

Kapitel 8

Anhang: Geschichte und Deutung der Quantentheorie

Ausgewählte Texte (aus [1]-[10]), zusammengestellt - und z.T. leicht angepasst - von C. Schmid¹, für Studenten mit Interesse an Grundlagendiskussionen als Ergänzung zur Vorlesung Quantenmechanik (I)²

¹Dr. Christhard Schmid, apl. Prof. an der Universität Ulm

²von Prof. Dr. Friederike Schmid, Universität Bielefeld, WS 2002/2003. Letzte Änderung der PDF-Datei am 22.10.06.

Inhaltsverzeichnis

8	Anhang: Geschichte und Deutung	173
8.1	Bibliographie	177
8.2	Die vorläufige Quantentheorie	184
8.2.1	Die Ultraviolett-Katastrophe	184
8.2.2	Planck 1900 und die Quantenhypothese	184
8.2.3	Einstein 1905 und der Photoeffekt	184
8.2.4	Rutherford 1911 und das schlimmste quantitative Versagen in der Geschichte der Physik	184
8.2.5	Bohr 1913 und der Widerspruch zur Elektrodynamik	184
8.3	Der Durchbruch	185
8.3.1	Heisenbergs nichtkommutative Mechanik 1925	185
8.3.2	Borns und Jordans Matrixalgebra 1925	185
8.3.3	Paulis Wasserstoff-Spektrum 1926	186
8.3.4	Schrödingers Wellenmechanik 1926	186
8.3.5	Eine abweichende Darstellung der Historie	186
8.3.6	Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation 1926	186
8.3.7	Ergebnis	187
8.3.8	Interpretationsprobleme - Überblick	187
8.4	Geschichte der Deutung bis 1932	189
8.4.1	Zufall und Welle-Teilchen-Dualität am Beispiel eines Photonexperimentes mit Schattenwurf	189
8.4.2	Komplementarität	190
8.4.3	Die Heisenbergsche Unschärferelation	190
8.4.4	Das Quantenrätsel der Superpositionen	191
8.4.5	Die Kopenhagener Deutung	192
8.4.6	Kritik an der Kopenhagener Deutung	193
8.4.7	Vorgriff auf die Dekohärenztheorie	193
8.5	Erfolge der Quantentheorie	194
8.5.1	Mikroskopische Quanteneffekte	194
8.5.2	Makroskopische Quanteneffekte	194
8.5.3	Quantenkosmologie	194
8.5.4	Verträglichkeit der Quantentheorie mit der speziellen Relativitätstheorie	195
8.6	Streit um die statistische Interpretation	195
8.6.1	Einstein 1909	195
8.6.2	Einstein, Planck, Schrödinger 1926, 1929	195

8.6.3	Schrödinger 1926	196
8.6.4	Einstein und Schrödinger 1935: Die Katze	196
8.7	Streit um den Realitätsbegriff: EPR	197
8.7.1	Historie	197
8.7.2	Motivation	197
8.7.3	Das Gedankenexperiment	198
8.7.4	Unvereinbarkeit mit dem überlieferten Realitätsbegriff	199
8.7.5	Verzögerte Wahl	200
8.7.6	Quantenkorrelationen	200
8.8	Streit um Verborgene Variable	201
8.8.1	Motivation	201
8.8.2	Bellsche Ungleichung	201
8.8.3	Experimente	202
8.9	Empirische Gedankenexperimente	204
8.9.1	Zwei-Löcher-Interferenzexperimente	204
8.9.2	Experiment mit verzögerter Wahl	204
8.9.3	Experimente zum Teilchen-Welle-Dualismus/Interferenz	204
8.9.4	Aharonov-Bohm-Effekt	205
8.9.5	Schrödingers Katze	206
8.9.6	Fernkorrelationen	207
8.9.7	Experimente aus der Quantenoptik	207
8.10	Everetts Vielwelten-Interpretation	208
8.10.1	Begriff	208
8.10.2	Monströse makroskopische Überlagerungen	208
8.10.3	Everett und die Dekohärenztheorie	208
8.10.4	Paralleluniversen in neuen kosmologische Theorien	209
8.11	Dekohärenz	210
8.11.1	Was ist Dekohärenz?	210
8.11.2	Historie	211
8.11.3	Dekohärenz im Gedankenexperiment der Quantenkarten	211
8.11.4	Welche Phänomene werden durch die Dekohärenz erklärt?	212
8.11.5	Dekohärenz - eine Folge der Dynamik offener Quantensysteme	213
8.11.6	Dynamik offener Quantensysteme und reduzierte Dichteoperatoren	214
8.11.7	Dämpfung, Dekohärenz, stabile und instabile Superpositionen	215
8.11.8	Dekohärenzreduzierung - ein Ziel der Quantentechnologie	216
8.11.9	Dekohärenz und Gehirn - Quantentheorie und Bewusstsein	217
8.11.10	Eine Umfrage unter Physikern 1999 zum Kollaps	218
8.12	Rationale Rekonstruktion	220
8.12.1	Begriff Rekonstruktion	220
8.12.2	Begriff Abstrakte Quantentheorie	220
8.12.3	Quantentheorie der Messung	221
8.12.4	Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik	222
8.12.5	Universalität und Nichtobjektivierbarkeit	223
8.12.6	Nichtobjektivierbarkeit des Zeigers	223

8.13 Metaphysik	225
8.13.1 Positivismus	225
8.13.2 Reduktionismus	225
8.13.3 Bohr und die Kopenhagener Interpretation	226
8.13.4 Einsteins Physikverständnis	226
8.13.5 Der Ausgriff ins Unendliche	227
8.13.6 Einsteins Metaphysik	227

8.1 Bibliographie

Literaturverzeichnis

- [1] Herbert Walther³: „Quantenphysik zwischen Theorie und Anwendung.“. Physikalische Blätter 56(2000) Nr. 12, S.57-63.
- [2] Peter Mittelstaedt⁴: „Universell und inkonsistent? Quantenmechanik am Ende des 20. Jahrhunderts“. Physikalische Blätter 56(2000) Nr. 12, S.65-68
- [3] Max Tegmark und John Archibald Wheeler⁵, „100 Jahre Quantentheorie“, Spektrum der Wissenschaft April 2001, S. 68-76.
- [4] H. Dieter Zeh⁶, „Ist das Problem des quantenmechanischen Messprozesses nun endlich gelöst?“ Gastkommentar in [3]
- [5] W. T. Strunz⁷, G. Alber⁸ und F. Haake⁹: „Dekohärenz in offenen Quantensystemen. Von den Grundlagen der Quantenmechanik zur Quantentechnologie.“, Physik Journal 1(2002) Nr. 11, S.47-52.
- [6] Jürgen Ehlers und Engelbert Schücking: „Aber Jordan war der Erste“. Physik Journal 1 (2002) Nr. 11, S. 71-74.

³Prof. Dr. Herbert Walther, Sektion Physik der Universität München und Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Straße 1, 85748 Garching

⁴Prof. Dr. Peter Mittelstadt, Institut für Theoretische Physik der Universität zu Köln, Zùlpicher SreaÙe 77, 50937 Köln

⁵Max Tegmark und John Archibald Wheeler führten ausgiebige Debatten zur Quantentheorie während der dreieinhalb Jahre, die Tegmark als Postdoc am Institute of Advanced Studies in Princeton (New Jersey) weilte. Tegmark ist jetzt Assistent-Professor für Physik an der Universität von Pennsylvania. Wheeler ist emeritierter Physik- Professor in Princeton, wo unter anderem Richard Feynman und Hugh Everett III seine Schüler waren. 1934/35 arbeitete Wheeler mit Niels Bohr in Kopenhagen zusammen über Kernphysik. Die Autoren danken Jeff Klein, H. Dieter Zeh und Wojciech H. Zurek für hilfreiche Hinweise.

⁶H. Dieter Zeh ist emeritierter Professor der Theoretischen Physik an der Universität Heidelberg.

⁷Dr. Walter T. Strunz, Theoretische Quantendynamik, Fakultät für Physik, Universität Freiburg, 79104 Freiburg

⁸Prof. Dr. Gernot Alber, Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt, 64289 Darmstadt

⁹Prof. Dr. Fritz Haake, Fachbereich Physik, Universität Essen, 45117 Essen

- [7] Prof. Dr. Eberhard Müller¹⁰: „Rehabilitation der Sünde“. Der Grundriss der Schöpfung. Neue Perspektiven im Schnittfeld von Quantentheorie und Schöpfungstheologie. 2004 Radius-Verlag Stuttgart.
- [8] Carl Friedrich von Weizsäcker, Aufbau der Physik, Carl Hanser Verlag, München (1985)
- [9] Hans-Dieter Mutschler¹¹ „Des Physikers Metaphysik“, Albert Einstein und sein Verhältnis zur Religion, Herder Korrespondenz 3/2005 Seite 156-159.
- [10] Roger Penrose¹²: „Bewusstsein lässt sich nicht berechnen“, Interview mit Birgit Herden in Technological Review Januar 2006, Seite 38.
- [Alber et al. 1999] G. Alber und M. Freyberger, Phys. Bl., Oktober 1999, S. 23.
- [Alber et al. 2001] G. Alber et al., Quantum Information, Springer, Heidelberg 2001.
- [Alley/Shih 1987] C. O. Alley, Y H. Shih in „Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics“, hrsg. von M. Namiki, 5. 47 (1987).
- [Arndt et al. 1999] M. Arndt et al., Nature 401, 680 (1999). M. Arndt, A. Zeilinger, Phys. Bl., März 2000, S. 69.
- [Aspect et al. 1982] A. Aspect, J. Dalibard und G. Roger: „Experimental test of Bell’s inequality using time-varying analyzers“. Physical Review Letters 49 (1982), S. 1804 und A. Aspect, Ph. Grangier, C. Roger, Phys. Rev. Lett. 49, 91(1982).
- [Bell 1964] John S. Bell: „On the Einstein Podolsky Rosen paradox“. Physics 1 (1964), S. 195. Reprinted in J. S. Bell, „Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics“, Cambridge University Press, New York, 1987.
- [Blanchard et al. 2000] Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer und I.-O. Stamatescu (hrsg.), Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (2000).

¹⁰Eberhard Müller, 1949 in Stetten/Remstal geboren, schloss sein Studium der Physik 1976 an der Universität Tübingen mit dem Diplom ab. 1981 Promotion an der ETH Zürich über „Quantenmechanische Bemerkungen zur Thermodynamik“. 1981 bis 1988 Tätigkeiten an der ETH Zürich, am Dublin Institute for Advanced Studies und an der Universität Hamburg. Seit 1988 Studienleiter im Evangelischen Studienwerk Villigst, Schwerte. 1991 bis 2001 Lehrauftrag für Physikalische Technik an der Fachhochschule Südwestfalen. Seit 15 Jahren korrespondierender wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Theologie und Wissenschaftskulturen an der Universität Tübingen. Forschungen über Grundlagen der Quantentheorie, chaotische Systeme, irreversible Dynamiken und quantenstatistische Phasenübergänge.

¹¹Hans-Dieter Mutschler (geb. 1946) ist Professor für Natur- und Technikphilosophie an der Hochschule Ignatianum in Krakau. Jüngere Veröffentlichungen zum Themenfeld Naturwissenschaften und Theologie: Die Gottmaschine. Das Schicksal Gottes im Zeitalter der Technik, Augsburg 1998; Naturphilosophie, Stuttgart 2002; Physik und Religion, Darmstadt 2005.

¹²Sir Roger Penrose ist ein englischer Mathematiker und theoretischer Physiker, zu dessen Leistungen die Theorie der Spin-Netzwerke und der Hawking-Penrose-Satz gehören. In seinen populärwissenschaftlichen Büchern setzt er sich auch mit dem Phänomen Bewusstsein auseinander.

- [Bohr 1927/28] Niels Bohr: „Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik“. Vortrag am 16. September 1927 in Como, anlässlich der Voltafeier. Überarbeitete Fassung des Vortrags in *Naturwissenschaften*, 16 (1928), S. 245.
- [Bohr 1948] N. Bohr, *Dialectica* 2, 312(1948)
- [Bohr 1949] N. Bohr in „Albert Einstein: Philosopher-scientist, Library of Living Philosophers“, hrsg. von P. A. Schilpp, Evanston, IL, 1949. Nachdruck in Wheeler and Zurek, „Quantum Theory of Measurement“, Princeton University Press 1983.
- [Born/Jordan 1925] Max Born, Pascual Jordan: „Zur Quantenmechanik“. *Zeitschrift für Physik*, 34 (1925), S. 858.
- [Born 1926] Max Born: „Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge,“. *Zeitschrift für Physik*, 37 (1926), S. 863; 38 (1926), S. 803.
- [Born 1927] Max Born: „Quantenmechanik und Statistik“. *Naturwissenschaften* 15 (1927), S. 238.
- [Bouwmeester et al. 1997] D. Bouwmeester et al., *Nature* 390, 575 (1997).
- [Bouwmeester et al. 1999] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, M. Daniell, H. Weinfurter und A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* 82, 1345 (1999).
- [Bouwmeester et al. 2000] D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger (Hrsg.), *The Physics of Quantum Information*, Springer, Berlin 2000.
- [Briegel et al. 1999] H. J. Briegel, I. Cirac und P. Zoller, *Phys. Bl.*, September 1999, S. 37.
- [Busch et al. 1996] P. Busch, P. Lahti und P. Mittelstaedt, *The Quantum Theory of Measurement*, 2nd. edition, Springer-Verlag, Heidelberg (1996).
- [Dürr et al. 1998] S. Dürr, T. Nonn, G. Rempe: „Origin of quantum-mechanical complementarity probed by a „which-way“ experiment in an atom interferometer“. *Nature* 395 (1998), p. 33; vgl. *Phys. Bl.*, November 1998, S. 999.
- [Dürr et al. 2000] S. Dürr, G. Rempe in „Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics“ Vol. 42, S. 29 (2000), hrsg. von B. Bederson und H. Walther.
- [Einstein 1905A] Albert Einstein: „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“. *Annalen der Physik* 17 (1905), S. 549.
- [Einstein/Born 1916-1955] Albert Einstein, Hedwig und Max Born, Briefwechsel 1916-1955. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1972.
- [Einstein/Podolski/Rosen 1935] Albert Einstein, Boris Podolski, Nathan Rosen: „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?“ *Physical Review* 47 (1935), S. 777.

- [Englert et al. 1998] B.-G. Englert, M. Löffler, O. Benson, B. Varcoe, M. Weidinger, H. Walther, Fortschritte der Physik 46, 897 (1998).
- [Freedman/Clauser 1972] S. J. Freedman und J. Clauser, Phys. Rev. Lett. 28, 938 (1972).
- [Fry et al. 2000] F. S. Fry, T. Walther in Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics Vol. 42, 1 (2000), hrsg. von B. Bederson und H. Walther
- [Giulini et al. 1996] D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, J. Kupsch, I.-O. Stamatescu und H. D. Zeh (hrsg.), Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (1996).
- [Greenberger et al. 1989] D. M. Greenberger, M. A. Horne und A. Zeilinger in „Bell’s Theorem, Quantum Theory, and Conceptions of the Universe“, hrsg. von Al. Kafatos, S. 73-76, Kluwer Academic, Dordrecht 1989.
- [Greenberger et al. 1989] D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony und A. Zeilinger, Am. J. Phys. 58, 1131 (1990).
- [Hahn 1950] E. L. Hahn, Phys. Rev. 80, 580 (1950)
- [Hartle 1968] J. Hartle, Am. J. of Phys. 36, 704 (1968)
- [Heisenberg 1925] Werner Heisenberg: „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“. Zeitschrift für Physik 33 (1925), S. 879.
- [Heisenberg 1927] Werner Heisenberg: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“. Zeitschrift für Physik, 43 (1927), S. 172.
- [Heisenberg 1956] Werner Heisenberg: „Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie“. Physikalische Blätter 12 (1956), S. 289.
- [Hellmuth et al. 1987] T. Hellmuth, H. Walther, A. Zajonc, W. Schleich, Phys. Rev. A 35, 2532 (1987).
- [Hund 1984] F. Hund, Geschichte der Quantentheorie, 3. Aufl., BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1-135 (1984)
- [Jammer 1974] Max Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [Jammer 1975] Max Jammer, Einstein und die Religion. Universitätsverlag Konstanz, Konstanz, 1995.
- [Jauch 1968] J. M. Jauch, Foundations of Quantum Mechanics, Addison-Wesley, Reading (1968)
- [Kleppner/Jackiw 2000] Daniel Kleppner und Roman Jackiw, „One Hundred Years of Quantum Physics“, Science, Bd. 289, S. 893 (August 2000).

- [Kober 2003] Michael Kober, *Positivismus, Religion in Geschichte und Gegenwart*, 4. Auflage, Mohr Siebeck (2003)
- [Kragh 2000] Helge Kragh, „Max Planck: The Reluctant Revolutionary“, *Physics World*, Bd. 13, S.31 (December 2000)
- [Kwiat et.al 1995] P. G. Kwiat, M. Mottle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, Y Shib, *Phys. Rev. Lett.* 75. 4337 (1995).
- [Kwiat et.al 1998] P. G. Kwiat, F. Wako. A. G. White, L. Appelbaum, Ph F. Eberhard, *quant-ph/9810003*.
- [Ludwig 1983] G. Ludwig, *Foundations of Quantum Mechanics I, II*, Springer-Verlag, Heidelberg (1983, 85)
- [Mackey 1963] G. W. Mackey, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Benjamin, New York (1963)
- [Miller/Wheeler 1983] W. A. Miller, J. A. Wheeler in „*Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics*“ Tokyo 1983, S. 140.
- [Mittelstaedt 1978] P. Mittelstaedt, *Quantum Logic*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht (1978); *Sprache und Realität in der Modernen Physik*, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim (1986)
- [Mittelstaedt 1989] P. Mittelstaedt, *Philosophische Probleme der Modernen Physik*, 7. Aufl., BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim (1989)
- [Mittelstaedt 1998] P. Mittelstaedt, *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*, Cambridge University Press, Cambridge (1998).
- [Monroe/Bollinger 1997] C. Monroe, J. Bollinger, *Physics World* 10, 37 (1997).
- [Nielsen et al. 1998] Zu einer allgemeinen Diskussion der Inversion von Quantenoperationen siehe z. B. M. A. Nielsen et al., *Proc. Roy. Soc. A* 454, 177 (1998).
- [Ou/Mandel 1988] Z. Y. Ou, L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* 61, 50 (1988).
- [Pauli 1926] Wolfgang Pauli: „Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik“. *Zeitschrift für Physik*, 36 (1926), S. 336.
- [Pipkin 1978] F. M. Pipkin in *Advances in Atomic and Molecular Physics* Vol. 14, 5. 281 (1978), hrsg. von D. R. Bates und B. Bederson.
- [Pitowsky 1989] J. Pitowsky, *Quantum Probability - Quantum Logic*, Springer-Verlag, Berlin (1989)
- [Planck/Hermann 1973] Max Planck, *rororo Bildmonographie* 198, dargestellt von Armin Hermann. Rowohlt Taschenbuchverlag, Reinbek bei Hamburg, 1973.

- [Primas 1981] Hans Primas: „Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism,,“, Lecture Notes in Chemistry, Band 24, mit einem Vorwort von Paul Feyerabend. Springer-Verlag, Berlin, 1981. Eine moderne, umfassende und bibliographisch ausführlich untermauerte Darstellung der konzeptionellen Entwicklung und Weiterentwicklung der Quantenmechanik. Primas stellt besonders die logische Struktur der Quantenmechanik heraus.
- [Rauschenbeutel et al. 2000] A. Rauschenbeutel, G. Nogues, S. Osnaghi, P. Bertet, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, *Science* 288, 2024 (2000).
- [RGG⁴] Religion in Geschichte und Gegenwart, 4. Auflage, Mohr Siebeck (2003)
- [Rothstein 1957] E. L. Hahn, *Am. J. of Phys.* 25, 510 (1957)
- [Sackett et al. 2000] C. A. Sackett, B. Kielpinski, B. F. King, C. Langer, V. Meyer, C. J. Myatt, M. Rowe, Q. A. Turchette, W. M. Itano, D. J. Wineland, C. Monroe, *Nature* 404, 256 (2000).
- [Schrödinger 1926a] Erwin Schrödinger: „Quantisierung als Eigenwertproblem“. Erste Mitteilung, *Annalen der Physik*, 79 (1926), S. 361; Zweite Mitteilung, *Annalen der Physik*, 79 (1926), S. 489; Vierte Mitteilung, *Annalen der Physik*, 81 (1926), S. 109. Bei der Behandlung des Eigenwertproblems für den Wellenoperator erhielt Schrödinger mathematische Unterstützung von Hermann Weyl (Information aus der Quantenmechanik-Vorlesung von Res Jost, ETH-Zürich, 1978/79).
- [Schrödinger 1926b] Erwin Schrödinger: „Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen“. *Annalen der Physik*, 79 (1926), S. 734.
- [Schrödinger 1935/36] E. Schrödinger, *Proc. Camb. Phil. Soc.* 31, 555 (1935) und 32, 446 (1936).
- [Schrödinger 1935] E. Schrödinger, *Die Naturwissenschaften* 48, 807 (1935).
- [Scully/Drühl 1982] M. O. Scully, K. Drühl, *Phys. Rev. A* 25, 2208 (1982).
- [Scully et al. 1991] M. O. Scully, B.-G. Foglert und H. Walther, *Nature* 351, 111 (1991).
- [Shimony 1984] Abner Shimony: „Contextual hidden variables theories and Bell’s inequalities“. *British Journal for the Philosophy of Science* 35 (1984), S. 25.
- [Shor 1995] P. W. Shor, *Phys. Rev. A* 52, R2493 (1995).
- [Specker 1960] E. P. Specker: „Die Logik nicht gleichzeitig entscheidbarer Aussagen“. *Dialectica* 14 (1960), S. 239.
- [Summhammer et al. 1983] J. Summhammer, G. Baldurek, H. Rauch, U. Kischko, A. Zeilinger, *Phys. Rev. A* 27, 2523 (1983).

