanik: Gebrauch und Gebräuche

Man kann die Begegnung mit der Quantenmechanik vergleichen mit einem Forscher eines fremden Landes, der bei uns zum erstenmal einem Auto begegnet. Offensichtlich ist es zu irgendeinem Gebrauch bestimmt, aber wozu? Er öffnet die Wagentür, kurbelt die Scheiben rauf und runter, schaltet die Scheinwerfer ein, dreht an der Zündung und am Anlasser, ohne jedoch den zentralen Punkt des Gerätes zu begreifen. Das Quantum ist wie das Automobil. Das Quantum arbeitet im Transistor, um eine Maschine zu kontrollieren, im Molekül eines Anästhesiegerätes, im Supraleiter eines Magneten. Könnte es sein, daß wir den Kern der Sache, den Gebrauch des Quantenphänomens beim Aufbau der Welt selbst immer noch nicht begriffen haben?

Auch wenn wir den Anlasser des Autos betätigt haben, bewegt sich der Wagen noch nicht.

Elektrizität zur Zeit Benjamin Franklins war ein seltsames Gemisch von Funken und Blitzen, Leidener Flaschen und Drähten, Katzenfell und Wachs. Bei ihm fand sich eine bemerkenswerte Kombination von Abenteuergeist und solidem Alltagsverstand,³⁸ die ihn tief in die Materie eindringen ließ. Sonst wäre er nie so weit gekommen, so viele Kernpunkte der Elektrizität mit einem Minimum an Mathematik zu erklären, darunter die positiven und negativen Ladungen, und ein brauchbares Bild zu liefern, wie man sich die Ladungsverteilung an der Oberfläche eines Leiters vorzustellen hat. Wie weit hat Franklin doch die Wissenschaft von der Elektrizität vorwärts gebracht und wie weit ist sie bis heute gewachsen!

Wie weit ist der Quantenbegriff in den Händen von Bohr und Einstein gewachsen! Wie wird er weiterwachsen? In der weiteren Forschungsarbeit können wir vielleicht einen ermutigenden Hinweis in den Worten Einsteins gebrauchen: „Meiner Meinung nach gibt es den richtigen Weg ... und es steht in unserer Macht, ihn zu finden.“³⁹

37. R.M. Frye, „Ways of seeing or epistemology in the arts: unities and disunities in Shakespearean drama and Elizabethan painting“, *Am. Phil. Soc. & Roy. Soc.* 1981, S. 43 ff.

38. Für weitere Details zum Einfluß Franklins vgl. E. Wright, „Benjamin Franklin, the British Statesman: a reappraisal“, *Am. Phil. Soc. & Roy. Soc.* 1981, S. 77 ff.

39. A. Einstein, *On the Method of Theoretical Physics* (Oxford University Press, New York 1933), reprinted in *Philosophy of Science* 1, S. 162-169 (1934); dtsh.: *Methodik der theoretischen Physik*, in A. Einstein: *Mein Weltbild* (Ullstein, Frankfurt 1977), S. 113-119.