- [Tegmark 2003] Max Tegmark, „Paralleluniversen“, Spektrum der Wissenschaft August 2003, S. 34-45.
- [Tittel et al. 1998] W. Tittel et al. 1998, Phys. Rev. A57, 3229 (1998); Phys. Bl., Juni 1999, S. 25; W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden und N. Gisin, Phys. Rev. Lett. 81, 3563 (1998).
- [Tittel et al. 1999] W. Tittel et al., Phys. Bl., Juni 1999, S, 25.
- [Tonomura 1998] A. Tonomura, „The Quantum World Unveiled by Electron Waves“, World Scientific 1998.
- [V.d.Waerden 1968] B. L. van der Waerden (Hrsg.), Sources of Quantum Mechanics, Dover, New York, 1968, S. 98.
- [Varadarajan 1968] V. S. Varadarajan, Geometry of Quantum Theory, I, II, Van Nostrand Company, Princeton, New York (1968, 1970). 2. Auflage Springer-Verlag, New York (1985)
- [Von Neumann 1928] J. von Neumann, Compositio Mathematica 6, 1 (1928)
- [Von Neumann 1932] J. von Neumann, Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Springer, Berlin (1932).
- [Weihs et al. 1998] G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter und A. Zeilinger, Phys. Rev. 81. 5039 (1998).
- [Weinfurter 2000] H. Weinfurter in „Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics“ Vol. 46. S. 489 (2000), hrsg. von B. Bederson und H. Walther.
- [Weizsäcker 1971] Carl Friedrich von Weizsäcker, Die Einheit der Natur, Carl Hanser Verlag, München (1971).
- [Welsh 1988] D. Welsh, Codes and Cryptography, Oxford UP, Oxford 1988.
- [Wheeler 1983] A. Wheeler, W. H. Zurek (Hrsg.), „Quantum Theory and Measurement“. Princeton University Press, Princeton 1983.
- [Wooters/Zurek 1982] W. K. Wootters und W. H. Zurek, Nature 299, 802 (1982)
- [Zeilinger 2000] A. Zeilinger, „The Quantum Centennial“, Nature, Bd.408, S. 639 (December 2000).

8.2 Die ältere, vorläufige Quantentheorie

8.2.1 Die Ultraviolett-Katastrophe

[3]: ... Klassische Mechanik und Elektrodynamik trieben die industrielle Revolution voran, und anscheinend vermochten ihre Grundgleichungen alle physikalischen Systeme zu beschreiben. Nur ein paar lästige Details trübten das Bild. Zum Beispiel passte keine Formel auf das gesamte Strahlungsspektrum eines glühend heißen Objekts. Tatsächlich wurde die klassische Vorhersage sogar Ultraviolett-Katastrophe genannt: Ihr zufolge hätte beim Betrachten einer Herdplatte intensive Ultraviolett- und Röntgenstrahlung das Augenlicht gefährden müssen.

8.2.2 Planck 1900 und die Quantenhypothese

[3]: In seiner Arbeit von 1900 gelang Planck die Herleitung des korrekten Spektrums - allerdings um den Preis einer derart bizarren Annahme, dass er sich viele Jahre lang von ihr distanzierte: Energie werde nur in bestimmten Portionen oder „Quanten“ emittiert. Doch diese seltsame Annahme erwies sich als äußerst erfolgreich.

8.2.3 Einstein 1905 und der Photoeffekt

[3]: Im Jahre 1905 trieb Einstein die Idee einen Schritt weiter. Indem er annahm, Strahlung könne Energie nur in solchen Stücken oder „Photonen“ transportieren, erklärte er den photoelektrischen Effekt, der bei den Vorgängen in heutigen Solarzellen und Bildsensoren in digitalen Kameras eine zentrale Rolle spielt.

8.2.4 Rutherford 1911 und das schlimmste quantitative Versagen in der Geschichte der Physik

[3]: Im Jahre 1911 geriet die Physik in eine weitere große Verlegenheit. Ernest Rutherford hatte überzeugend dargelegt, dass die Atome aus Elektronen bestehen, die einen positiv geladenen Kern umkreisen - ganz ähnlich einem winzigen Sonnensystem. Doch gemäß der Theorie des Elektromagnetismus müssten die umlaufenden Elektronen ihre Energie kontinuierlich abstrahlen und binnen einer billionstel Sekunde in den Kern stürzen. Natürlich sind Wasserstoffatome in Wahrheit äußerst stabil. In der Tat war diese Diskrepanz das schlimmste quantitative Versagen in der Geschichte der Physik: Die Lebensdauer von Wasserstoff wurde damit um rund vierzig Größenordnungen unterschätzt.

8.2.5 Bohr 1913 und der Widerspruch zur Elektrodynamik

[3]: 1913 lieferte Niels Bohr, der an die Universität Manchester gekommen war, um mit Rutherford zu arbeiten, eine Erklärung, die wiederum Quanten benutzte. Er postulierte, dass der Bahndrehimpuls der Elektronen nur bestimmte diskrete Werte annehmen darf, wodurch den Elektronen nur gewisse Bahnradien erlaubt sind. Die Elektronen können demnach nur Energie abstrahlen, indem

sie aus einer solchen erlaubten Bahn zu einer niedrigeren springen und dabei ein einzelnes Photon abgeben. Weil ein Elektron auf der innersten Bahn keine Bahnen noch tieferer Energie vorfindet, auf die es springen könnte, bildet es ein stabiles Atom.

[3]: Bohrs Theorie erklärte auch viele Spektrallinien des Wasserstoffs - die spezifischen Frequenzen, die von angeregten Atomen emittiert werden. Sie funktionierte auch für das Heliumatom, aber nur, wenn das Atom eines seiner beiden Elektronen beraubt war. Nach Bohrs Rückkehr nach Kopenhagen schrieb ihm Rutherford, er müsse seine Resultate veröffentlichen. Bohr schrieb zurück, niemand würde ihm glauben, wenn er nicht die Spektren aller Elemente erkläre. Rutherford antwortete: „Bohr, Du erklärst Wasserstoff und Du erklärst Helium, und jeder wird Dir alles Übrige glauben.“

[7]: Das Bohrsche Atommodell konnte neue Bereiche der physikalischen Erfahrung erklären, stand aber in unversöhnlichem Widerspruch zu der durch physikalische Erfahrung ebenfalls glänzend bestätigten Elektrodynamik. Dies zeigt das Ausmaß der Krise, in der sich die Physik im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts befand.

8.3 Der Durchbruch: Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger, Pauli 1925/26

8.3.1 Heisenbergs nichtkommutative Mechanik 1925

[7]: Der Durchbruch zu einer schlüssigen Theorie gelang 1925 Werner Heisenberg [[Heisenberg 1925](#)], Schüler von Bohr und Born. Indem er versuchte, die beobachtbaren Größen zu verknüpfen und beispielsweise den klassischen Begriff einer Bahn zu vermeiden, gelangte er zu einer nichtkommutativen Matrixmechanik. Die Intuition Heisenbergs ist umso bemerkenswerter als ihm zum damaligen Zeitpunkt der mathematische Begriff der Matrix noch nicht geläufig war [[Einstein/Born 1916-1955](#), S. 94].

[8, S. 321]: Faktisch kannten wir damals und kennen wir heute keine Gültigkeitsgrenzen der Quantentheorie. Heisenbergs erste Arbeit zur Quantenmechanik bezeichnet schon in ihrem Titel als den Punkt ihrer Abweichung von der klassischen Physik die Kinematik; also nicht erst dynamische Gesetze der Bewegung, sondern die Beschreibung der Bewegung selbst.

8.3.2 Borns und Jordans Matrixalgebra 1925

[7]: Max Born und Pascual Jordan [[Born/Jordan 1925](#)] schrieben Heisenbergs neue Theorie in einer mathematischen Standardform explizit als eine Matrixalgebra nieder. [6]: Van der Waerden [[V.d.Waerden 1968](#)] schreibt: „Die Hauptideen in der Born-Jordan Arbeit sind

- Interpretation von Heisenbergs symbolischer Multiplikation als Matrix Multiplikation,
- Die Formel für $\mathbf{pq} - \mathbf{qp}$,
- Jordans Beweis dieser Formel, basierend auf der Berechnung der Ableitung von $\mathbf{pq} - \mathbf{qp}$ nach der Zeit,

- Beweis der Erhaltung der Energie nach derselben Methode,
- Beweis der Bohrschen Frequenzbedingung,
- Quantisierung des elektromagnetischen Feldes, indem man seine Komponenten als Matrizen betrachtet,
- Basierend auf dieser Quantisierung Rechtfertigung der Heisenbergschen Annahme, dass die Quadrate der Absolutwerte der Matrixelemente, die die elektrischen Momente eines Atoms repräsentieren, die Übergangswahrscheinlichkeiten bestimmen.“

Von diesen fundamentalen Ideen stammen die ersten beiden von Born und die letzten fünf von Jordan. Paradoxerweise ist der Name Jordan nicht mit der kanonischen Vertauschungsrelation, aber doch wenigstens mit der Algebra bleibend verknüpft.

8.3.3 Paulis Wasserstoff-Spektrum 1926

[7]: Wolfgang Pauli gelang mit der neuen Formulierung die vollständige Beschreibung des Spektrums des Wasserstoffatoms [Pauli 1926], was die physikalische Bedeutung der neuen Matrizen eindrucksvoll demonstrierte.

8.3.4 Schrödingers Wellenmechanik 1926

[7]: Eine Wellenmechanik der Quantentheorie entwickelte Erwin Schrödinger wenig später [Schrödinger 1926a]. Er konnte auch zeigen, dass sie zur Heisenberg-Born-Jordanschen Matrixformulierung mathematisch äquivalent ist [Schrödinger 1926b]. Seine ursprüngliche Absicht, die quantenmechanische Wellenfunktion, die ψ -Funktion, als eine Materiewelle zu deuten, lässt sich nicht realisieren.

8.3.5 Eine abweichende Darstellung der Historie

[3]: Im Jahre 1923 schlug Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit eine Antwort vor: Elektronen und andere Teilchen verhalten sich wie stehende Wellen, die - wie die Schwingungen einer Gitarrensaite - nur mit bestimmten diskreten, das heißt quantisierten Frequenzen auftreten können. Die Idee war so ungewöhnlich, dass das Prüfungsgremium sich externen Rat holte. Als Einstein gefragt wurde, gab er ein positives Urteil ab, und die Dissertation wurde akzeptiert. Im November 1925 hielt Erwin Schrödinger in Zürich ein Seminar zu de Broglies Arbeit ab. Nachher fragte Peter Debye: Sie sprechen über Wellen, aber wo ist die Wellengleichung? Daraufhin entwickelte Schrödinger die nach ihm benannte Gleichung und stieß damit das Tor zu einer neuen Physik auf. Ungefähr zur selben Zeit lieferten Max Born, Pascual Jordan und Werner Heisenberg eine äquivalente Formulierung mittels Matrizen.

8.3.6 Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation 1926

[3]: Born erkannte, dass die Wellenfunktion über Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden sollte. Wenn die Experimentalphysiker den Ort eines Elektrons messen, hängt die Wahrscheinlichkeit, es in einem bestimmten Gebiet finden,

vom dort gültigen Wert der Wellenfunktion ab. Dieser Interpretation zufolge enthalten die Naturgesetze ein fundamentales Element des Zufalls.

[7]: Die von Max Born 1926 eingeführte [Born 1926; Born 1927] statistische Interpretation der Quantenmechanik ist die Grundlage der sogenannten „Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik“, wie sie vor allem auch von Niels Bohr, Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli vertreten wurde [Primas 1981]. Die statistische Interpretation der Quantentheorie versucht, die Wellenvorstellung mit der Teilchenvorstellung zu vereinbaren. Das Verhalten des einzelnen „Teilchens“ ist zufällig. Das Verhalten der statistischen Probe ist im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie gesetzmäßig und führt zu den typischen Wellenphänomenen.

[7]: Der „Referent“ der statistischen Interpretation, d.h. der Gegenstand der Beschreibung ist die statistische Gesamtheit, d.h. die statistische Probe, das statistische „Ensemble“. Die statistische Interpretation schließt damit eine individuelle Interpretation aus, die auf ein einzelnes Objekt Bezug zu nehmen in der Lage ist. Der modernen Experimentalphysik ist es aber inzwischen möglich, auch mit einzelnen Quantenobjekten zu experimentieren [Aspect et al. 1982], beispielsweise mit einem einzelnen Photon. Eine statistische Interpretation läuft für solche Fälle ins Leere.

8.3.7 Ergebnis

[2]: In hundert Jahren hat sich die Quantenmechanik zu einer äußerst erfolgreichen und vermutlich universell gültigen physikalischen Theorie entwickelt.

[1]: Die Quantenphysik hat sich heute in vielen Bereichen der Physik in hervorragender Weise bewährt, und Tests mit höchster Präzision bestanden.

[2]: Als nach vielen Jahren von immer komplizierter werdenden und zugleich unbefriedigenden Versuchen, das Bohrsche Atommodell und die Atomspektren theoretisch zu verstehen - der lange und immer schwieriger werdende Weg der älteren, vorläufigen Quantentheorie ist sehr genau dargestellt in [Hund 1984] - in den Jahren 1925 und 1926 von Heisenberg und Schrödinger die Quantenmechanik gefunden wurde, da muss diese Entdeckung wie ein Befreiungsschlag gewirkt haben. Zusammen mit der von Born vorgeschlagenen Interpretation war es auf einmal möglich, alle atomphysikalischen Vorgänge theoretisch richtig zu berechnen.

8.3.8 Interpretationsprobleme - Überblick

[2]: Allerdings hatte die neue Theorie, und das bemerkte man sehr bald, ihren Preis. Die von der Quantentheorie beschriebene und berechenbare Realität zeigte sehr merkwürdige Eigenschaften. Gemessen an der klassischen Mechanik erwies sich die für alle konkreten Fragen so erfolgreiche neue Theorie zugleich als sehr seltsam und erschreckend hinsichtlich des Bildes einer physikalischen Realität, das sie vermittelt. In den ersten Jahrzehnten der neuen Theorie ging es - anders als am Ende des 20. Jahrhunderts - darum, diese Schrecken der Quantenphänomene zu bannen.

[Weizsäcker 1971, S. 226]: Nachdem Bohr zu einem Kongreß positivistischer Philosophen gesprochen hatte, war er tief enttäuscht, weil sie alles, was er über die Quantentheorie gesagt hatte, so freundlich entgegengenommen hatten, und sagte uns: „Wem nicht schwindlig wird, wenn er zum erstenmal vom Wirkungsquantum hört, der hat überhaupt nicht verstanden, wovon die Rede ist.“ Sie akzeptierten die Quantentheorie als ein Ergebnis der Erfahrung, denn es war ihre Weltanschauung, Erfahrung zu akzeptieren; Bohrs Problem war aber gerade, wie so etwas wie das Wirkungsquantum denn überhaupt eine Erfahrung sein kann.

[3]: Keine physikalische Theorie ist präziser - und keine wirft zur Frage, was da eigentlich gemessen wird, ähnlich knifflige Interpretationsprobleme auf.

[1]: Die Quantenphysik widerspricht in vielen Bereichen der Intuition, und deshalb wurde in der Vergangenheit immer wieder ihre Vollständigkeit infrage gestellt und eine Ergänzung gefordert. Dies hat neben der Diskussion der philosophischen Grundsatzfragen auch zu vielen Gedankenexperimenten geführt; ferner wurden Paradoxa aufgezeigt und diskutiert. Außerdem zeigt sich, dass die Besonderheiten der Quantenphysik zu interessanten Anwendungen führen.

- Unbestimmtheiten: Die aus der Mechanik vertrauten fundamentalen, kanonisch konjugierten Observablen Ort und Impuls lassen sich nicht mehr gemeinsam einem Objekt zuordnen. \Rightarrow Die strenge Determinierung klassisch mechanischer Vorgänge geht verloren.
- Quantenmechanische Superpositionsregel \Rightarrow Verletzung des „Tertium non datur“, Schrödingers Katze
- Unmöglichkeit von „Verborgenen Variablen“
- Geisterhafte Fernwirkungen (Nichtlokalität, EPR-Paradoxon) \Rightarrow Unmöglichkeit, einzelne Objekte zu individualisieren.
- Teleportation von Quantenzuständen (wobei es unmöglich ist, Quanten-Information zu kopieren)

[1]: Zahlreiche Grundlagenexperimente haben die sonderbare Natur der Quantenphysik bestätigt: von Schrödingers Katze bis zur Quantenteleportation.

[1]: Die Entwicklung der Experimentalphysik, insbesondere in der Quantenoptik, hat dazu geführt, dass in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Experimente zu den Grundlagen der Quantenphysik durchgeführt wurden. Dazu gehören Gedankenexperimente aus den Anfängen der Quantenmechanik ebenso wie neue Tests der Grundlagen. Inzwischen ist absehbar, dass typische Quantenphänomene z. B. in der Kommunikation oder in der Rechner-technik von Bedeutung sein werden. Die dabei zu Grunde liegenden Phänomene sind gerade diejenigen, die zu Beginn der Quantenphysik viele Diskussionen ausgelöst haben.

[3]: Jetzt zeichnet sich unter dem Begriff „Dekohärenz“ eine schlüssige Lösung dieser kniffligen Interpretationsprobleme ab. (Siehe auch [Zeilinger 2000; Kragh 2000; Kleppner/Jackiw 2000])

8.4 Geschichte der Deutung bis 1932

8.4.1 Zufall und Welle-Teilchen-Dualität am Beispiel eines Photonexperimentes mit Schattenwurf

1. Experimentelle Anordnung

Wir beleuchten eine Photoplatte mit einer Lichtquelle. Wir führen in den Lichtstrahl eine (keilförmige) Abdeckung so ein, dass eine Hälfte der Photoplatte (bzw. des Leuchtschirms) weiterhin von der Lichtquelle beleuchtet bleibt, die andere Hälfte jedoch in den Schatten zu liegen kommt. Die spitze Kante des Abdeckungskeils, der die Schattengrenze erzeugt, soll so scharf sein, dass der größte vorkommende Krümmungsradius deutlich kleiner ist als die Wellenlänge des verwendeten Lichts, also beispielsweise 10^{-4} mm. Die Leistung der Lichtquelle wird so weit heruntergefahren, dass das Auftreffen einzelner Photonen auf dem Leuchtschirm beobachtet werden kann ([7]).

2. Beobachtungen

- (Teilchen) Aufblitzende Punkte auf dem Leuchtschirm deuten auf eine Lokalisierung hin, wie wir das von klassischen Teilchen (z.B. Billardkugeln) erwarten.
- (Welle) Es werden nicht nur Stellen im unbedeckten Teil der Photoplatte geschwärzt, sondern auch solche im Schattenbereich der Abdeckung. Frei fliegende klassische Teilchen bewegen sich auf einer geradlinigen Bahn. Sie können nicht um die Ecke fliegen, wie scheinbar diejenigen Photonen, die im geometrischen Schattenraum auftreffen. Dagegen breitet sich eine Welle, die auf ein Hindernis wie die Kante unserer Abdeckung trifft, vom Hindernis aus in alle ihr zugänglichen Richtungen und damit auch in den Schattenraum hinein aus. Ein typisches Beispiel für ein solches Wellenverhalten ist eine Schallquelle, die wir auch hinter einem Hindernis hören können, das uns die direkte Sicht zur Quelle versperrt. Die Schallwellen werden an den Kanten des Hindernisses gebrochen und können über diesen geometrischen Umweg unser Ohr erreichen.
- (Zufall) Die Punkte, an denen Photonen auf der Photoplatte auftreffen und die winzigen lichtsensiblen Kristalle schwärzen, lassen sich nicht voraussagen, selbst wenn wir den benutzten Lichtweg durch weitere Blenden zwingend eingrenzen. Die Auftreffpunkte der Photonen ergeben sich offenbar völlig zufällig.

Das Experiment zeigt das Teilchen- und das Wellenverhalten eines Photons. Und es zeigt den Verlust des Begriffs einer determinierbaren räumlichen Bahn. Wenn allerdings eine große Zahl von Photonen im Laufe der Zeit auftritt, bzw. wenn die Intensität des Lichtstrahls groß ist und damit ebenfalls eine große statistische Probe vorliegt, verhalten sich die Photonen nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit.

Die statistische Interpretation der Quantentheorie versucht, die Wellenvorstellung mit der Teilchenvorstellung zu vereinbaren. Das Verhalten des einzel-

nen Teilchens ist zufällig. Das Verhalten der statistischen Probe ist im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie gesetzmäßig und führt zu den typischen Wellenphänomenen.

8.4.2 Komplementarität

[2]: Niels Bohr war von Anfang an um Schadensbegrenzung bemüht. Schon Heisenberg hatte in seinen ersten Publikationen sehr vorsichtig argumentiert und betont, dass er sich nur auf beobachtbare Größen beziehe und Beziehungen zwischen diesen aufstellen wolle. Diesem Gedankengang folgte auch Bohr, als er 1927 in seiner *Como-Vorlesung* [Bohr 1927/28] das Komplementaritätsprinzip formulierte: Ort und Impuls können deshalb nicht gemeinsam und simultan an einem Objekt festgestellt werden, weil die Messgeräte für Ort und Impuls sich gegenseitig ausschließen.

[7]: Wellen- und Teilchenbild schließen einander nicht aus. Sie schränken sich zwar gegenseitig ein, aber sie bedingen einander. Sie sind eben „komplementär“. Das „Sowohl als auch“ der beiden Bilder ist die dialektische Vermittlung von These und Heterothese. Ist das Wellenbild die These, so ist das Teilchenbild die andere These. Die Synthese liegt im Aushalten der produktiven Spannung von These und Heterothese.

8.4.3 Die Heisenbergsche Unschärferelation

[2]: In seiner *Unschärferelation* hat Heisenberg diesen Gedanken noch präzisiert und zugleich abgemildert: Je genauer man eine der beiden Observablen messen kann, umso ungenauer ist die jeweils andere Observable messbar, wobei das Produkt der geeignet definierten Unschärfen größer als die Plancksche Konstante \hbar sein muss. [7]: Die „Heisenbergsche Unschärferelation“ leistet also eine quantitative Vermittlung zwischen den beiden Bildern.

[7]: Bei ihrer Ableitung [Heisenberg 1927] ging Heisenberg der Frage nach, wie die „Bahn“ eines Elektrons in der sogenannten „Wilsonschen Nebelkammer“ mit der Matrixformulierung der Quantenmechanik, der die räumliche Bahn eines Teilchens eigentlich fremd ist, vereinbart werden kann. Heisenberg untersuchte den Messprozess zur Bahnbestimmung des Elektrons unter Verwendung kurzweiliger elektromagnetischer Strahlung (γ -Strahlen-Mikroskop). Dabei kommt er zum Schluss, dass der Ort desto genauer bestimmt ist, je ungenauer der Impuls bekannt ist und umgekehrt. Das Produkt aus Ortsunschärfe und Impulsunschärfe kann nicht kleiner werden als die Plancksche Konstante dividiert durch 4π . Bohr war mit Heisenbergs quantitativer Analyse einverstanden, nicht jedoch mit dem begrifflichen Ansatz. Für Bohr liegt die Natur der Unschärferelation im Welle-Teilchen-Dualismus selbst, also in der Struktur der Quantenmechanik und nicht im Messprozess. In ihrer Auseinandersetzung versuchte Bohr, Heisenberg von der Publikation seines Artikels abzuhalten. Bohrs Druck war so stark, dass Heisenberg schließlich in Tränen ausbrach (Heisenberg berichtete darüber Max Jammer [Jammer 1974, insbesondere S. 65] in einem Interview am 23. Februar 1963, ein Vierteljahr nach Bohrs Tod). Die Tatsache, dass die Unschärferelation unter Verwendung der sogenannten „Cauchy-

Schwarzschen Ungleichung“, einem bekannten mathematischen Standardinstrument, direkt aus der Vertauschungsrelation zwischen Orts- und Impulsoperator folgt, gibt dem Verständnis Bohrs recht. Jüngste Experimente zeigen explizit, dass die eigentliche Störung durch die Messung weit unter die quantenmechanische Unschärfe gedrückt werden kann [Dürr et al. 1998].

[7]: Die Quantentheorie vermittelt komplementäre Beschreibungen am selben Gegenstand gleichzeitig. Die für die physikalische Naturbeschreibung uneingeschränkt gültige Komplementarität von Wellenbild und Teilchenbild drückt sich mathematisch in der Vertauschungsrelation zwischen Orts- und Impulsoperator aus. Die Vertauschungsrelation stellt eine nicht abschaltbare Zwangsbedingung zwischen den beiden Operatoren und damit zwischen Wellen- und Teilchenbild dar. Die beiden Operatoren, die beiden Bilder sind korreliert: sie beziehen sich aufeinander und schränken einander ein. Wellenbild und Teilchenbild sind nicht zwei voneinander unabhängige freie Beschreibungsweisen. Denn die Vertauschungsrelation lässt nicht zwei, sondern nur einen „Freiheitsgrad der Beschreibung“ zu. Sie regelt Mischbeschreibungen aus Anteilen von Wellenbild und Teilchenbild, die zur Heisenbergschen Unschärferelation Anlass geben. Wenn beispielsweise ein konkretes Quantenobjekt zu 70% das Wellenbild realisiert, kann es gleichzeitig in einem Umfang von 30% Teilchenqualitäten ausdrücken.

[1]: Ein weiteres Phänomen, das von Anfang an bei der Entwicklung der Quantenphysik eine große Rolle gespielt hat, ist der Teilchen-Welle-Dualismus. Hiernach zeigt ein Quantenobjekt je nach Beobachtung entweder Wellen- oder Teilcheneigenschaften. Diese Diskussion wurde im Allgemeinen anhand des Youngschen Zweispalt-Interferenzexperiments geführt. Die Wellennatur gibt zur Interferenz Anlass, während das Wissen um den genauen Weg des Objekts den Teilchencharakter betont, wobei die Interferenzen verschwinden. Der entscheidende Punkt dabei ist, dass aufgrund der Komplementarität entweder nur das eine oder das andere beobachtet werden kann, aber nie beide Eigenschaften zusammen. Auch über dieses Thema haben Einstein und Bohr viel diskutiert, mit dem damaligen Fazit, dass die Heisenbergsche Unschärferelation verhindert, den Weg eines Teilchens zu bestimmen, ohne die Interferenz zu zerstören. Demnach führt die Festlegung des Weges, d. h. des Ortes des Teilchens, zu einer Verhinderung seines Impulses, was ein Ausschmieren der Interferenzen zur Folge hat [Bohr 1949].

8.4.4 Das Quantenrätsel der Superpositionen

[3]: Die Entwicklung einer Wellenfunktion gemäß der Schrödinger-Gleichung ist kontinuierlich und glatt („unitär“) und hat mehrere höchst attraktive Eigenschaften. Diese unitäre Entwicklung erzeugt Superpositionen, d.h. die Wellenfunktionen können Kombinationen unterschiedlicher Zustände beschreiben. Zum Beispiel kann ein Elektron als Superposition mehrerer Ortszustände existieren.

[3]: Eine fallende Spielkarte illustriert das „Quantenrätsel der Superpositionen“: Der Quantenphysik zufolge fällt eine idealisierte Spielkarte, die hochkant ausbalanciert wurde, in beide Richtungen zugleich um: Sie bildet eine

so genannte Zustandsüberlagerung oder Superposition. Die Wellenfunktion der Karte verändert sich kontinuierlich vom ausbalancierten Zustand zu einem mysteriösen Endzustand, der zu besagen scheint, dass die Karte an zwei Orten gleichzeitig liegt. In der Praxis ist dieses Gedankenexperiment mit Spielkarten unmöglich, aber die analoge Situation ist mit subatomaren Teilchen und kompletten Atomen unzählige Male demonstriert worden. Die Bedeutung solcher Superpositionen ist ein hartnäckiges Rätsel der Quantenmechanik - und ebenso die Frage, warum wir in der Alltagswelt niemals etwas dergleichen sehen. Im Laufe der Jahre haben die Physiker mehrere konkurrierende Ideen zur Lösung des Rätsels entwickelt, insbesondere

- die Kopenhagener Deutung,
- die Vielwelten-Interpretation und
- die Dekohärenz-Theorie.

8.4.5 Die Kopenhagener Deutung

- Grundidee: Beobachter sehen ein Zufallsergebnis; die Wellenfunktion gibt die bei der Beobachtung auftretende Wahrscheinlichkeit an.
- Vorteil: Ein einziges Ergebnis tritt ein, das dem entspricht, was wir beobachten.
- Problem: Diese Deutung erfordert den „Kollaps“ der Wellenfunktion, doch es gibt keine Gleichung, die angibt, wann er eintritt. ([3])

[2]: Die von Bohr vorgenommene Beschränkung auf beobachtbare Größen ist immer von der Vorstellung begleitet, dass die Messgeräte selbst nicht der Quantenwelt angehören, sondern klassisch-physikalische Gegenstände sind, die den bekannten Gesetzen der klassischen Physik gehorchen. Durch diese Annahme gelang es Bohr, alle Resultate der neuen Quantenmechanik durch klassisch-physikalische Begriffe und Daten auszudrücken. Aus diesem Grunde hat er später, als die Idee einer Quantenlogik schon diskutiert wurde, auch ausdrücklich betont, dass die Beschreibungsmittel der quantenmechanischen Ergebnisse stets die gewöhnliche Umgangssprache und die klassische Logik seien [Bohr 1948]. Diese dualistische Deutung setzt die Aussagen der quantenphysikalischen Theorie in Beziehung zu den Begriffen und Daten der klassisch-physikalischen Beschreibungs- und Untersuchungsmittel.

[3]: Die so genannte Kopenhagener Deutung, die aus Diskussionen zwischen Bohr und Heisenberg gegen Ende der zwanziger Jahre hervorging, versucht das Rätsel der Quantensuperpositionen zu lösen, indem sie behauptet: Die Schrödinger-Gleichung gilt nur, solange ein System unbeobachtet bleibt. Der Akt der Beobachtung oder Messung löst bei der Wellenfunktion des Systems eine abrupte Veränderung aus, die meist „Kollaps“ genannt wird: Der Beobachter sieht das System in einem definierten klassischen Zustand und von da an besteht nur noch dieser Teil der Wellenfunktion weiter. Demnach wählt die Natur einen Zustand nach dem Zufallsprinzip aus, wobei die Wahrscheinlichkeiten durch die Wellenfunktion festgelegt werden.

8.4.6 Kritik an der Kopenhagener Deutung

[3]: Die Kopenhagener Deutung lieferte ein enorm erfolgreiches Rechenrezept, das die experimentellen Resultate richtig wiedergab - aber der Verdacht blieb, dass irgendeine Gleichung angeben sollte, wann und wie dieser Kollaps eintritt. Viele Physiker sahen im Fehlen dieser Gleichung ein Indiz, dass etwas Wichtiges mit der Quantenmechanik nicht stimmt und dass sie bald durch eine fundamentalere Theorie ersetzt würde, die eine solche Gleichung liefern könne.

[10]: Noch im Jahre 2006 sagt Roger Penrose: „...Nun, Sie müssen sich ansehen, was wir über physikalische Gesetze wissen. Unsere heutige Physik ist eine seltsame Mischung aus zwei verschiedenen Vorgehensweisen. Zum einen handelt es sich dabei um die klassische Physik, die sich vereinfacht ausgedrückt mit den großen Objekten beschäftigt. Und dann gibt es noch die Quantenphysik, die komplexer ist - wiederum vereinfacht gesagt. Die Gleichungen der klassischen Physik sind deterministisch, man kann sie von einem Computer berechnen lassen. Dagegen beschreibt die Schrödinger-Gleichung der Quantenphysik nicht, wie sich ein System verhält, dazu muss erst noch ein weiterer Teil der Quantenmechanik hinzukommen - der nicht-deterministische Vorgang des Messens. Aber gemessen wird ja mit einem Apparat, also mit einem physischen Objekt. Warum verhält sich der nicht gemäß der Schrödinger-Gleichung? Das ganze System ist ein Quantensystem, warum verhält es sich nicht gemäß der Schrödinger-Gleichung? Mir scheint, dass etwas fehlt, etwas falsch ist. Denken Sie an das berühmte Gedankenexperiment von Schrödinger, nach dem eine Katze tot und lebendig zugleich ist. Schrödinger selbst fand das lachhaft und dachte, da könne etwas nicht stimmen - auch wenn er es nicht ganz so offen ausgesprochen hat wie ich. Die Quantenmechanik ist in sich nicht konsistent.“

8.4.7 Vorgriff auf die Dekohärenztheorie

[4]: Die Frage, ob das Problem des quantenmechanischen Messprozesses nun endlich gelöst sei, kann man ganz sicher nicht einfach mit „ja“ beantworten. Die Ansicht von Niels Bohr, der Quantenmessprozess sei grundsätzlich nicht physikalisch analysierbar, darf aber heute wohl als widerlegt gelten.

[4]: Die Erfolge der Dekohärenztheorie erlauben es nunmehr, auf unabhängig vorzuziehende klassische Begriffe und auf Verlegenheitsvokabeln wie Komplementarität, Dualismus oder Quantenlogik ganz zu verzichten. ... Der „große Nebel aus dem Norden“, wie man die Kopenhagener Deutung gelegentlich genannt hat, beginnt sich zu lichten. Die sichtbar werdende Landschaft zeigt eine unsere gewohnte Vorstellungswelt weit übersteigende Vielfalt, ergibt dafür aber erstmals ein konsistentes Bild.

[3]: Die Schlussfolgerungen der Dekohärenztheorie rechtfertigen die seit langem geübte Praxis, das Lehrbuch-Postulat vom Kollaps der Wellenfunktion als pragmatisches Rezept - nach der Devise „Halt den Mund und rechne“ - zu benutzen: Berechne Wahrscheinlichkeiten so, als würde die Wellenfunktion kollabieren, wenn das Objekt beobachtet wird. Die Dekohärenz hat eine Wirkung, die einem Kollaps zum Verwechseln ähnlich sieht.

8.5 Erfolge der Quantentheorie

[3]: Statt sich mit ontologischen Spekulationen über diese oder jene Gleichung aufzuhalten, entwickelten die meisten Physiker (nach der Devise „Halt den Mund und rechne“) die vielfältigen aufregenden Anwendungen der Theorie zügig weiter und machten sich an die drängenden ungelösten Probleme der Kernphysik.

8.5.1 Mikroskopische Quanteneffekte

[3]: Binnen weniger Jahre hatten die Physiker unzählige Messungen erklärt. Die pragmatische Einstellung erwies sich als ungeheuer erfolgreich bei

- der Erklärung der Spektren komplizierterer Atome, kleiner Moleküle,
- dem Verständnis chemischer Reaktionen, chemischer Bindung \Rightarrow Quantenchemie,
- der Vorhersage der Existenz von Antimaterie,
- der Erklärung der Radioaktivität \Rightarrow Kernphysik, Nutzung der Kernenergie
- der Erklärung des Verhaltens von Halbleitern \Rightarrow Erfindung des Transistors, Computers
- der Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie \Rightarrow Erfindung des Lasers
- der Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Radiowellen und Atomkernen \Rightarrow Erfindung der Kernspintomographie
- der Erweiterung zur Quantenfeldtheorie \Rightarrow Grundlage der Elementarteilchenphysik bis hin zu den neuesten Experimenten zu Neutrino-Oszillationen, zur aktuellen Suche nach dem Higgs-Teilchen und zur Supersymmetrie.

8.5.2 Makroskopische Quanteneffekte

[2]: Die Anwendbarkeit der Quantenmechanik auf makroskopische Phänomene war im Grunde schon von J. von Neumann in seiner Quantentheorie der Messung [Von Neumann 1932] behauptet worden, die konkrete Berechenbarkeit und die experimentelle Bestätigung war aber erst drei Jahrzehnte später möglich geworden, z.B. die Berechnung

- der Superfluidität,
- der Supraleitung,
- des quantisierten Flusses,
- makroskopischer Tunneleffekte.

8.5.3 Quantenkosmologie

[2]: Noch einen Schritt weiter ging Hartle [Hartle 1968], indem er auf der Grundlage einer Untersuchung von J. von Neumann [Von Neumann 1928] die Quantenmechanik auch auf unendliche Systeme ausdehnte, um damit die Grundlage einer späteren Quantenkosmologie zu schaffen.

8.5.4 Verträglichkeit der Quantentheorie mit der speziellen Relativitätstheorie

[2]: Darüber hinaus zeigte sich in zahlreichen Gedankenexperimenten eine fast merkwürdige Verträglichkeit der neuen Quantenmechanik mit der schon 1905 entstandenen Speziellen Relativitätstheorie. Relativistische Kausalität wird nicht verletzt, d.h. keine Überlichtgeschwindigkeit bei

- dem instantanen Zerfließen von Wellenpaketen,
- dem quantenmechanischen Tunneln ohne Zeitverzögerung,
- nichtlokalen Korrelationen, die in besonders deutlicher Form in dem Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen (EPR, 1935) auftreten,
- dem Klonen einzelner Photonen in dem EPR-Gedankenexperiment. Aufgrund eines wichtigen Theorems [Wooters/Zurek 1982] lassen sich nämlich quantenmechanische Zustände grundsätzlich nicht klonen.

Diese Verträglichkeit der Quantenmechanik an die Erfordernisse der Relativitätstheorie ist umso bemerkenswerter, als beide Theorien völlig unabhängig voneinander entstanden sind. Sie stärkt offensichtlich das Vertrauen in die Quantentheorie.

8.6 Streit um die statistische Interpretation

8.6.1 Einstein 1909

[1]: Einstein äußerte schon 1909 auf der Physikertagung in Salzburg sein Unbehagen darüber, dass in der Quantenphysik der Zufall eine völlig neue Rolle spielt. Die klassische Physik lässt uns vorhersagen, wie ein Ereignis abläuft, wenn wir alle Kräfte kennen. So lässt sich im Prinzip berechnen, ob das berühmte Butterbrot, das vom Tisch fällt, auf der Butter- oder auf der Brotseite am Fußboden ankommt. Anders ist es in der Quantenphysik: Wir können nicht wissen, wann ein Atom aus einem angeregten Zustand in den Grundzustand übergeht, wir können nur die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang angeben. Ebenso lässt sich nicht sagen, ob das nächste Photon, das auf eine Glasplatte tritt, reflektiert oder transmittiert wird. Werden jedoch viele Vorgänge dieser Art untersucht und das Zeitmittel gebildet, so erhält man im Falle der Reflexion das aus den Fresnelschen Formeln berechnete Resultat. Im Falle der Atome ergibt sich die mittlere Lebensdauer, die aus der Übergangswahrscheinlichkeit folgt. Einstein war unzufrieden mit dieser Situation, was ihn zu der vielzitierten Aussage veranlasste: „Gott würfeln nicht“.

8.6.2 Einstein, Planck, Schrödinger 1926, 1929

[7]: Albert Einstein, Max Planck, Erwin Schrödinger und Max von Laue lehnten die statistische Interpretation der Quantentheorie von Anfang an vehement ab [Planck/Hermann 1973, S. 71]. In einem vom 4. Dezember 1926 datierten Brief schreibt Einstein an Born [Einstein/Born 1916-1955]:

„Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt ...“

An dieser Einschätzung hält Einstein fest. In einem Brief vom 7. September 1944 an Born schreibt er [Einstein/Born 1916-1955]:

„... Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an volle Gesetzmäßigkeit in einer Welt von etwas objektiv Seiendem, das ich auf wild spekulativem Wege zu erhaschen suche. Ich glaube fest, aber ich hoffe, dass einer einen mehr realistischen Weg, bzw. eine mehr greifbare Unterlage finden wird, als es mir gegeben ist. Der große anfängliche Erfolg der Quantenmechanik kann mich doch nicht zum Glauben an das fundamentale Würfelspiel bringen, wenn ich auch wohl weiß, dass die jüngeren Kollegen dies als Folge der Verkalkung auslegen. Einmal wird's sich ja herausstellen, welche instinktive Haltung die richtige gewesen ist.“

Planck teilt Einsteins Anliegen. Was Planck am 2. Februar 1929 an Arnold Sommerfeld in München schreibt, vertritt er immer wieder bei öffentlichen Vorträgen [Planck/Hermann 1973]:

„In dem Kampf zwischen Determinismus und Indeterminismus stehe ich entschieden auf Seite des ersteren, da ich der Meinung bin, dass die aufgetauchten Schwierigkeiten im Grunde nur einer unangemessenen Fragestellung entspringen.“

8.6.3 Schrödinger 1926

[7]: Ein bezeichnendes Licht auf die beginnende Kontroverse um die Interpretation der Quantentheorie wirft eine Episode, die Heisenberg berichtet [Heisenberg 1956]: Als Schrödinger im September 1926 einer Einladung Bohrs nach Kopenhagen folgte, gab es zwischen beiden lange und heftige Dispute. Schrödinger erkrankte und musste einige Tage das Bett hüten.. Bohr ließ ihn nicht in Ruhe und diskutierte weiter, bis Schrödinger schließlich entnervt ausrief: „Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich mit der Quantentheorie überhaupt beschäftigt zu haben.“

8.6.4 Einstein und Schrödinger 1935: Die Katze

[1]: Wie bereits oben diskutiert, hing einer der Vorbehalte Einsteins gegenüber der Quantenphysik damit zusammen, dass die Theorie nur eine statistische Beschreibung der Quantenphänomene ermöglicht. Ein angeregtes Atom, das in einen tieferen Zustand zerfallen kann, ist z. B. als eine Überlagerung zwischen der Wellenfunktion des angeregten Zustandes und der des Grundzustandes darzustellen. Prüfen wir den Zustand des Atoms, so finden wir es jedoch entweder im angeregten Zustand oder im Grundzustand und nicht in einer Überlagerung. Erst nach vielen Wiederholungen entsteht eine Verteilung, die durch die Übergangswahrscheinlichkeiten am einzelnen Atom bestimmt wird.

[1]: Einstein hat dieses Paradoxon in einem Brief an Schrödinger vom 8. August 1935 zum Ausdruck gebracht. In diesem Brief hat er das Beispiel von Schießpulver verwendet, das explodieren kann. Es ist entweder noch vollständig vorhanden oder bereits explodiert und kann nicht in einem Zwischenzustand verharren. In seiner Antwort vom 19. August hat Schrödinger dann das in späterer Zeit vielzitierte Bild einer lebenden und einer toten Katze formuliert, deren

Zustand mit dem Zerfall eines Uranisotops gekoppelt ist [Schrödinger 1935/36; Wheeler 1983].

[3]: Schrödinger betonte: Wenn mikroskopische Objekte wie einzelne Atome als seltsame Zustandsüberlagerungen existieren können, dann auch makroskopische Gegenstände, denn sie bestehen doch schließlich aus Atomen. Als drastisches Beispiel wählte er das unterdessen berühmte Gedankenexperiment, bei dem ein heimtückischer Apparat eine Katze genau dann tötet, wenn ein radioaktives Atom zerfällt. Weil das Atom eine Superposition von zerfallen und nicht zerfallen bildet, erzeugt es eine Katze, die als Überlagerung von tot und lebendig existiert.

8.7 Streit um den Realitätsbegriff: EPR

8.7.1 Historie

[1]: Die Diskussionen zwischen Einstein und Bohr haben in der Anfangszeit der Quantenphysik sehr viel zur Klärung der Hintergründe der neuen Theorie beigetragen. Im Rahmen der Diskussion um die Nichtlokalität der Quantenphysik ist später dann das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon 1935 (EPR-Paradoxon) in die Debatte geworfen worden [Einstein/Podolski/Rosen 1935].

[1]: Einstein sprach in diesem Zusammenhang von der „geisterhaften Fernwirkung“. In der Folge des EPR-Gedankenexperiments sind viele Arbeiten zu dieser Thematik publiziert worden.

8.7.2 Motivation

[8, S. 539]: Die Kopenhagener Deutung geht, historisch und sachlich begrifflich, noch von Bohrs Korrespondenzgedanken aus. Die klassische Physik ist vorgegeben. Sie liefert, in unserer Terminologie gesagt, das *Vorverständnis* zur Quantentheorie. In ihrer Sprache beschreibt man die Messungen. Die Kopenhagener Deutung lässt dann die *semantische Konsistenz* der Quantentheorie erkennen. Sie zeigt genau, wie man das Vorverständnis modifizieren, also den Anwendungsbereich der klassischen Physik einschränken muss, damit kein Widerspruch entsteht. Die scheinbaren Paradoxien und Alternativen, die man danach noch diskutiert hat, waren durchgehend Versuche, die Opfer im Vorverständnis, die man dabei bringen musste, wenigstens teilweise wieder rückgängig zu machen. Die Versuche waren erfolglos. Dies war eine wichtige „Trauerarbeit“; es wurde dadurch erst richtig klar, wie tief diese Opfer gehen. Einstein bewährte in dieser Debatte noch einmal seinen überragenden denkerischen Rang. In seinem berühmten Gedankenexperiment mit Podolsky und Rosen arbeitete er präzise den zentralen Punkt des Opfers heraus: den Verzicht auf den Glauben an die objektive Realität der physikalischen Objekte. ... Keine angebotene Rückkehr zu klassischen Prinzipien hat sich durchgesetzt. Der psychologische Sinn des Freudschen Begriffs der Trauerarbeit ist in der Tat, das Geschehene anerkennen zu lernen, seine Härte nicht zu verdrängen and eben dadurch einen Weg in eine andere Zukunft zu bahnen.

[2]: Am Ende des 20. Jahrhunderts haben sich die Probleme verschoben. Anders als in den ersten Jahrzehnten der neuen Theorie geht es nicht mehr darum, die Schrecken der Quantenphänomene zu bannen. Unbestimmtheiten, Tunneleffekte, Nichtlokalität und Teleportation gehören vielmehr zum Alltag des Quantenphysikers. Die Aufreglichkeiten, die man auch heute noch über solche Effekte in der populärwissenschaftlichen Literatur und in der Presse findet, sind nichts als Nachhutgefechte. Das gewachsene Verständnis der Quantentheorie hat vielmehr zu der Einsicht geführt, dass Quantenphysik einfacher und von weniger vorphysikalischen Voraussetzungen abhängig ist als die klassische Physik. Sie ist deshalb auch allgemeiner und gilt nicht nur in der mikroskopischen Physik, sondern auch in der makroskopischen Welt und in der Kosmologie.

[2]: Es geht heute nicht mehr darum, Quantenphänomene aus der Sicht der klassischen Physik verständlich zu machen. Das ungelöste, heutige Problem ist vielmehr die klassische Physik selbst. Wie ist es möglich, dass es so etwas wie die uns vertraute, heile Welt der klassischen Physik überhaupt gibt? Auf diese Frage konnte eine überzeugende und befriedigende Antwort bislang nicht gefunden werden.

[2]: Wenn nicht ein völlig neues, aus heutiger Sicht überraschendes Erklärungsmodell für die klassische Welt gefunden wird, dann deutet sich eine, zumindest ontologisch sehr unschöne Lösung an: Die Welt der klassischen Physik könnte eine in allen praktischen Fällen bewährte, aber nur näherungsweise richtige Idealisierung, d. h. letztlich eine Illusion sein.

[8, S. 544]: Einstein hat dieses berühmte Gedankenexperiment entworfen, *nachdem* er die innere Widerspruchsfreiheit der Quantentheorie anerkannt hatte. Es sollte also nicht die Quantentheorie immanent widerlegen, sondern ihre Konsequenzen bezüglich des Realitätsbegriffs so ans Licht stellen, dass klar wurde, warum Einstein eine solche Theorie nicht als endgültig zu akzeptieren bereit war.

8.7.3 Das Gedankenexperiment

[8, S. 544]: Die Autoren EPR betrachten zwei Körper X_1 und X_2 , die zu einer Zeit t_0 miteinander wechselwirken und sich nachher um einen sehr großen Abstand voneinander entfernen, sagen wir um den Abstand der Erde vom Sirius. Während sie beieinander in direkter Wechselwirkung standen, wurden zwei miteinander vertauschbare Observable des aus X_1 und X_2 bestehenden Gesamtobjekts gemessen, z. B. ihr Abstand in einer Richtung $x_1 - x_2$ und ihr Gesamtimpuls in derselben Richtung $p_1 + p_2$. Nach ihrer weiten Trennung messen wir zur Zeit t_1 an dem Objekt X_1 , von dem wir annehmen, es sei auf der Erde angekommen, *entweder* den Wert von x_1 *oder* den Wert von p_1 . In einem zulässigen Lorentzschen Bezugssystem, z.B. dem Ruhesystem des gemeinsamen Schwerpunkts beider Objekte, misst ein Beobachter auf dem Sirius, in einem in diesem Bezugssystem mit t_1 gleichzeitigen Augenblick, am Objekt X_2 , *entweder* x_2 *oder* p_2 . Kein physisches Signal kann das Messresultat von der Erde zum Sirius bringen, ehe die dortige Messung gemacht ist. Aber, *wenn* an X_1 der Ort x_1 gemessen worden ist, dann kann der Beobachter auf der Erde genau vorhersagen, welchen Ort x_2 der Beobachter auf dem Sirius ihm als gefunden

signalisieren wird, *falls* auch an X_2 der Ort gemessen wurde. *Wenn* aber an X_1 der Impuls p_1 gemessen wurde, so ist umgekehrt gerade der Impuls von X_2 vorhersagbar. Aber gemäß der Quantentheorie kann X_2 nicht zugleich vorher-sagbare Werte von x_2 und p_2 haben.

[1]: Bei einer Variante dieses Gedankenexperiments geht man davon aus, dass zwei Photonen gleichzeitig von einem definierten Quantenobjekt emittiert werden. Aufgrund ihrer Entstehung sind diese Photonen miteinander korreliert. Durch die Polarisationsmessung an einem der beiden Photonen steht dessen Polarisation und die des anderen, gleichzeitig emittierten Photons fest. Dieses Phänomen ist nichtlokal, da nach der Messung an einer Stelle das zu erwartende Ergebnis an einer anderen Stelle vorhergesagt werden kann. Für diese Situation hat Schrödinger später den Begriff der Verschränkung der Photonen eingeführt. Ein solches Ergebnis ist auf der Basis der klassischen Physik nur möglich, wenn verborgene Parameter dafür sorgen, dass die Information der ersten Messung an die andere Stelle transportiert wird.

8.7.4 Unvereinbarkeit mit dem überlieferten Realitätsbegriff

[8, S. 544]: Es war Einstein völlig klar, dass dies keinen logischen Widerspruch innerhalb der Quantentheorie bedeutet. Die zwei Voraussetzungen, dass zur Zeit t an X_1 gerade x_1 oder gerade p_1 gemessen wurde, sind unvereinbar; also kann höchstens eine von beiden erfüllt worden sein. Folglich kann es nicht vorkommen, dass x_2 und p_2 gleichzeitig vorhersagbar werden. Aber das scheinbare Paradox liegt darin, dass die *psi*-Funktion von X_2 am Sirius, eben wegen der Reduktion des Wellenpakets, durch eine Messung an X_1 auf der Erde momentan geändert wird. Der paradoxe Eindruck wird auch nicht aufgehoben, wenn man zugibt, dass die *psi*-Funktion ein Wissenskatalog ist und durch neues Wissen plötzlich geändert werden muss. Denn der Inhalt des Wissens ändert sich in diesem Gedankenexperiment drastisch, in einer Weise, von der Einstein mit Recht sagte, dass sie mit der überlieferten Vorstellung von der physischen Realität unvereinbar ist. Misst man auf der Erde an X_1 den Ort x_1 , so hat X_2 den vorhersagbaren Ort x_2 . Nach der überlieferten Vorstellung von Realität heißt dies, dass X_2 unmittelbar vor der Messung eben diesen Ort hat haben müssen; warum würde er sonst mit Gewissheit gefunden? Beschließt man aber auf der Erde, statt dessen den Impuls p_1 zu messen, so hat X_2 den vorhersagbaren Impuls p_1 . Hatte es auch diesen unmittelbar vor der Messung, so entsteht durch diese Realitätsannahme der Widerspruch gegen die Quantenmechanik, dass x_2 und p_2 zugleich bestimmt sind. Will man die Quantenmechanik aufrechterhalten, so muss man die Realitätsannahme aufgeben.

[8, S. 545]: Es sei um der Klarheit willen betont, dass die Annahme der Wiederholbarkeit einer Messung, die für die Postulate der Quantentheorie unentbehrlich sein dürfte, sehr viel weniger besagt als die soeben eingeführte Realitätsannahme. Die Wiederholbarkeit besagt, dass unmittelbar nach einer wirklich vollzogenen Messung dasselbe Resultat wiedergefunden werden würde, wenn man es kontrollierte. Die Realitätsannahme besagt, dass unmittelbar vor der wirklichen Messung deren Resultat vorgelegen haben muss, unabhängig

davon, ob man es kontrolliert. Auch die rückläufige Konstruktion einer *psi*-Funktion in die Vergangenheit hinein (sog. Retrodiktion) ändert daran nichts. Die rückläufige *psi*-Funktion besagt, dass man unmittelbar vor der Messung dasselbe Resultat gefunden haben muss, falls man damals gemessen hat.

8.7.5 Verzögerte Wahl

[8, S. 545]: Wheeler (1978) nennt den EPR-Versuch ein Gedankenexperiment mit *verzögerter Wahl* (delayed choice). Wir können das wie folgt paraphrasieren. Man kann im Sinne der Quantentheorie der Messung jedes der beiden Objekte X_1 und X_2 als Messapparat für eine Messung an dem andern auffassen. Dann ist ihre Wechselwirkung zur Zeit t_0 schon die Messwechselwirkung. So wie wir das Experiment beschrieben haben, wäre X_1 der Messapparat, X_2 das Messobjekt. Die Messung an X_1 auf der Erde ist dann die Ablesung des Messapparats, welche den Zustand des Messobjekts X_2 auf dem Sirius zu bestimmen gestattet. Die Messung an X_2 auf dem Sirius ist dann nur noch eine Kontrollmessung, deren Ergebnis (wenn beiderseits x oder wenn beiderseits p gemessen wird) bei korrektem Versuchsablauf vorhersehbar ist. Da an X_1 zwischen t_0 und t_1 kein irreversibler Vorgang (insbesondere keine Messung) stattgefunden haben darf, ist X_1 vor der Messung zur Zeit t_1 in einem reinen Quantenzustand. Also kann man bis zur Zeit t_1 warten, ehe man *wählt*, welche Größe man an messen will. Diese verzögerte Wahl der zu messenden Observablen von X_1 entscheidet dann auch, in einem Eigenzustand welcher Observablen sich X_2 finden wird, wenn man die Messung auf dem Sirius kontrolliert. Nach der Realitätsannahme müsste aber X_2 in diesem Zustand von t_0 an gewesen sein. Also würde aus der Realitätsannahme eine *Rückwirkung* der Messung an X_1 zur Zeit t auf den Zustand von X_2 unmittelbar nach t_0 folgen.

Alle diese Folgerungen sind selbstverständlich, wenn man die *psi*-Funktion als *Wahrscheinlichkeitskatalog* deutet. Gesetzmäßig bestimmte Wahrscheinlichkeiten sind stets *bedingte Wahrscheinlichkeiten*. Die verzögerte Wahl der zu messenden Observablen von X_1 ist zugleich die Wahl der *Bedingung*, unter der das Resultat einer Messung an X_2 prognostiziert werden soll, also des statistischen Ensembles, von dem X_2 zur Zeit t_1 als ein Fall gezählt werden soll. Was Einsteins Überlegung an den Tag bringt, ist nur, dass die quantentheoretische Struktur dieses Wahrscheinlichkeitskatalogs (nämlich das Superpositionsprinzip für *psi*) mit der Realitätsannahme unverträglich ist.

8.7.6 Quantenkorrelationen

[7]: Vertauschungsrelationen und sogenannte „Antivertauschungsrelationen“ bestehen zwischen allen Elementarteilchen des Universums. Damit sind alle Elementarteilchen und mithin alle Objekte des Universums miteinander korreliert. Diese „Quantenkorrelationen“ machen die Natur zu einem unteilbaren Ganzen: Die Quantentheorie ist eine „holistische Theorie“.

[7]: Einstein hat auf die äußerst ungewohnten Konsequenzen von Quantenkorrelationen deutlich hingewiesen [Einstein/Podolski/Rosen 1935]. Die Experimente [Aspect et al. 1982], die zeigen, dass eine konsistente physikalische Be-

schreibung mit der Forderung nach gleichzeitiger Gültigkeit von Kausalität, Individualität und Lokalisierbarkeit nicht vereinbar ist, lagen zu Einsteins Lebzeiten noch nicht vor. Für ihn waren alle drei Prämissen unverzichtbare Grundlage jeder physikalischen Theorie. Das natürlichste Opfer, das die aktuelle physikalische Empirie nahelegt, ist die Aufgabe der Lokalisierbarkeit, also eine Kritik des Raumbegriffs. Zum ersten Mal in der Geschichte des menschlichen Denkens wird hier eine metaphysische Behauptung experimentell auf ihre Gültigkeit überprüft, schreibt Max Jammer zu diesen quantenmechanischen Korrelationsexperimenten [Jammer 1975, S. 62]. Abner Shimony [Shimony 1984] führt dafür den Begriff „experimentelle Metaphysik“ ein

8.8 Streit um Verborgene Variable

8.8.1 Motivation

[3]: Viele Physiker hofften noch immer auf eine tiefer liegende Theorie, aus der vielleicht hervorginge, dass die Welt in gewissem Sinne doch klassisch sei - jedenfalls frei von Kuriositäten wie großen Objekten an zwei Orten zugleich. Doch solche Hoffnungen wurden durch eine Serie neuer Experimente zunichte gemacht.

[7]: Die statistische Interpretation der Quantentheorie aus einer fundamentaleren klassischen Theorie abzuleiten, ist mit dem Ansatz verborgener Variablen versucht worden. Wie beispielsweise die sogenannte „Brownsche Bewegung“ eines in einer Flüssigkeit schwimmenden kleinen Teilchens aus der ungeordneten Wärmebewegung der Moleküle erklärt werden kann [Einstein 1905A], soll das Zufallsverhalten von Quantenobjekten durch zugrundeliegende klassische Variablen stochastisch gefasst werden.

[3]: Lässt sich die quantenphysikalische Zufälligkeit vielleicht durch irgendwelche unbekanntes Größen innerhalb der Teilchen - so genannte verborgene Variable - klassisch erklären, das heißt auf deterministische Prozesse zurückführen?

8.8.2 Bellsche Ungleichung

[7]: In den sechziger Jahren entwickelte John Bell ein experimentell überprüfbares Kriterium, die sogenannte „Bellsche Ungleichung“, die die Folgerungen verborgener Variablen zuspitzt [Bell 1964]. Alle dazu vorgenommenen experimentellen Tests widersprechen einer Theorie mit verborgenen Variablen und bestätigen die Quantentheorie [Aspect et al. 1982]. Dieses Resultat besagt, dass es keine Theorie gibt, die Kausalität, Individualität und Lokalisierbarkeit mit den statistischen Voraussagen der Quantenmechanik vereinbaren kann [beispielsweise Primas 1981, S. 110 zusammengefasst]. Ein entsprechendes Resultat lässt sich auch mit den Mitteln der Logik erzielen und lautet: Die Quantenlogik lässt sich nicht in eine klassische Logik einbetten [Specker 1960].

[3]: Wie der damals am europäischen Kernforschungszentrum Cern tätige Theoretiker John S. Bell zeigte, würden in diesem Fall gewisse Ensembles von Messwerten, die in höchst diffizilen Experimenten bestimmt werden könnten, unweigerlich den Vorhersagen der etablierten Quantentheorie widersprechen.

Erst nach vielen Jahren wurden solche Versuche technisch durchführbar; sie schlossen die Existenz von (lokalen) verborgenen Variablen definitiv aus.

[1]: Die erste quantitative Erfassung dieses Problems stammt dann von John Bell, der 1964 zeigte, dass Theorien auf der Basis der verborgenen Parameter und der Lokalität Ungleichungen für die korrelierte Messgrößen erfüllen müssen, die heute die Bellschen Ungleichungen genannt werden [Bell 1964]. Hierbei zeigt sich, dass die Quantenphysik zu wesentlich stärkeren statistischen Korrelationen führt als die klassischen Theorien mit verborgenen Parametern, sodass die Quantenphysik die Bellschen Ungleichungen verletzt. Damit war es erstmals möglich, die philosophischen Grundsatzfragen der Einstein-Bohr-Debatte experimentell zu überprüfen.

8.8.3 Experimente

[1]: Dies führte zu einer Reihe von Experimenten, die den Theorien auf klassischer Basis widersprachen. Den Anfang machten Freedman und Clauser 1972 mit einem Experiment, bei dem die korrelierten Photonen aus einer Zerfallskaskade des Ca-Atoms stammten [Freedman/Clauser 1972]. Die Atome wurden dazu in einen hochangeregten Zustand gebracht, aus dem sie in zwei aufeinander folgenden Zerfallsprozessen in den Grundzustand zurückkehrten. Freedman und Clauser analysierten die Polarisation der verschränkten Photonenpaare. Dieses Experiment litt jedoch ebenso wie die Nachfolgeexperimente unter der geringen Intensität, die durch die Anregung mit Entladungslampen oder Bogenlampen bedingt war. Einen gewissen Durchbruch erzielte Aspect, der mithilfe von Lasern eine wesentlich intensivere Anregung der Atome erreichen konnte [Aspect et al. 1982]. Einen Überblick über die ersten Experimente findet man in [Pipkin 1978]. Eine neue Generation von Experimenten wurde erschlossen, als es gelang, mit optisch parametrischen Prozessen verschränkte Photonenpaare zu erzeugen [Alley/Shih 1987; Ou/Mandel 1988]. Diese Experimente lassen erheblich höhere Zählraten zu, was die Messzeiten wesentlich verkürzt [Kwiat et al. 1995; Kwiat et al. 1998]. Mit diesen Anordnungen konnten deshalb sogar Photonenkorrelationen über große Entfernungen (mehrere hundert Meter) nachgewiesen werden [Weihs et al. 1998; Tittel et al. 1998]. Auf diese Verfahren werden wir in anderem Zusammenhang zurückkommen.

[1]: Allerdings haben die Experimente noch Unzulänglichkeiten. Sie zeigen zwar, dass die Bellschen Ungleichungen verletzt sind, schließen aber die Theorien auf der Basis verborgener Parameter noch nicht mit völliger Sicherheit aus. Eines der verbleibenden Schlupflöcher ist die geringe Nachweiswahrscheinlichkeit der korrelierten Photonen, die weit unter 100 % liegt. Aus diesem Grunde versucht man, EPR-Experimente mit Atomen durchzuführen: Atome können mit der Wahrscheinlichkeit 1 nachgewiesen werden. Bei einem dieser Experimente dissoziiert man dimere Quecksilbermoleküle aus einem definierten Zustand des Hg₂-Moleküls und misst die Spinorientierung der beiden verschränkten Atome [Fry et al. 2000].

[1]: Ein ganz anderer Test der verborgenen Parameter ist von Greenberger, Horn und Zeilinger 1989 vorgeschlagen worden [Greenberger et al. 1989]. Dieses Konzept basiert auf der Verschränkung von drei Teilchen. Die Au-

toren haben gezeigt, dass klassische Theorien nicht die starken Korrelationen vorhersagen können, die sich in diesem Fall aufgrund der Quantentheorie ergeben. Um Theorien verborgener Parameter definitiv auszuschließen, genügt eine einzige Messung, die die starke Korrelation nachweist. Allerdings ist es schwer, drei Teilchen zu verschränken. Derzeit laufen verschiedene Versuche in dieser Richtung. Die Gruppe von Zeilinger versucht, die Verschränkung mithilfe von Photonenpaaren zu erzwingen und kombiniert hierzu die Paare von zwei parametrischen Kristallen, die mit einem 200-fs-Lichtpuls beschickt werden. Dabei entstehen etwa alle 150 Sekunden zwei verschränkte Paare. Diese geringe Koinzidenzrate reicht bisher nur aus, um die Verschränkung zwischen drei Photonen nachzuweisen, die starken Korrelationen sind jedoch noch nicht gemessen worden [[? Weinfurter 2000](#)].

[1]: Es wird auch versucht, die starke Kopplung zwischen Photonen und Atomen in Resonatoren zu einer Erzeugung von verschränkten Zuständen heranzuziehen. Diese Experimente sind jedoch bisher noch nicht über reine Demonstrationen des Prinzips hinausgegangen [[Englert et al. 1998](#); [Rauschenbeutel et al. 2000](#)]. Ob mit diesem Ansatz ein zuverlässiger Test auf der Basis von drei verschränkten Atomen in Zukunft möglich sein wird, ist sehr fraglich. Auch wird versucht, im Zusammenhang mit den Arbeiten zum Quantencomputer gespeicherte Ionen zu verschränken [[Sackett et al. 2000](#)]. Dies könnte eher gelingen. Diese Systeme sind jedoch nicht so vorteilhaft zum Test der Theorien verborgener Parameter geeignet, da sich die Ionen in relativ kleinen Entfernungen befinden.

8.9 Empirische Bestätigung von Gedankenexperimenten

[2]: Die verfeinerte Experimentiertechnik und das gewachsene Vertrauen in die Quantenmechanik führten schließlich dazu, Gedankenexperimente aus der Gründerzeit der Quantentheorie einer experimentellen und theoretischen Überprüfung zugänglich zu machen.

[1]: Allgemein gesprochen kommt es in der Quantenphysik zur Interferenz, wenn Alternativen existieren, die zum gleichen Ergebnis führen. Wird durch die Versuchsführung eine dieser Alternativen ausgeschlossen oder bevorzugt, so verschwindet die Interferenz.

8.9.1 Zwei-Löcher-Interferenzexperimente

[2]: Eine große Anzahl von Zwei-Löcher-Interferenzexperimenten wurde mit scharfen und unscharfen Observablen oder als delayed choice-Experimente durchgeführt. Konkret wurden solche Experimente mit Mach-Zehnder-Interferometern und Photonen oder mit Neutronen und Silizium-Einkristallen durchgeführt. Kürzlich konnten quantenmechanische Interferenzen sogar an C60-Molekülen (Fullerenen) nachgewiesen werden [Arndt et al. 1999].

[3]: Das einfache Doppelspalt-Experiment, bei dem Photonen oder Elektronen nach Passieren zweier Spalten ein Interferenzmuster erzeugen - nach Richard Feynman der typische Quanteneffekt überhaupt -, wurde im Laufe der Zeit mit immer größeren Objekten wiederholt: mit Atomen, kleinen Molekülen und kürzlich sogar mit Kügelchen aus 60 Kohlenstoffatomen, so genannten Fullerenen. Nach diesem letzten Kunststück hält Anton Zeilinger von der Universität Wien es sogar für möglich, das Experiment mit Viren durchzuführen. Kurz, alle Experimente besagen eindeutig: Die Quantenwelt ist wirklich so seltsam, ob es uns passt oder nicht.

8.9.2 Experiment mit verzögerter Wahl

[3]: Wheeler schlug schon 1978 ein „Experiment mit verzögerter Wahl“ vor, das schließlich 1984 ausgeführt wurde. Es demonstriert eine weitere Quanteneigenschaft, die jeder klassischen Beschreibung Hohn spricht: Nicht nur, dass ein Photon an zwei Orten zugleich sein kann - die Experimentatoren können sogar im Nachhinein auswählen, ob das Photon sich an beiden Orten aufgehalten hat oder nur an einem der beiden.

8.9.3 Experimente zum Teilchen-Welle-Dualismus/Interferenz

[1]: Mithilfe eines Gedankenexperiments gelang es zu zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, den Weg eines Teilchens zu bestimmen, ohne dass sein Impuls verändert wird; trotzdem führt dies zu einer Auslöschung der Interferenz. Bei diesem Gedankenexperiment war es kein mechanischer Impuls mehr, der ein Auslöschen verursachte, sondern eine quantenphysikalische Korrelation

[Scully et al. 1991]. Innerhalb weniger Jahre gelang es, auch dieses Gedankenexperiment zu realisieren und zu bestätigen [Dürr et al. 1998]. Bei den Experimenten wurden lasergekühlte Atome verwendet und die Welcher-Weg-Information durch Mikrowellenübergänge erzeugt, bei denen praktisch kein Impuls auf die Atome übertragen wird. Für eine Zusammenfassung der Experimente siehe [Dürr et al. 2000].

[1]: Das Youngsche Interferenzexperiment stand in den Diskussionen um die Quantenphysik von Anfang an im Mittelpunkt, und man hat relativ früh Experimente mit geringen Lichtintensitäten durchgeführt, bei denen nur ein einzelnes Photon in der Apparatur vorhanden sein konnte. Einen Überblick gibt [Pipkin 1978]. Varianten dieser Experimente waren die auf Wheeler zurückgehenden Delayed-Choice-Experimente, bei denen zwischen Teilchen- und Wellenbeobachtung erst dann umgeschaltet wird, nachdem das Photon die Spalte bereits passiert hat [Miller/Wheeler 1983]. Für das Photon war es also im kritischen Augenblick der Wechselwirkung mit dem Strahlteiler nicht deutlich, ob es sich als Teilchen oder als Welle „verhalten soll“. Auch hier bestätigte das Ergebnis die Quantenphysik, nach der allein die Versuchssituation zum Zeitpunkt des Photonennachweises entscheidend ist [Hellmuth et al. 1987]. Auch diese Experimente belegen eindrucksvoll den nichtlokalen Charakter der Quantenphysik.

[1]: Eine interessante Modifikation des Delayed-Choice-Experiments wurde von Scully vorgeschlagen, der dafür den Namen „Quantum Erasure“ einführte [Scully/Drühl 1982]. Dabei wird Licht an zwei ruhenden Atomen gestreut, z. B. an zwei gespeicherten Ionen; das reemittierte Licht erzeugt eine Interferenzstruktur. Durch den Zerfall eines der Atome in einen tieferen Zustand, der nicht mit dem Grundzustand identisch ist, kann eine Welcher-Weg-Information erzeugt werden, die man nachträglich wieder rückgängig machen kann, indem das Atom durch Einstrahlen z. B. eines Mikrowellenübergangs in den Grundzustand gebracht wird. Auf diese Weise lassen sich die Interferenzstreifen wiederherstellen. Das erste Experiment dieser Art ist von Summhammer et al. [Summhammer et al. 1983] durchgeführt worden. Für weitere Literatur hierzu siehe auch Ref. [Dürr et al. 2000].

8.9.4 Aharonov-Bohm-Effekt

[1]: Ein Teilchen-Interferenzexperiment der besonderen Art sind die Untersuchungen des Aharonov-Bohm-Effekts in der Elektronen-Interferometrie. Bei diesen Experimenten erfahren die interferierenden Elektronen in einem feldfreien Raum die Wechselwirkung mit einem Vektorpotential, das von einer Spule im Zentrum des Interferometers ausgeht (Abb. 1). Das Vektorpotential führt zu einer Phasenverschiebung der Elektronen-Interferenzen. In Deutschland wurde das Phänomen von Möllenstedt in Tübingen und von Boersch in Berlin studiert. Die aufwändigsten Experimente hat Tonomura in Japan durchgeführt. In diesen Experimenten wurden Supraleiter zur Abschirmung des Magnetfeldes benutzt, um sicherzustellen, dass am Ort der Elektronen keine Magnetfelder vorhanden waren. Auch dieses Experiment demonstriert den nichtlokalen Charakter der Quantenmechanik - die Elektronen „spüren“ gewissermaßen ein Feld, das nicht auf ihrem Weg vorhanden ist. Eine sehr gute Zusammenfassung des Effektes

und der Ergebnisse gibt [Tonomura 1998].

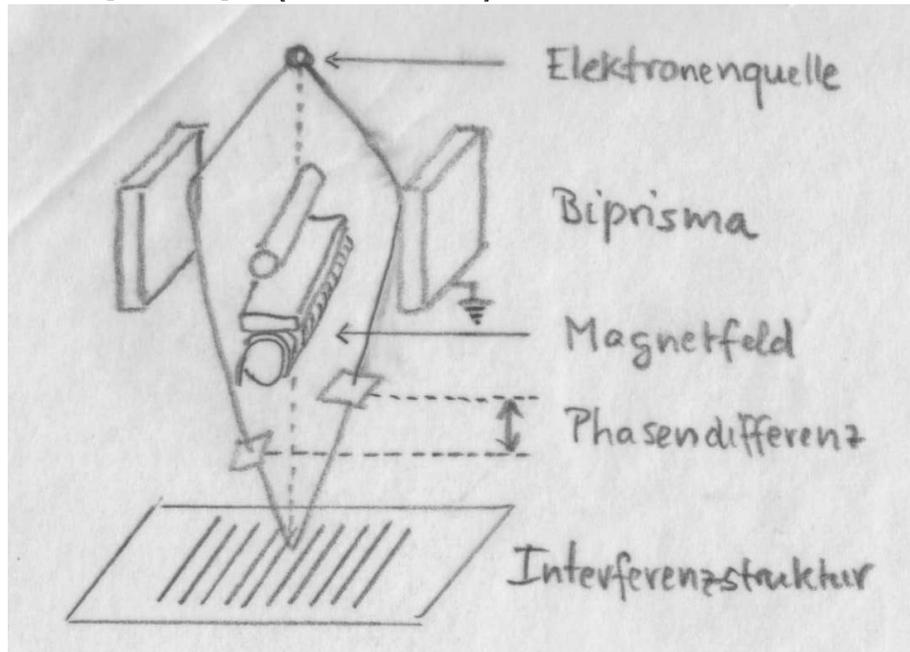


Abb. 1: Der Aharonov-Bohm-Effekt verdeutlicht den nichtlokalen Charakter der Quantenmechanik. Im Zentrum der Interferenzapparatur wird mit einer langen Spule ein Magnetfeld erzeugt. Dieses Feld wird so gut abgeschirmt, dass es im gesamten Bereich der beiden Elektronenstrahlen verschwindet, trotzdem wird im Interferenzbild der Elektronen eine Phasenverschiebung beobachtet, die proportional dem magnetischen Fluss in der Spule ist (siehe auch [Tonomura 1998]).

8.9.5 Experimente zu Schrödingers Katze

[1]: (Am Rand: Eines der bekanntesten Gedankenexperimente zur Quantenphysik hat Schrödinger formuliert, um die Besonderheiten der Quantenphysik gegenüber der klassischen Physik herauszustellen. Einen überlagerten Zustand gibt es in der klassischen Physik nicht: die Katze ist entweder lebendig oder tot. In den vergangenen Jahren ist es gelungen, ein analoges Experiment zu realisieren, bei dem sich in der Tat makroskopische Zustände in einer quantenmechanischen Überlagerung befinden.

[?]: Mit Schrödinger-Katze wird heute häufig eine Superposition von zwei Quantenzuständen eines Freiheitsgrades bezeichnet, die makroskopisch unterscheidbar sind. In Schrödingers ursprünglichem Gedankenexperiment [Schrödinger 1935] war allerdings ein verschränkter Zustand zwischen einem Mikro- und einem Makrofreiheitsgrad gemeint.

[1]: Die modernen Experimentiermethoden erlauben es nunmehr, das Bild der Schrödinger-Katze etwas zu modifizieren, und zwar in dem Sinne, dass man unterscheidbare (klassische) Eigenschaften mit Quantenzuständen koppelt. Auf diese Weise lässt sich Schrödingers Gedankenexperiment tatsächlich realisieren. Eine solche übertragene Schrödinger-Katze ist mit einem gespeicherten Ion in einer Ionenfalle verwirklicht worden. Zwei Quantenzustände wurden dabei mit

einer räumlichen Verteilung des Ions in der Falle gekoppelt, bei denen das Ion gewissermaßen an zwei Orten gleichzeitig lokalisiert ist. Die Kohärenzen zwischen den beiden klar getrennten Zuständen konnten dabei eindeutig nachgewiesen werden [Monroe/Bollinger 1997].

8.9.6 Experimente zu Fernkorrelationen

[2]: Eine besondere Motivation für Experimente zu nichtlokalen Korrelationen, wie sie in dem Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen auftreten, waren die 1965 entdeckten Bellschen Ungleichungen, die verletzt sein müssen, wenn die theoretisch vorausgesagten nichtlokalen Korrelationen existieren. In den Experimenten von Aspect [Aspect et al. 1982] konnten damit Korrelationen bis zu 14 m nachgewiesen werden, heute sind nichtlokale Korrelationen bis zu 10 km Entfernung festgestellt worden [Tittel et al. 1998]. Schließlich sei als eine interessante Variante der Fernkorrelationen die Teleportation erwähnt, durch die zwar nicht Objekte, aber doch Zustände über größere Strecken transportiert werden können [Bouwmeester et al. 1997].

8.9.7 Experimente aus der Quantenoptik

[1]: Die Fortschritte der Experimentiermethoden nach dem Zweiten Weltkrieg, wie z. B. die Möglichkeiten des Photonenzählens und die Entwicklung des Lasers, haben grundsätzlich neue Experimente ermöglicht. Neben der Untersuchung und der Messung einzelner Photonen ist auch das Experimentieren mit einzelnen Atomen zur Routine geworden. Dies hat eine Serie von reizvollen Experimenten mit interessanten Ergebnissen ermöglicht. ... Review-Artikel: T. W. Hänsch, H. Walther, Rev. Mod. Phys. 71, S242 (1999); W. E. Lamb, W. P. Schleich, Al. O. Scully, C. H. Townes, Review Mod. Phys. 71, S263 (1999); C. F. Wieman, D. F. Pritchard, D. J. Wineland, Review Mod. Phys. 71, S253 (1999).

8.10 Everetts Vielwelten-Interpretation

8.10.1 Begriff

- Grundidee: Superpositionen beschreiben alternative Parallelwelten.
- Vorteil: Die Schrödinger-Gleichung gilt uneingeschränkt; Wellenfunktionen kollabieren nie.
- Problem: Die Idee mutet bizarr an. Gewisse technische Probleme bleiben bestehen. ([3])

[3]: Bis in die fünfziger Jahre hatte die fortdauernde Erfolgsserie klar erwiesen, dass die Quantentheorie viel mehr war als eine kurzlebige Hilfskonstruktion. Darum beschloss ein Student namens Hugh Everett III an der Universität Princeton Mitte der fünfziger Jahre in seiner Dissertation das Kollaps-Postulat erneut unter die Lupe zu nehmen. Everett trieb den Geltungsbereich des Quantenformalismus auf die Spitze, indem er fragte: Was, wenn die zeitliche Entwicklung des gesamten Universums stets unitär ist? Wenn die Quantenmechanik das Universum zu beschreiben vermag, dann wird sein gegenwärtiger Zustand durch eine - äußerst komplizierte - Wellenfunktion beschrieben. Everett zufolge entwickelt sich diese Wellenfunktion stets auf deterministische Weise und lässt keinen Raum für einen nicht-unitären Kollaps oder einen wüfelnden Gott.

8.10.2 Monströse makroskopische Überlagerungen

[3]: Statt durch Messungen zu kollabieren, werden demnach mikroskopische Superpositionen blitzartig zu monströsen makroskopischen Überlagerungen vergrößert. Unsere Quanten-Spielkarte aus dem Gedankenexperiment ist wirklich an zwei Orten gleichzeitig. Ein Beobachter der Karte gerät in eine Superposition aus zwei unterschiedlichen mentalen Zuständen, wobei jeder eine der beiden Möglichkeiten wahrnimmt. Hätten Sie darauf gewettet, dass die Spielkarte mit dem Bild nach oben landet, so würden Sie als Überlagerung von lächelnd und schmollend enden. Everetts brillante Erkenntnis war, dass die Beobachter in einer solchen deterministischen und zugleich schizophrenen Quantenwelt dennoch die gute alte Realität wahrnehmen können, mit der wir vertraut sind. Vor allem konstatieren sie ein Zufallsverhalten, das den korrekten Wahrscheinlichkeitsregeln gehorcht.

[3]: Everetts Standpunkt hieß zwar ursprünglich Relativzustandsformulierung, wurde aber als Vielwelten-Interpretation der Quantenmechanik bekannt, weil jede Komponente der Beobachter-Superposition ihre eigene Welt wahrnimmt. Dieser Standpunkt vereinfacht die Theorie, indem er das Kollaps-Postulat aus der Welt schafft. Doch der Preis für diese Vereinfachung ist die Konsequenz, dass die parallelen Wahrnehmungen der Wirklichkeit alle gleichermaßen real sind.

8.10.3 Everett und die Dekohärenztheorie

[4]: Die von Everett gezogene Konsequenz von „Mehrfachwelten“ dürften von den meisten Physikern weiterhin abgelehnt werden - vorwiegend aus emo-

tionalen Gründen. Diese pragmatische Haltung ist aber auch im Rahmen einer universell gültigen Schrödinger-Gleichung durchaus möglich, wenn man den Begriff der Realität „operationell“ versteht: Als real gilt jeweils nur das, was für die in jedem „Everett-Zweig“ separat existierenden Beobachter noch beobachtbar ist. Die Everettsche Quantenwelt definiert hingegen eine „hypothetische Realität“, die der quantenphysikalischen Konsistenz zuliebe verlangt werden muss. Demzufolge kann man nicht erwarten, jemals einen Kollaps der Wellenfunktion zu beobachten, der nicht als rein quantenmechanischer Dekohärenzprozess erklärbar wäre. Der Kollaps auf ein bestimmtes Ergebnis beschreibt dagegen die sich stetig verändernde Situation der Beobachter in der Quantenwelt.

8.10.4 Paralleluniversen in neuen kosmologische Theorien

[Tegmark 2003, S.36]: *Paralleluniversen* sind neueren kosmologischen Beobachtungen zufolge nicht bloß eine extravagante Idee. Da der Weltraum sich offenbar unendlich weit erstreckt, wird irgendwo dort draußen alles irgend Mögliche verwirklicht - und sei es noch so unwahrscheinlich. Jenseits der Reichweite unserer Teleskope gibt es Raumregionen, die mit unserer identisch sind. Die mittlere Entfernung solcher Paralleluniversen kann sogar berechnet werden.

[Tegmark 2003, S.36]: Aus kosmologischen und quantenphysikalischen Überlegungen schließen Forscher auf mehrere Ebenen von *Multiversen* mit vielfältigen Eigenschaften und Naturgesetzen. Ihre Existenz vermag gewisse Besonderheiten unseres Universums zu erklären und vielleicht sogar fundamentale Fragen zu beantworten - etwa die nach dem Wesen der Zeit oder nach der mathematischen Beschreibbarkeit der physikalischen Welt.

8.11 Dekohärenz

8.11.1 Was ist Dekohärenz?

[2]: Es stellt sich die Frage, wie eine klassische Welt auf der Basis einer universell gültigen Quantentheorie überhaupt möglich ist. Das Zauberwort, mit dem das Unerklärliche erklärt werden soll, heißt Dekohärenz. Damit ist das sich Herausbilden einer klassischen Welt aus einer quantenmechanischen Basis gemeint, die Emergenz von klassischen Eigenschaften aus einem im Allgemeinen nichtklassischen Verhalten. Wie diese Dekohärenz konkret aussieht und unter welchen besonderen Bedingungen sie sich ereignet, das vermag gegenwärtig niemand überzeugend zu sagen. Es gibt unzählige Vorschläge und Erklärungsmodelle, die aber alle ihre Schwachstellen haben und maßgeblichen Einwänden ausgesetzt sind [Giulini et al. 1996; Blanchard et al. 2000].

- Grundidee: Winzige Wechselwirkungen mit der Umgebung zerstören blitzschnell die Quantennatur der Superpositionen.
- Vorteil: Experimentell nachprüfbar. Erklärt, warum die Alltagswelt sich „klassisch“ verhält und nicht quantentheoretisch.
- Einschränkung: Die Dekohärenz kommt nicht ganz ohne (Vielwelten- oder Kopenhagener) Interpretation aus. ([3])

[5]: Nach unserer alltäglichen Erfahrung geht irgendwo auf dem Weg von Elektronen, über Atome, große Moleküle, hin zu Murmeln und Steinen das charakteristische Quantenphänomen der Interferenz der Materie verloren. Für immer makroskopischere Objekte wird in der Regel die quantenmechanische Interferenzfähigkeit (Kohärenz) durch unkontrollierbare Wechselwirkung mit einer Umgebung immer schneller zerstört. Dieses grundlegende Phänomen, eine Folge der Dynamik offener Quantensysteme, wird mit Dekohärenz bezeichnet.

[4]: Dekohärenz ist eine zwingende Konsequenz der Schrödinger-Gleichung unter realistischer Berücksichtigung der natürlichen Umgebung eines Systems - unabhängig von allen Interpretationsfragen. Sie beruht auf einer sehr effizienten „Verschränkung“ praktisch aller physikalischen Systeme, die lange Zeit einfach übersehen worden ist.

[4]: All die „erstaunlichen“ Experimente der letzten Jahrzehnte haben nur Konsequenzen der nichtlokalen Wellenfunktion bestätigt, wobei alle Messergebnisse durch Dekohärenz klassisch fixiert werden. Scheinbare „Quantensprünge“ sind demnach ebenso das Ergebnis von sehr schnellen, aber stetigen Dekohärenzvorgängen wie die Lokalisierung von Quantenobjekten als scheinbare „Teilchen“ - sei es als Spuren in der Nebelkammer oder als Klicks in Zählern.

[3]: Die Unbestimmtheit einer Quantensuperposition unterscheidet sich von der Unbestimmtheit der klassischen Wahrscheinlichkeit bei einem Münzwurf: Die Wellenfunktion der Quantenkarte entspricht einer Dichtematrix mit vier Maxima. Zwei davon bezeichnen die 50-prozentige Wahrscheinlichkeit jedes Ergebnisses, Kopf oder Zahl. Die anderen beiden zeigen an, dass diese beiden Ergebnisse im Prinzip immer noch miteinander interferieren können. Der Quantenzustand ist noch immer „kohärent“. Die Dichtematrix eines Münzwurfs hat

nur die ersten beiden Maxima; das bedeutet einfach, dass die Münze wirklich entweder Kopf oder Zahl zeigt, aber dass wir nur noch nicht nachgesehen haben.

[3]: Der Dekohärenz-Theorie zufolge verändert schon die kleinste Wechselwirkung mit der Umgebung - etwa ein einzelnes von der Münze abprallendes Photon oder Luftmolekül - eine kohärente Dichtematrix derart, dass sie klassische Wahrscheinlichkeiten wiedergibt wie bei einem Würfelwurf. Der gesamte Prozess gehorcht der Schrödinger-Gleichung.

8.11.2 Historie

[3]: Nicht nur die Experimentiertechnik machte in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte, sondern auch die Theorie. Everetts Arbeit ließ entscheidende Fragen unbeantwortet: Wenn die Welt tatsächlich bizarre makroskopische Superpositionen enthält, warum nehmen wir sie nicht wahr?

[3]: Eine bahnbrechende Arbeit von H. Dieter Zeh von der Universität Heidelberg lieferte 1970 die Antwort. Er zeigte, dass die Schrödinger-Gleichung selbst eine Art Zensur zur Folge hat. Dieser Effekt wurde unter dem Namen Dekohärenz bekannt, denn eine ursprünglich vollkommene Superposition heißt kohärent. In den folgenden Jahrzehnten wurde das Prinzip der Dekohärenz durch Wojciech H. Zurek vom Los Alamos National Laboratory in New Mexico sowie von Zeh und anderen detailliert ausgearbeitet.

[4]: Der Dekohärenzprozess ist inzwischen auch experimentell - zuerst durch Serge Haroche (Paris) - direkt nachgewiesen worden. Zur theoretischen Untersuchung dieses Quantenphänomens haben neben Wojciech Zurek (Los Alamos) vor allem Erich Joos (früher Heidelberg) und Claus Kiefer (Freiburg) beigetragen.

8.11.3 Dekohärenz im Gedankenexperiment der Quantenkarten

[3]: Kohärente Superpositionen bestehen nur, solange der Rest der Welt sozusagen nichts von ihnen weiß. Die umgefallene Quantenkarte aus unserem Gedankenexperiment wird fortwährend von neugierigen Luftmolekülen und Photonen angestoßen, die infolgedessen herausfinden, ob sie nach rechts oder nach links umgeklappt ist; durch Zerstören der Superposition - durch „Dekohärenz“ - wird die Zustandsüberlagerung als solche unbeobachtbar (siehe Kasten auf Seite 73). Es ist fast, als übernehme die Umgebung die Rolle des Beobachters, der den Kollaps der Wellenfunktion herbeiführt. Angenommen, Ihre Freundin betrachtet die liegende Münze, ohne Ihnen das Ergebnis zu verraten. Gemäß der Kopenhagener Deutung lässt dieser Messvorgang die Superposition zu einem eindeutigen Resultat kollabieren, und Ihre bestmögliche Beschreibung der Karte verwandelt sich aus einer Quantensuperposition in eine klassische Darstellung Ihrer Unkenntnis dessen, was Ihre Freundin gesehen hat. Grob gesagt zeigen die Dekohärenz-Berechnungen, dass man auch ohne menschlichen Beobachter - ohne expliziten Kollaps der Wellenfunktion - praktisch denselben Effekt erhält: Schon ein von der liegenden Münze abprallendes Luftmolekül genügt. Diese

winzige Wechselwirkung verwandelt die Superposition lokal augenblicklich in eine klassische Situation - zumindest unter allen praktischen Gesichtspunkten.

8.11.4 Welche Phänomene werden durch die Dekohärenz erklärt?

[3]: Die Dekohärenz erklärt, warum wir im Alltag keine Quantensuperpositionen sehen. Der Grund ist nicht etwa, dass die Quantenmechanik an sich für Objekte oberhalb einer magischen Größe nicht gelten würde. Vielmehr ist es fast unmöglich, makroskopische Gegenstände wie Katzen und Münzen auf Dauer so perfekt zu isolieren, wie es erforderlich wäre, um Dekohärenz zu verhindern. Hingegen lassen sich mikroskopische Objekte einfacher von ihrer Umgebung isolieren und behalten darum ihr Quantenverhalten bei.

[3]: Eine weitere Frage, die in Everetts Arbeit unbeantwortet blieb, war subtiler, aber ebenso wichtig: Was für ein Mechanismus wählt just die klassischen Zustände - bei unserer Münze entweder „Bild oben“ oder „Bild unten“ - als besondere aus? Als abstrakte Quantenzustände betrachtet ist an ihnen nichts Besonderes gegenüber den unzähligen möglichen Überlagerungen von „Bild oben“ und „Bild unten“ mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen. Warum spalten die vielen Welten sich fein säuberlich gemäß der uns vertrauten Alternative Oben/Unten auf - und niemals längs anderer Alternativen?

[3]: Auch diese Frage vermag die Dekohärenz zu beantworten. Den Berechnungen zufolge sind klassische Zustände wie „Bild oben“ und „Bild unten“ genau diejenigen, denen Dekohärenz nichts anhaben kann. Das heißt also, Wechselwirkungen mit der Umwelt lassen zwar Münzen mit dem Bild oben und Münzen mit dem Bild unten unbehelligt, zwingen aber jede Superposition von „oben“ und „unten“ in eine der klassischen Alternativen „oben“ oder „unten“.

[3]: Üblicherweise analysieren die Physiker das Universum, indem sie es in zwei Bereiche aufspalten. Zum Beispiel trennen die Theoretiker in der Thermodynamik einen materiellen Körper von allem Übrigen rundum, und diese „Umgebung“ definiert dann die herrschenden Temperatur- und Druckbedingungen. Die Quantenphysik trennt für gewöhnlich das Quantensystem von der klassischen Messvorrichtung. Wenn man Unitarität und Dekohärenz ernst nimmt, ist es lehrreich, das Universum in drei Bereiche zu unterteilen: das jeweilige Objekt, die Umgebung und das beobachtende Subjekt (siehe Kasten auf Seite 76).

[3]: Die durch Wechselwirkung der Umwelt mit dem Objekt oder dem Subjekt verursachte Dekohärenz garantiert, dass wir niemals Quantensuperpositionen von mentalen Zuständen wahrnehmen. Außerdem ist unser Gehirn unentwinnbar mit der Umwelt verwoben; darum tritt, wenn unsere Neuronen feuern, unvermeidlich und praktisch augenblicklich Dekohärenz ein. Wie Zeh betont hat, rechtfertigen diese Schlussfolgerungen die seit langem geübte Praxis, das Lehrbuch-Postulat vom Kollaps der Wellenfunktion als pragmatisches Rezept - nach der Devise „Halt den Mund und rechne“ - zu benutzen: Berechne Wahrscheinlichkeiten so, als würde die Wellenfunktion kollabieren, wenn das Objekt beobachtet wird. Obgleich von Everetts Standpunkt die Wellenfunktion streng genommen niemals kollabiert, stimmen die Dekohärenz-Forscher im Allgemeinen darin überein, dass die Dekohärenz eine Wirkung hat, die einem Kollaps

zum Verwechselln ähnlich sieht.

8.11.5 Dekohärenz - eine Folge der Dynamik offener Quantensysteme

[5]: Dekohärenz lässt sich in einfacher Weise am Beispiel der Quanteninterferenz an einem Doppelspalt erläutern. Bezeichnen wir dazu mit $|\psi_1\rangle$ bzw. $|\psi_2\rangle$ die beiden unterscheidbaren Quantenzustände eines Teilchens (Quants), das durch die erste bzw. zweite Öffnung eines Doppelspalts hindurchtritt. Gemäß dem quantenmechanischen Superpositionsprinzip beschreibt dann $|\psi\rangle = (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)/\sqrt{2}$ den Zustand, wenn diesem einzelnen Quant beide Öffnungen zur Verfügung stehen („Superpositionsprinzip“). Auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt treten quantenmechanische Interferenzen auf. Der Dichteoperator der Superposition,

$$\varrho_{\text{Sup}} = |\psi\rangle\langle\psi| = \underbrace{\frac{1}{2}(|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2|)}_{\varrho_{\text{Gemisch}}} + \underbrace{\frac{1}{2}(|\psi_1\rangle\langle\psi_2| + |\psi_2\rangle\langle\psi_1|)}_{\varrho_{\text{Kreuz}}} \quad (8.1)$$

enthält vier Terme, wobei die Kreuzterme ϱ_{Kreuz} (die *Kohärenzen*) gerade für das relevante Interferenzmuster sorgen, denn nur diese haben ihren Ursprung in *beiden* Öffnungen. Dekohärenz ist der Übergang von der Superposition ϱ_{Sup} zum Gemisch ϱ_{Gemisch} , bei dem die Kreuzterme verschwunden sind. Dem Gemisch ist offenbar die Interferenzfähigkeit verloren gegangen; es beschreibt ein Teilchen, das *entweder* durch die eine *oder* durch die andere Öffnung zum Schirm gelangt, und dessen Verhalten demnach mit der klassischen Addition von Wahrscheinlichkeiten verträglich ist. Elektronen, Neutronen oder zuletzt C60-Moleküle sollten demnach beim Doppelspaltexperiment durch die kohärente Superposition ϱ_{Sup} beschrieben werden, wohingegen bei Murmeln zur Beschreibung das Gemisch ϱ_{Gemisch} zu verwenden ist.

[5]: Wie mit Murmeln verhält es sich auch mit Schrödinger-Katzen. Während $|t\rangle$ und $|l\rangle$ zwei sinnvolle, makroskopisch unterscheidbare Zustände einer Katze sein mögen, haben wir mit $|\psi\rangle = (|t\rangle + |l\rangle)/\sqrt{2}$ den quantenmechanisch erlaubten „Katzenzustand“ vorliegen, den wir gemäß unserer Alltagserfahrung durch das „entweder-oder“-Gemisch $\varrho_{\text{Gemisch}} = (|t\rangle\langle t| + |l\rangle\langle l|)/\sqrt{2}$ ersetzt sehen möchten. Das Verschwinden der Kreuzterme der anfänglichen Superposition, also der Übergang von ϱ_{Sup} zu ϱ_{Gemisch} , lässt sich als Folge der Quantendynamik eines offenen Systems verstehen [Giulini et al. 1996; 3; 4]. Die Ursache für das Ausbleiben quantenmechanischer Interferenzphänomene makroskopischer Objekte, wie Murmeln oder Katzen, liegt darin, dass solche Objekte nie perfekt von ihrer Umgebung isoliert sind. Sie sind unweigerlich Wechselwirkungen mit anderen, unkontrollierbaren Freiheitsgraden ausgesetzt, wie einem umgebenden Gas oder dem elektromagnetischen Feld. Es ist die daraus resultierende Dynamik eines offenen Quantensystems, die zum Verschwinden der Interferenzmuster führt. Die von Schrödinger im „Katzenparadoxon“ versinnbildlichte Unbeobachtbarkeit von Superpositionen makroskopisch verschiedener Zustände erfährt so im Rahmen der gewöhnlichen Quantentheorie offener Systeme eine einfache Auflösung.

[5]: Umgebungsinduzierte Dekohärenz ist Ausdruck der praktischen Unmöglichkeit, den Zustand aller Umgebungsfreiheitsgrade zu beobachten (siehe Infokasten 8.11.6). Tatsächlich lässt sich der kohärenzzerstörende Einfluss einer Umgebung unter bestimmten Bedingungen rückgängig machen, sobald Information über den Umgebungszustand vorhanden und zur Manipulation der Umgebung verfügbar ist; ein berühmtes Beispiel dafür sind die Experimente zum Spinoder Photonenecho [Hahn 1950; Rothstein 1957]. Im Rahmen quantenmechanischer Fehlerkorrekturverfahren wird dieses Faktum zur Unterdrückung von Dekohärenz ausgenutzt.

8.11.6 Dynamik offener Quantensysteme und reduzierte Dichteoperatoren

Die Schrödinger-Gleichung gilt für abgeschlossene Systeme. Soll die Dynamik eines offenen Systems quantenmechanisch beschrieben werden, muss man es zunächst durch Hinzunahme der Umgebung abschließen. Der Gesamt-Hamilton-Operator ist dann

$$H_{\text{tot}} = \underbrace{H_{\text{sys}}}_{\text{eigentlicher System-Hamiltonoperator}} + \underbrace{H_{\text{umg}}}_{\text{Hamiltonoperator der Umgebung}} + \underbrace{H_{\text{ww}}}_{\text{Wechselwirkung}} \quad (8.2)$$

Häufig kann die Wechselwirkung als Produkt zweier Kopplungsagenten angesehen werden, je eines solchen für System (S) und Umgebung (B), also

$$H_{\text{ww}} = SB \text{ (oder Summe solcher Produkte)}. \quad (8.3)$$

Mag etwa S der Ortsoperator sein; typischerweise setzt sich B additiv aus vielen Freiheitsgraden (i) zusammen, $B = \sum_i B_i$. Für das Gesamtsystem kann nun im Prinzip die Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H_{\text{tot}} |\Psi(t)\rangle \quad (8.4)$$

für den Gesamtzustand $|\Psi(t)\rangle$ gelöst werden. Der entsprechende Dichteoperator

$$\varrho_{\text{tot}}(t) = |\Psi(t)\rangle \langle \Psi(t)| \quad (8.5)$$

enthält alle Information über System und Umgebung. Ist man nur an Eigenschaften des offenen Systems interessiert, kann über die Umgebungsfreiheitsgrade gemittelt werden, wodurch der reduzierte Dichteoperator

$$\varrho(t) = Tr_{\text{umg}}[\varrho_{\text{tot}}(t)] \quad (8.6)$$

entsteht. Dabei bedeutet Tr_{umg} Mittelung (Spurbildung) über eine vollständige Orthonormalbasis der Umgebung. Für diesen Dichteoperator des offenen Systems lassen sich häufig in guter Näherung nicht-unitäre Bewegungsgleichungen, so genannte „Meistergleichungen“, ableiten. ([5])

8.11.7 Dämpfung, Dekohärenz, stabile und instabile Superpositionen

[5]: Dekohärenz und das auch in klassischen Systemen auftretende Phänomen der Dämpfung werden beide durch die Ankopplung eines physikalischen Systems an eine Umgebung, d. h. ein Bad bestehend aus (unendlich) vielen Freiheitsgraden, verursacht. Aufgrund der oft sehr unterschiedlichen Zeitskalen, die diese beiden Phänomene bestimmen, sollten beide jedoch begrifflich unterschieden werden. Quantenmechanisch wie klassisch führen Umgebungseinflüsse zum Auftreten einer charakteristischen Relaxations- oder Dissipationszeitskala τ_{Diss} , die bestimmt, auf welcher Zeitskala das offene System in einen Gleichgewichtszustand übergeht. Das Verhältnis dieser Dissipationszeit τ_{Diss} zur charakteristischen Systemzeitskala τ_{Sys} , etwa einer Schwingungsdauer, ist ein klassisches Maß dafür, wie gut ein System als isoliert betrachtet werden kann. Die Dynamik offener Quantensysteme ist jedoch subtiler: Im Allgemeinen gehen gerade nichtklassische kohärente Superpositionen ϱ_{Sup} , also Überlagerungen makroskopisch unterscheidbarer Zustände, auf einer neuen Dekohärenzzeitskala τ_{Dek} in ein Gemisch ϱ_{Gemisch} über, wonach der Übergang in einen Gleichgewichtszustand auf der längeren Relaxationszeitskala τ_{Diss} folgt. Bemerkenswert ist dabei, dass, obwohl wegen $\tau_{\text{Sys}} \ll \tau_{\text{Diss}}$ ein System auf der klassischen Systemzeitskala als nahezu perfekt von der Umgebung isoliert erscheinen mag, dennoch die Quantendynamik drastisch von der eines isolierten Systems abweichen kann, wenn nämlich auch gilt $\tau_{\text{Dek}} \ll \tau_{\text{Diss}}$. Kohärenzen eines Quantensystems können also zerstört sein, lange bevor das System seinen Gleichgewichtszustand erreicht hat. Diese unterschiedliche Empfindlichkeit zwingt uns zur begrifflichen Unterscheidung von Dämpfung und Dekohärenz und erlaubt uns, im Rahmen der Quantentheorie offener Systeme zu entscheiden, welche Quantenzustände auch in der klassischen Welt anzutreffen sind: Es sind solche, die überhaupt nicht oder nur in geringem Maße Dekohärenz unterworfen sind.

[5]: Wodurch wird nun festgelegt, welche Superpositionen ϱ_{Sup} bei Kopplung an eine Umgebung besonders rasch in Gemische ϱ_{Gemisch} zerfallen? Die Antwort findet sich in der Art der Wechselwirkung mit der Umgebung (siehe Infokasten 8.11.6). Häufig koppelt ein offenes Quantensystem an eine Umgebung über eine Ortskoordinate als „Kopplungsagent“; dann dekohärieren Superpositionen von Wellenpaketen mit unterschiedlichen Ortserwartungswerten besonders schnell. Umgekehrt folgt, dass Quantenzustände mit wohl definiertem Ort besonders robust gegen ortsabhängige Umgebungseinflüsse sind. Analog dekohärieren Superpositionen stark verschiedener Energieeigenzustände sehr schnell, wenn die Energie als Kopplungsagent auftritt. Allgemein ist schnelle Dekohärenz das Schicksal von Superpositionen jener Systemzustände, die aufgrund ihrer Wechselwirkung mit der Umgebung von dieser unterschieden werden können. Superpositionen von Zuständen eines offenen Quantensystems, die von der Umgebung nicht unterschieden werden können, sind wesentlich stabiler. Diese Eigenschaft ist für quantenmechanische Fehlerkorrekturverfahren von entscheidender Bedeutung.

8.11.8 Dekohärenzreduzierung - ein Ziel der Quantentechnologie

[5]: Wie nun ausführlich dargelegt, lassen sich charakteristische Quantenphänomene nur dann aufrechterhalten, wenn die Quantensysteme von der Umgebung ausreichend isoliert sind. Dabei ist „ausreichend isoliert“ im Quantenfall oft eine viel schärfere Forderung als klassisch und kann daher meist nur unvollständig erfüllt werden. Wenn die verbleibende Restwechselwirkung mit der Umgebung bekannt ist, lässt sich jedoch die daraus resultierende Dekohärenz unter bestimmten Bedingungen durch quantenmechanische Fehlerkorrekturverfahren weitgehend unterdrücken. Entscheidend dafür ist, dass die Umgebung nicht mehr als unbeobachtbare Ansammlung vieler Freiheitsgrade angesehen wird; ganz im Gegenteil, gezielte Messungen an der Umgebung müssen ausgeführt werden, die es erlauben, Kohärenzverluste im System durch geeignete unitäre Operationen zu korrigieren. Diese Fehlerkorrekturverfahren sind zur Zeit als vielversprechende Methode zur Stabilisierung großer Quantensysteme vor allem in der Quanteninformationsverarbeitung von großem Interesse [Bouwmeester et al. 2000; Alber et al. 2001; Tittel et al. 1999; Briegel et al. 1999; Alber et al. 1999].

[5]: In der klassischen Informationsverarbeitung stehen längst hochentwickelte Methoden zur Fehlerkorrektur zur Verfügung [Welsh 1988]. Infolge des Superpositionsprinzips lassen sich diese Methoden allerdings kaum auf die Quantenmechanik übertragen. Dass sich klassische und quantenmechanische Fehlerkorrektur wesentlich unterscheiden, lässt sich am elementaren Beispiel der kleinsten klassischen Informationseinheit, des Bits, verdeutlichen. Ein Bit kann nur die beiden Zustände $|0\rangle$ (Grundzustand) oder $|1\rangle$ (angeregter Zustand), aber keinen Superpositionszustand annehmen. Als Fehlerquelle wollen wir modellhaft einen Zerfallsprozess annehmen, der nur dann auftritt, wenn das Bit im angeregten Zustand ist. Ein auftretender Fehler führt den angeregten Zustand in den Grundzustand über. Wenn bekannt ist, dass ein solcher Zerfallsprozess stattgefunden hat, kann dieser Fehler am klassischen Bit sofort durch die Transformation $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ korrigiert werden.

[5]: Im Quantenfall ist das nicht mehr so einfach. Quantenmechanisch ist der elementare Datenträger ein Qubit, das in einer beliebigen Superposition $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ zweier orthogonaler Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ vorliegen kann. Ein Zerfallsprozess kann quantenmechanisch immer dann mit nicht verschwindender Wahrscheinlichkeit auftreten, wenn im Zustand $|\psi\rangle$ auch eine Komponente des angeregten Zustands $|1\rangle$ vorliegt, d. h. falls $b \neq 0$ gilt. Findet ein solcher Zerfallsprozess statt, so wird der Zustand $|\psi\rangle$ in den Grundzustand $|0\rangle$ transformiert. Dabei geht jegliche Information über den Quantenzustand $|\psi\rangle$ vor dem Zerfallsprozess, d. h. über die Werte der Amplituden a und b , irreversibel verloren.

[5]: Unter welchen Bedingungen lassen sich quantenmechanische Fehler korrigieren? Einen ersten Anhaltspunkt dafür liefert unsere vorangehende Diskussion der Dekohärenz. Wir sahen, dass ein Superpositionszustand eines offenen Quantensystems zerstört wird, sobald infolge von Verschränkung mit der Umgebung einzelne Komponenten der Superposition allein durch Beobachtung

der Umgebung unterschieden werden können. Dementsprechend erwarten wir, dass umgebungsinduzierte Fehler Superpositionszustände dann unversehrt belassen, wenn aufgrund der auftretenden Fehler zwischen einzelnen Komponentenzuständen nicht unterschieden werden kann. Sollen darüberhinaus die auftretenden Fehler durch unitäre Transformationen korrigierbar sein, muss garantiert werden, dass Fehler orthogonale Basiszustände wieder in orthogonale Zustände überführen. In vielen Fällen lässt sich dies durch Beschränkung der betrachteten Quantenzustände auf einen geeigneten Teilraum des gesamten Zustandsraums erreichen. Es ist eines der derzeit intensiv verfolgten Ziele der Quantentechnologie, leistungsfähige Fehlerkorrekturverfahren zu entwickeln, um Quantensysteme auf immer größeren Skalen kohärent kontrollieren zu können [Bouwmeester et al. 2000; Alber et al. 2001; Tittel et al. 1999; Briegel et al. 1999; Alber et al. 1999; Shor 1995; Nielsen et al. 1998].

[5]: Neben den faszinierenden Zukunftsperspektiven, die die Möglichkeit kohärenter Kontrolle großer Quantensysteme bietet, zeigen all diese aktuellen Entwicklungen, wie sich beim physikalischen Phänomen der Dekohärenz Grundlagenforschung und Technologie gegenseitig neue Impulse verleihen und wie dadurch unser Verständnis der Quantenwelt vertieft wird.

8.11.9 Dekohärenz und Gehirn - Quantentheorie und Bewusstsein

[10] *Sir Roger Penrose*: Ich bin der Ansicht, dass was immer das Gehirn auch tut, wissenschaftlich beschreibbar ist. Aber ich glaube, die heutige Wissenschaft, unser physikalisches Weltbild reicht dafür nicht aus. Dabei erscheint mir eine Zelle genauso als ein physikalisches Objekt wie jedes andere. Wenn es also ein biologisches Phänomen gibt, das sich nicht berechnen lässt, dann muss man das auf die Physik zurückführen, dann gibt es etwas in der Physik, das nicht berechenbar ist. ... Unsere heutige Physik ist eine seltsame Mischung aus zwei verschiedenen Vorgehensweisen. Zum einen handelt es sich dabei um die klassische Physik, die sich vereinfacht ausgedrückt mit den großen Objekten beschäftigt. Und dann gibt es noch die Quantenphysik, die komplexer ist - wiederum vereinfacht gesagt. Die Gleichungen der klassischen Physik sind deterministisch, man kann sie von einem Computer berechnen lassen. Dagegen beschreibt die Schrödinger-Gleichung der Quantenphysik nicht, wie sich ein System verhält, dazu muss erst noch ein weiterer Teil der Quantenmechanik hinzukommen - der nicht-deterministische Vorgang des Messens. Aber gemessen wird ja mit einem Apparat, also mit einem physischen Objekt. Warum verhält sich der nicht gemäß der Schrödinger-Gleichung? Das ganze System ist ein Quantensystem, warum verhält es sich nicht gemäß der Schrödinger-Gleichung? Mir scheint, dass etwas fehlt, etwas falsch ist. Denken Sie an das berühmte Gedankenexperiment von Schrödinger, nach dem eine Katze tot und lebendig zugleich ist. Schrödinger selbst fand das lachhaft und dachte, da könne etwas nicht stimmen - auch wenn er es nicht ganz so offen ausgesprochen hat wie ich. Die Quantenmechanik ist in sich nicht konsistent.

[10]: Ich behaupte: Wenn Sie etwas Nicht-Berechenbares in der Physik suchen, dann müssen Sie an der Grenze von klassischer und Quantenphysik su-

chen. Zwischen den beiden liegt etwas, das wir nicht verstehen, und ich behaupte, dass dort die nicht-berechenbare Physik liegt. Wenn etwas Bewusstsein haben soll, muss es davon Gebrauch machen.

[4]: Max Tegmark, Koautor von [3], ist vornehmlich durch seine Anwendung der Dekohärenz auf Gehirnprozesse bekannt geworden; damit hat er den spekulativen Vorschlägen von Roger Penrose und Stuart Hameroff, wonach menschliches Denken auf kohärenten Quantenprozessen beruhe oder gar einen durch Gravitation induzierten „Kollaps der Wellenfunktion“ einschlieÙe, den Boden entzogen. Tegmarks Arbeit beschreibt somit das „letzte Stück“ des von Einstein im Gespräch mit Heisenberg geforderten „ganzen langen Wegs vom Vorgang bis zur Fixierung in unserem Bewußtsein“ in rein quantenmechanischen Begriffen.

[3]: Um die Rolle des Beobachters in der Quantentheorie zu untersuchen, ist es sinnvoll, das Universum in drei Teile aufzuspalten: das betrachtete Objekt, die Umgebung und den Quantenzustand des Beobachters oder Subjekts. Die Schrödinger-Gleichung, der das Universum als Ganzes gehorcht, lässt sich unterteilen in Ausdrücke, die die innere Dynamik jedes dieser drei Untersysteme beschreiben, und Ausdrücke, die Wechselwirkungen zwischen ihnen beschreiben. Diese Ausdrücke haben höchst unterschiedliche Wirkungen.

[3]: Der Ausdruck für die Dynamik des Objekts ist normalerweise der wichtigste; darum können die Theoretiker, wenn sie zunächst das Verhalten des Objekts untersuchen wollen, meist alle übrigen Ausdrücke vernachlässigen. Im Falle unserer Quantenkarte sagt ihre Dynamik voraus, dass sie eine Superposition bilden und sowohl nach links als auch nach rechts fallen wird. Wenn unser Beobachter die Münze betrachtet, erstreckt sich die Superposition durch die Wechselwirkung zwischen Subjekt und Objekt auch auf seinen mentalen Zustand und erzeugt eine Superposition von Freude und Enttäuschung über Gewinn und Verlust seiner Wette. Doch er vermag diese Superposition niemals wahrzunehmen, denn die Wechselwirkung zwischen Objekt und Umgebung - etwa durch von der Münze abprallende Luftmoleküle und Photonen - verursacht sofortige Dekohärenz dieser Superposition. Selbst wenn der Betrachter die Münze völlig von der Umgebung isolieren könnte - indem er das Experiment etwa in eine dunkle Vakuumkammer am absoluten Temperaturnullpunkt verlegte -, würde das keinen Unterschied machen. Beim ersten Blick auf die Münze würde zumindest ein Neuron in seinem Sehnerv eine Superposition von „feuern“ und „nicht feuern“ bilden, und diese Superposition müsste - wie einer der Autoren (Tegmark) kürzlich berechnet hat - binnen rund 10-20 Sekunden durch Dekohärenz zerfallen. Wenn die komplexen Muster der feuernden Neuronen im Gehirn auch nur das Geringste mit Bewusstsein zu tun haben und damit, wie wir Gedanken und Wahrnehmungen bilden, dann garantiert die Dekohärenz unserer Neuronen, dass wir niemals Quantensuperpositionen mentaler Zustände wahrnehmen. Im Wesentlichen verknüpft unser Gehirn das Subjekt unentwirrbar mit der Umgebung und zwingt uns dadurch die Dekohärenz auf.

8.11.10 Eine Umfrage unter Physikern 1999 zum Kollaps

[3]: Durch die Entdeckung der Dekohärenz sowie durch immer raffinierte experimentelle Demonstrationen kurioser Quanteneigenschaften haben die

Ansichten der Physiker sich merklich gewandelt. Der Begriff „Kollaps der Wellenfunktion“ sollte einst hauptsächlich erklären, warum bei Experimenten spezifische Ergebnisse herauskommen und nicht seltsame Überlagerungen von Ergebnissen. Nun hat sich dieses Motiv praktisch erledigt. Außerdem vermochte peinlicherweise niemand eine nachprüfbare Gleichung vorzulegen, die präzise festlegt, wann und wo der mysteriöse Kollaps eintreten soll.

[3]: Eine informelle Umfrage, die im Juli 1999 bei einer Tagung über Quantencomputer am Isaac-Newton-Institut in Cambridge durchgeführt wurde, deutet auf einen allmählichen Meinungsumschwung hin. Von neunzig befragten Physikern bekannten sich nur acht ausdrücklich zum Kollaps der Wellenfunktion. Dreißig wählten „Viele Welten oder konsistente Historien (ohne Kollaps)“. Der „Ansatz mit konsistenten Historien (consistent-histories approach)“ analysiert, grob gesagt, Serien von Messungen und lässt von den durch die Messresultate definierten „Historien“ nur solche zu, für die sich als Ganzes „konsistente“ Wahrscheinlichkeiten ergeben.

[3]: Aber das Meinungsbild ist undeutlich: Von den Befragten wollten sich die meisten, nämlich fünfzig Forscher, für keine der angebotenen Antworten entscheiden. Ein Grund für diese große Anzahl mag der grassierende terminologische Wirrwarr sein. Nicht selten sagen zwei Physiker beispielsweise, sie seien für die Kopenhagener Deutung, und stellen dann fest, dass sie nicht dasselbe darunter verstehen.

[3]: Trotzdem macht die Umfrage deutlich, dass es an der Zeit ist, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Obzwar diese Bücher in einem der ersten Kapitel unweigerlich den nichtunitären Kollaps als fundamentales Postulat anführen, zeigt die Umfrage, dass heute viele Physiker - zumindest auf dem brandneuen Gebiet der Quantencomputer - dieses Postulat nicht mehr ernst nehmen. Der Begriff Kollaps wird zweifellos seinen Nutzen als Rechenrezept behalten, aber ein warnender Kommentar, der verdeutlicht, dass es sich dabei wahrscheinlich nicht um einen fundamentalen Vorgang handelt, der die Schrödinger-Gleichung verletzt, könnte klugen Studenten stundenlanges Grübeln ersparen.

8.12 Rationale Rekonstruktion

8.12.1 Begriff Rekonstruktion

[8, S.35]: Historisch ist die Quantentheorie aus konkreten physikalischen Problemen entstanden. Die abstrakte Allgemeinheit ihrer endgültigen Gestalt legt jedoch den Versuch nahe, diese Gestalt aus Postulaten zu rekonstruieren, welche nur plausible Vorbedingungen möglicher Erfahrungen formulieren.

[8, S.330]: Wir verstehen unter Rekonstruktion einer Theorie ihren nachträglichen Aufbau aus möglichst einleuchtenden Postulaten. Die Postulate können entweder Bedingungen möglicher Erfahrungen aussprechen, also Bedingungen menschlichen Wissens („*epistemische*“ Postulate). Oder sie formulieren sehr einfache Prinzipien, die wir hypothetisch - angeregt durch konkrete Erfahrung - als allgemeingültig in dem betreffenden Bereich der Wirklichkeit annehmen wollen („*realistische*“ Postulate.)

8.12.2 Begriff Abstrakte Quantentheorie

[8, S.34,S.332]: Als abstrakte Quantentheorie bezeichnen wir die allgemeinen Gesetze der Quantentheorie etwa in der mathematischen Gestalt, in welche J. v. Neumann [Von Neumann 1932] sie gebracht hat. Man kann die abstrakte Quantentheorie durch vier *Thesen* charakterisieren. Wir gebrauchen hier den Begriff „These“, um ihn von dem rekonstruktiven Begriff „Postulat“ zu unterscheiden. Die Thesen könnten in einem formalen axiomatischen Aufbau der Theorie zugrunde gelegt werden. Sie können aber nicht den Anspruch erheben, „einleuchtend“ zu sein, so wie wir es von den Postulaten fordern. Sie zu erklären, ist vielmehr Ziel der Rekonstruktion.

Hilbertraum. Die Zustände eines beliebigen Objekts sind durch die linearen Teilräume (Strahlen) eines Hilbertraums beschrieben.

Wahrscheinlichkeitsmetrik. Die Metrik dieses Hilbertraums bestimmt die bedingten Wahrscheinlichkeiten $p(x, y)$, einen Zustand y zu finden, wenn ein Zustand x vorliegt.

Oder: Das Absolutquadrat des inneren Produkts zweier normierter Hilbert-Vektoren x und y ist die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(x, y)$, den zu y gehörigen Zustand zu finden, wenn der zu x gehörige Zustand vorliegt.

Kompositionsregel. Die Zustände eines zusammengesetzten Objekts liegen im Tensorprodukt der Hilberträume seiner Teile.

Oder: Zwei koexistierende Objekte A und B können als ein zusammengesetztes Objekt $C = AB$ aufgefasst werden. Der Hilbertraum von C ist das Tensorprodukt der Hilberträume von A und B .

Dynamik. Die Dynamik eines Objekts ist durch eine vom Zeitparameter t abhängige unitäre eindimensionale Gruppe von Abbildungen seines Hilbertraumes auf sich gegeben.

Oder: Die Zeit wird durch eine reelle Koordinate t beschrieben. Die Zustände eines Objekts sind Funktionen von t , beschrieben durch eine unitäre Abbildung $U(t)$ des Hilbertraums auf sich selbst.

[8, S.34,S.332]: Die abstrakte (=Neumannsche) Quantentheorie gilt universell für alle beliebigen Objekte. Sie besagt nichts über die Existenz eines (empirisch dreidimensionalen) Ortsraums, von Körpern oder Massenpunkten, und über die zwischen den Objekten wirkenden speziellen Kräfte (d. h. über die Auswahl des Hamilton-Operators, der die Dynamik generiert). Diese Begriffe treten in die Quantentheorie selbst erst durch spezielle Wahl der Dynamik und Auszeichnung bestimmter, mit der Dynamik verknüpfter Observablen ein. (Sie gehören zur konkreten Theorie bestimmter Objekte.)

[8, S.34,S.332]: Wegen dieser ihrer Allgemeingültigkeit fassen wir die abstrakte Quantentheorie als eine Theorie der Wahrscheinlichkeit auf, die sich von der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie nur durch die Wahl des zugrunde gelegten Aussagenverbandes (der „Quantenlogik“) unterscheidet.

8.12.3 Quantentheorie der Messung

Für die Messung der Observablen

$$A = \sum a_k P[\varphi_k] \quad (8.7)$$

an einem Objekt-System S mit dem Präparationszustand φ wird S mit einem Messgerät M in dem neutralen Zustand Φ in Kontakt gebracht. Während des Zeitintervalls δt wird eine Wechselwirkung H_W eingeschaltet. Durch den unitären Zeitentwicklungsoperator

$$U^A = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} H_W \Delta t\right) \text{ (sog. „Prämessung“)} \quad (8.8)$$

wird dann der Produktzustand $\varphi \otimes \Phi$ in den korrelierten Zustand

$$U^A \varphi \otimes \Phi = \Psi'(S + M) \quad (8.9)$$

überführt. Bei richtiger Kalibrierung von U^A ist $\Psi'(S + M)$ durch

$$\Psi' = \sum c_k \varphi_k \otimes \Phi_k, \text{ mit } c_k = (\varphi_k, \varphi) \quad (8.10)$$

gegeben. Dabei sind Φ_k Eigenzustände der Zeigerobservablen Z zu Eigenwerten Z_k . Wenn $S + M$ in dem reinen Zustand Ψ' ist, dann ist das Teilsystem S in dem Gemischzustand

$$W'_S = \sum |c_k|^2 P[\varphi_k] \quad (8.11)$$

und das Teilsystem M in dem mit W'_S korrelierten Gemischzustand

$$W'_M = \sum |c_k|^2 P[\Phi_k]. \quad (8.12)$$

Dabei ist $w_k = |c_k|^2$ die Wahrscheinlichkeit dafür, den Zeigerwert Z_k abzulesen. Aber: Nichtobjektivierbarkeit des Zeigers! [2]

[2]: Die auch nach heutigen Maßstäben abschließende Formulierung der

Quantenmechanik wurde 1932 von J. von Neumann in seinem Buch „Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik“ gegeben [Von Neumann 1932]. Auf der Basis dieser insbesondere mathematisch hervorragenden Darstellung wurde in den folgenden Jahrzehnten der weitere formale Ausbau der Theorie durch [Jauch 1968; Ludwig 1983; Mackey 1963; Varadarajan 1968] u. a. ermöglicht. Das von Neumannsche Buch ist aber auch die Grundlage für eine neue, über die Kopenhagener Interpretation hinausgehende Deutung der Quantenmechanik. Im Gegensatz zu der dualistischen Kopenhagener Interpretation betrachtete J. von Neumann den Messprozess als einen quantenmechanischen Vorgang und das Messgerät als ein quantenmechanisches Objekt. Im Rahmen einer solchen Theorie der Messung wird dann durch den Messprozess eine Korrelation zwischen den Zeigerwerten des Messgerätes und Eigenschaften des untersuchten quantenmechanischen Systems hergestellt (siehe Infokasten „Quantentheorie der Messung“).

[2]: Die Interpretation der Theorie beschränkt sich daher nicht auf das Verhalten der Messgeräte, sondern sie macht wegen der genannten Korrelationen auch Aussagen über das quantenmechanische Objekt selbst. Bei wiederholbaren Messungen - bei denen das Objekt-System den gemessenen Wert nach der Messung wirklich besitzt - spricht man deshalb meist von *Realistischer Interpretation*, falls das Objekt jedoch bei der Messung gestört oder vernichtet worden ist und nur die Zeigerwerte verfügbar sind, von *Minimalinterpretation*.

8.12.4 Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik

[2]: Mit dem Vertrauen in die neue Theorie wächst auch die Einsicht. Das in den 60-er Jahren einsetzende intensive Studium der Grundlagen der Quantenmechanik führt bald zu einer wichtigen Erkenntnis: Die allgemeinen ontologischen Prämissen, die der Quantenmechanik zugrunde liegen, unterscheiden sich von den entsprechenden Prämissen der klassischen Physik nicht dadurch, dass sie anders, sondern nur dadurch, dass sie schwächer sind. (So wird die der klassischen Physik zugrunde liegende Annahme, dass ein Objekt alle möglichen Eigenschaften entweder positiv oder negativ besitzt, abgeschwächt durch die Annahme, dass das nur für einige Eigenschaften der Fall ist). Das bedeutet, dass Quantenmechanik von weniger vor-physikalischen Annahmen abhängt als die klassische Physik und daher auch einen weiteren Geltungs- und Anwendungsbereich besitzt, der natürlich den Realitätsbereich der makroskopischen Physik einschließt. Nur deshalb kann man klassisch-physikalische Vorgänge als Spezialfälle quantenmechanischer Vorgänge verstehen, für die dann noch zusätzliche Bedingungen erfüllt sind.

[2]: Man kann diese Zusammenhänge auf zwei verschiedene Weisen verdeutlichen. In einem ersten Argumentationsgang kann man sich klar machen, dass die in der Quantenphysik verwendeten Begriffe und Kategorien durchwegs schwächer sind als die entsprechenden Konzeptionen der klassischen Physik. Quantenmechanische, statistische Kausalität ist schwächer als klassische Kausalität, die als ein selten realisierter Spezialfall erscheint, und der quantenmechanische Substanzbegriff ist schwächer als der klassische, da Quantenobjekte anders als

klassische Objekte nicht Träger aller Eigenschaften sind. Die mathematische Präzisierung dieser Einsichten führt dann zu den bekannten quantenmechanischen Observablen- und Wahrscheinlichkeitsstrukturen, in denen die jeweiligen klassischen Strukturen als Spezialfälle enthalten sind [Mittelstaedt 1989; Pitowsky 1989].

[2]: Eine andere, noch tiefer liegende Argumentation bezieht sich auf Logik und Quantenlogik [Mittelstaedt 1978]. Die allgemeinsten pragmatischen Vorbedingungen einer Wissenschaftssprache, die sich auf quantenmechanische Objekte und deren Eigenschaften bezieht, sind schwächer und ärmer an außersprachlichen Voraussetzungen als Vorbedingungen einer Sprache der klassischen Physik. Diese unterschiedliche Stärke drückt sich dann insbesondere in der Logik aus. Die Logik der quantenmechanischen Sprache ist schwächer als die klassische Logik. Hier ist wieder eine direkte Übertragung in mathematische Strukturen möglich. Quantenlogik führt auf den aus dem Hilbert-Raum der Quantenmechanik bekannten, nur orthomodularen, aber nicht Booleschen Verband der Projektionsoperatoren, während die klassische Logik auf den Booleschen Verband der Teilmengen des klassischen Phasenraumes führt.

[2]: Auch hier erweist sich die der Quantenphysik zugrunde liegende Logik-Struktur als schwächer und allgemeiner als die spezielle der klassischen Physik entsprechende klassische Logik. Etwas salopp ausgedrückt: Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik.

8.12.5 Universalität und Nichtobjektivierbarkeit

[2]: Die nahezu lückenlose empirische Bestätigung der Quantentheorie und die in wichtigen Teilen gelungene rationale Rekonstruktion dieser Theorie deuten auf ein wichtiges Ergebnis hin: Quantenmechanik ist universell gültig und gleichermaßen anwendbar auf mikroskopische Objekte, makroskopische Gegenstände und auf das ganze Universum.

8.12.6 Nichtobjektivierbarkeit des Zeigers

[2]: Als universell gültige Theorie sollte die Quantentheorie insbesondere auf diejenigen Prozesse und Gegenstände anwendbar sein, die zur empirischen Überprüfung und Bestätigung von theoretischen Aussagen verwendet werden, also auf Messprozesse und Messgeräte. Diese erstmals von J. von Neumann 1932 konzipierte Idee ist in den letzten Jahrzehnten sehr genau ausgebaut worden [Busch et al. 1996]. Neben vielen wertvollen Einsichten in den Messvorgang führen diese Untersuchungen aber auch auf ein bis heute ungelöstes Problem: Wenn nach dem dynamischen Teil des quantenmechanischen Messvorgangs das Objekt S und Messgerät M voneinander getrennt werden, dann befindet sich der Zeiger des Messgerätes in einem Gemischzustand W , der keine *Ignoranzinterpretation* erlaubt [Mittelstaedt 1998]. Das bedeutet, dass es nicht erlaubt ist anzunehmen, dass der Zeiger objektiv einen festen Wert hat, den nur der Beobachter subjektiv nicht kennt. Die Unbestimmtheit der Zeigerwerte lässt sich daher nicht auf das Unwissen (*Ignoranz*) des Beobachters zurückführen. Anders

ausgedrückt: Die Zeigerwerte sind *nicht objektivierbar*.

Der Gemischzustand

$$W'_M = \sum |c_k|^2 P[\Phi_k], c_k = (\varphi_k, \varphi) \quad (8.13)$$

des Messgerätes M nach der Prämessung erlaubt keine Ignoranzinterpretation. Wäre nämlich M (mit der Wahrscheinlichkeit $w_k = |c_k|^2$) in einem Zustand Φ_k , den nur der Beobachter nicht kennt, so wäre $S+M$ mit der Wahrscheinlichkeit w_k im Zustand $\varphi_k \otimes \Phi_k$, also in dem Gemischzustand

$$W'_\Psi = \sum |c_k|^2 P[\varphi_k \otimes \Phi_k] \quad (8.14)$$

und nicht in dem mit der unitären Transformation U^A berechneten reinen Zustand

$$\Psi' = \sum c_k \varphi_k \otimes \Phi_k. \quad (8.15)$$

Es gibt aber Observable B von $S+M$, für die die Erwartungswerte in den Zuständen Ψ' und W'_Ψ verschieden sind, für die also

$$\text{tr}BP[\Psi'] \neq \text{tr}BW'_\Psi \quad (8.16)$$

gilt. **Widerspruch!**

[2]

[2]: Diese auf makroskopischer Ebene auftretende Nichtobjektivierbarkeit (siehe Infokasten „Nichtobjektivierbarkeit des Zeigers“) scheint besonders schwerwiegend zu sein, weil sie die empirische Überprüfbarkeit der Theorie in Frage stellt. Sie ist jedoch kein singuläres Phänomen. Überall da, wo makroskopische Systeme mit Hilfe der Quantenmechanik beschrieben werden, können objektive Unbestimmtheiten auftreten, die von quantenmechanischen Korrelationen herrühren. Schrödingers Katze war nur ein erstes Beispiel für ein ganz allgemein auftretendes Phänomen: Die mikroskopischen Interferenz- und Unbestimmtheitsprobleme können bis auf die makroskopische Ebene durchschlagen. Die makroskopische Welt ist nicht mehr der sichere Ort, von dem aus man unbehelligt die Seltsamkeiten der Quantenwelt studieren könnte, wie sich Niels Bohr das noch gedacht hat. Die Quantenphänomene sind überall.

[2]: Das Unbehagen, das wir angesichts der auf den Messprozess bezogenen angeblichen Nichtobjektivierbarkeit empfinden, ist aber nur ein Aspekt eines viel größeren Problems. Die Welt, in der wir leben, besitzt offensichtlich die uns vertrauten Eigenschaften der simultanen Messbarkeit, der Kausalität, der Lokalität und der Individualisierbarkeit einzelner Objekte. Sie erlaubt es, die Zustände einzelner Systeme zu messen, zu klonen und die Systeme eindeutig zu benennen. Sie erlaubt es, Zeigerwerte zu objektivieren und zweifelsfrei festzustellen, ob Schrödingers Katze tot oder ob sie lebendig ist. Interferenzphänomene treten bei Gegenständen der uns umgebenden makroskopischen Welt anscheinend nicht auf.

8.13 Metaphysik

8.13.1 Positivismus

[Kober 2003]: Unter Positivismus werden eine Reihe im Detail sehr unterschiedlicher und miteinander nicht mehr vereinbarer Konzeptionen v.a. in der Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie sowie in der Philosophie der Sozialwissenschaften zusammengefasst. Insofern ist eine Definition von Positivismus nicht möglich. Vertreter des Positivismus eint jedoch im allgemeinen die Überzeugung, dass alles rationale und für Menschen handlungsrelevante Wissen (in Form von Urteilen oder Behauptungen) intersubjektiv überprüfbar sein und deshalb auf etwas „positiv“ Gegebenem beruhen muss: d.h. menschliches Wissen von der materiellen und sozialen Welt muss sich auf Wahrnehmung oder Erfahrung gründen. Damit einher geht eine strikte Ablehnung von metaphysischen (d.h.: spekulativen, esoterischen oder allein auf religiösen Glauben beruhenden) Erklärungsansprüchen, die wegen ihrer mangelnden Überprüfbarkeit im Positivismus allesamt als sinnlos verworfen werden. Sich am Vorbild der als erfolgreich betrachteten modernen Naturwissenschaft orientierend, wird die Reduktion auf das positiv Gegebene damit gerechtfertigt, dass allein so eine für Menschen vernünftige, weil subjektiv unabhängige Begründung von Behauptungen der Philosophie und den Wissenschaften möglich sei. Die vom Positivismus durchaus beabsichtigte Polemik machte das Wort „Positivismus“ oftmals zu einem „Kampfbegriff“: Während Vertreter des Positivismus sich stolz als aufgeklärt - kritisch präsentierten und Opponenten eine pseudowissenschaftliche Theorienproduktion vorwarfen, genügte bei Kritikern, die sich vom Positivismus bestimmte Fragestellungen nicht verbieten lassen wollten, schon die Charakterisierung „Das ist doch Positivismus“ als Grund für eine brüske Ablehnung. ...

8.13.2 Reduktionismus

[9]: Die *reduktionistisch und materialistisch eingestellten Wissenschaftstheoretiker* haben es seit dem „Wiener Kreis“, also etwa Rudolf Carnap¹³, Moritz Schlick und Otto Neurath, so dargestellt, als sei ihr Reduktionismus in Übereinstimmung mit der Theoretischen Physik. Sie verschwiegen, dass sich die bedeutendsten Physiker wie Max Planck, Einstein, Wolfgang Pauli und Werner Heisenberg deutlich von ihnen distanziert hatten. Der springende Punkt dabei ist: Reduktionisten wie Carnap gingen davon aus, dass die materielle Welt und die unmittelbaren Sinnesaffektionen der einzige Inhalt seien, den die Physik dann systematischer darstellt.

¹³[RGG⁴]: Rudolf Carnap, 1891-1970, bedeutender Vertreter der Philosophie des Logischen Empirismus. Nach einem Studium der Physik, Mathematik und Philosophie (1910-1914) promovierte Carnap 1921 in Jena mit der philosophischen Arbeit „Der Raum“. 1926 stieß Carnap zum Wiener Kreis, der eine empirisch fundierte, mit den Mitteln moderner Logik formulierte „wissenschaftliche Weltauffassung“ anstrebte. Metaphysik und Religion wurden als empirisch nicht überprüfbar und daher sinnlos abgelehnt. 1928 erschien Carnaps Hauptwerk „Der logische Aufbau der Welt“, das die gesamte Wirklichkeit auf Konstruktionen aus „Elementarerlebnissen“ zurückführt.

[9]: Die gesamte Theoretische Physik ist nur eine etwas höflichere Art zu sagen: „hier rot“, „dort schwer“, „hier heiß“. Der Physikaliker *Willard van Orman Quine*¹⁴ hat diesen Standpunkt noch am Ende des zwanzigsten Jahrhunderts vertreten und daraus unmittelbar atheistische Konsequenzen abgeleitet.

8.13.3 Bohr und die Kopenhagener Interpretation

[2]: Mit Hilfe der Kopenhagener Interpretation konnte Bohr die Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik in den Bereich einer sonst nicht zugänglichen mikrophysikalischen Realität verweisen, während der Beobachter, seine Sprache, seine Begriffe und seine Apparate losgelöst von den Quantenobjekten der klassischen Welt angehören. Diese Argumente machen deutlich, dass man sehr vorsichtig damit umgehen sollte, Bohr und die Kopenhagener Interpretation philosophisch dem Positivismus zuzurechnen. Im Ergebnis hat Bohr tatsächlich eine positivistische Interpretation der Quantentheorie geliefert, aber nicht in Verfolgung eines philosophisch motivierten positivistischen Programms, sondern um Widersprüchen und anderen Komplikationen in der Beschreibung der Atomphysik zu entgehen. Bohr hat positivistisch argumentiert, aber nur um dadurch Interpretationsproblemen zu entgehen, die er glaubte nicht anders lösen zu können.

8.13.4 Einsteins Physikverständnis

[9]: Einstein ist in drei Feldern wirklich von Bedeutung: Erstens natürlich in der *physikalischen Fachwissenschaft*, wo er zu Recht mit den Allergrößten, wie zum Beispiel mit Isaak Newton, auf eine Stufe gestellt wird, zweitens aber auch innerhalb der *Wissenschaftstheorie*, wo sein Beitrag gewöhnlich überhaupt nicht beachtet wird, weil er den dort üblichen Gepflogenheiten widersprach, und drittens in Bezug auf seine *Verhältnisbestimmung von Religion und Naturwissenschaft*. Dieser dritte Bereich wird oft diskutiert und geriet früh ins öffentliche Bewusstsein.

[9]: Der Geist, der Einsteins Forschen beseelte, wird deutlich durch eine hübsche Anekdote aus dem Jahr 1919. Nachdem Einstein 1905 die Spezielle Relativitätstheorie entwickelt hatte, ging er 1916 zur Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie über, als deren Ausgangspunkt er die Äquivalenz von träger und schwerer Masse nahm. Während sich die Spezielle Relativitätstheorie

¹⁴[RGG⁴]: Willard van Orman Quine, 1908-2000, der einflussreichste und in der theoretischen Philosophie auch der bedeutendste amerikanische Philosoph seit dem 2. Weltkrieg. ... Nach der Promotion 1932 lernte Quine auf einer Europareise Carnap und andere Vertreter des Wiener Kreises sowie die damals weltweit führenden Logiker in Polen kennen. ... Quine, der mit zahlreichen technischen Arbeiten zur Entwicklung der modernen Logik beigetragen hat, blieb den Grundideen des logischen Empirismus treu und wurde so zum schärfsten Kritiker von dessen „Dogmen“. ... Dem Gedanken einer Zurückführung der Geltung einzelner Theoreme auf wohlbestimmte empirische Daten setzte er einen „Holismus“ entgegen, für den es stets die Gesamtheit unserer Überzeugungen ist, die sich vor dem „Tribunal der Erfahrung“ zu verantworten hat. Die Möglichkeit einer den übrigen Wissenschaften vorgeordneten philosophischen Erkenntnistheorie hat Quine bestritten: Als „naturalisierte Epistemologie“ sah er sie gleichsam eingebürgert, mit allen Rechten und Pflichten, in das große Gemeinwesen empirischer Disziplinen.

leichter empirisch bestätigen ließ, fehlten für die Allgemeine lange die empirischen Belege. Schließlich hatte der englische Astrophysiker Arthur Eddington während einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919 die Möglichkeit, die Ablenkung des Sternenlichtes im Gravitationsfeld der Sonne zu messen. Alle Physiker auf der ganzen Welt warteten gespannt den Ausgang dieses „experimentum crucis“ ab. Alle - außer Einstein. Einstein machte sich noch nicht einmal die Mühe, das Radio anzuschalten. Als ihm ein Assistent aufgeregt berichtete, dass seine Theorie durch Eddingtons Messungen bestätigt worden war, nickte er zustimmend mit dem Kopf, ohne sich sonderlich aufzuregen. Sein Assistent wurde ungeduldig und fragte den Meister: „Was hätten Sie denn gemacht, wenn die Experimente anders ausgegangen wären?“ Daraufhin Einstein trocken: „Dann hätte mir Gott Leid getan.“

Diese Begebenheit belegt, wie sehr Einsteins Physikverständnis von den gängigen empiristischen und materialistischen Vorstellungen abweicht. In allem Physiktreiben steckt nach Einstein ein apriorisches Element.

8.13.5 Der Ausgriff ins Unendliche

[9]: Planck, Pauli, Heisenberg und vor allem Einstein interpretierten die Physik gerade nicht materialistisch. Sie bestanden darauf, dass der Physiker Ideen haben müsse, um eine neue Theorie zu erfinden. Diese Idee stammt nicht aus den Sinnesaffektionen, sondern aus dem schöpferischen Ingenium der menschlichen Vernunft. Unter den Wissenschaftstheoretikern war es einzig Karl Popper, der diesen Zusammenhang gesehen und herausgestrichen hatte. Er wusste, dass der Physiker über „regulative Ideen“ im Kantischen Sinn verfügen muss, soll er etwas Neues entdecken (vgl. *Logik der Forschung*, Tübingen 1976). Kant war der Meinung, dass unser Erkennen zwar auf das Sinnlich-Konkrete verwiesen ist, dass aber dieser materielle Bezug nur die eine Seite der Medaille ausmacht. Die andere Seite besteht in intellektuellen Kompetenzen wie dem Ordnen nach kategorialen Gesichtspunkten, insbesondere aber darin, dass unsere Vernunft ins Unendliche hinein ausgreift.

[9]: Bei Kant ist der Ausgriff ins Unendliche keine platonische Ideenschau. Nach ihm steht der Mensch im Horizont des Absoluten, aber dieses Absolute lässt sich nicht ergreifen wie ein Gegenstand. Es ist wie der Horizont, der zurückweicht, wenn wir ihn fassen wollen. Dennoch gehört diese Spannung zwischen realer Endlichkeit und potenzieller Unendlichkeit zum Menschen und sie allein ist die Quelle von Innovation.

8.13.6 Einsteins Metaphysik

[9]: Damit sind wir mitten in der *Metaphysik*, die die meisten Wissenschaftstheoretiker ablehnten. Aber es ist eben tatsächlich die Frage, ob Physik ohne eine solche schwache, im Subjekt begründete Metaphysik des Ausgriffs ins Unendliche überhaupt möglich ist. Planck, Einstein, Heisenberg und Pauli gingen allerdings noch darüber hinaus, indem sie behaupteten, dass diese Idee, nach der wir ausgreifen, auch *in der Welt* wirksam ist. Nach ihrer Auffassung ist sie der Garant der Weltordnung. Gott ist also in der Ordnung der Welt präsent.

Diese Physiker waren Platoniker. An sich ist ein solcher Platonismus eine Begleiterscheinung der Physik von ihren Anfängen über Galilei bis heute (vgl. die Theorien von *Roger Penrose*).

[9]: Dass die menschliche Vernunft Ideen haben muss, wenn sie schöpferisch sein will, wird man akzeptieren. Dass unsere Ideen zugleich die Wesensgründe der Natur ausmachen, wie die Platoniker lehren, scheint weniger einsichtig, wenn man sich auf die mathematisch-physikalischen Theorien beschränkt. Diese sind so abstrakt, dass viele Philosophen zweifeln, ob diese mathematisch beschriebene Weltordnung ein Hinweis auf die göttliche Vernunft im Weltall sein kann. In jedem Fall steckt aber in der Physik ein ideelles Moment, sei es auf der Subjekt- oder auf der Objektebene. Einstein sagt: „Zur Aufstellung einer Theorie genügt niemals das bloße Zusammenbringen registrierter Erscheinungen - es muss stets eine freie Erfindung des menschlichen Geistes hinzukommen, die dem Wesen der Dinge näher auf den Leib rückt. Der Physiker darf sich nicht begnügen mit der bloßen phänomenologischen Betrachtung, die nach der Erscheinung fragt, sondern muss vordringen zur spekulativen Methode, welche die Existenzform sucht.“ Genauso wie im Folgenden könnte das auch Hegel gesagt haben: „Die brauchbaren mathematischen Begriffe können durch Erfahrung wohl nahe gelegt, aber keinesfalls aus ihr abgeleitet werden. Erfahrung bleibt natürlich das einzige Kriterium der Brauchbarkeit einer mathematischen Konstruktion für die Physik. Das eigentlich schöpferische Prinzip liegt aber in der Mathematik. In einem gewissen Sinn halte ich es also für wahr, dass dem reinen Denken das Erfassen des Wirklichen möglich sei, wie es die Alten geträumt haben.“ **Positivismus ist das nicht. Einsteins metaphysischen Protest gegen eine allzu enge, empiristisch und materialistisch vorgehende Wissenschaftstheorie sollte man sehr ernst nehmen. Physik ist ohne Metaphysik nicht zu haben.**