

Norbert Hermann Hinterberger

Der Realismus - in der theoretischen Physik

Zusammenhänge und
Hintergründe zu aktueller
Forschung



Springer Spektrum

Der Realismus – in der theoretischen Physik

Norbert Hermann Hinterberger

Der Realismus – in der theoretischen Physik

Zusammenhänge und
Hintergründe zu aktueller
Forschung



Springer Spektrum

Norbert Hermann Hinterberger
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-67694-3 ISBN 978-3-662-67695-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67695-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023, korrigierte Publikation 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Andreas Rüdinger
Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Halbklassischer und Quantenrealismus	7
2	Teilchen und ihre Wellen	15
2.1	Superpositionen der Quanten	15
2.2	Die Koalition des Idealismus in Physik und Philosophie	24
2.2.1	Das halbe Wissen in der Quantenmechanik	27
2.2.2	Das Dualitätsprinzip der Quantensysteme	29
2.2.3	Wahrscheinlichkeiten kommen mit den Messungen	40
2.3	Einzelne Quantensysteme und Durchschnitte	41
2.3.1	Die reale Welle	45

VI Inhaltsverzeichnis

3	Die instrumentalistische Resignation	51
3.1	Einsteins Verdacht hinsichtlich der Unvollständigkeit der <i>QM</i>	51
3.1.1	Der Streit um Welle <i>oder</i> Teilchen	54
3.2	Die Reaktion der Göttinger und Kopenhagener	58
3.3	Instrumentalismus und Operationalismus	68
4	Realismus ist keine absurde Idee	75
4.1	Realismus der ersten und zweiten Generation	75
4.1.1	Wahrscheinlichkeits- ableitungen aus der Führungsgleichung	80
4.2	Führungswelle und Born'sche Hypothese	82
4.2.1	Die berühmteste Katze	87
4.3	Physikalischer Kollaps oder Teilchen plus Welle	93
4.4	Spin-Netzwerke und Reduktionen der Wellenfunktion durch Gravitation	98
4.4.1	Kollaps und Dekohärenz	103
4.4.2	Welle-Teilchen-Dualismus versus Wellen-Monismus	106
4.5	Kausalmengen-Entwicklung in einem zyklischen Universum	108
5	Quantenmöglichkeiten	113
5.1	Dekohärenz ohne neue Wellenverzweigungen	113
5.1.1	Das Prinzip kausaler Vollständigkeit	116

5.1.2	Unterschiedliche Modi von Kausalität	126
5.1.3	Der materialistische Zeitpfeil	128
5.2	Ein fundamentaler Begriff von Gleichzeitigkeit	130
5.2.1	Kausale Perspektiven	135
5.3	De-Broglie-Bohm-Theorie und John S. Bell	137
6	Energie-Impuls-Ereignisse	143
6.1	Energetische Kausalmen- gen bei Smolin und Cortès	143
6.1.1	Alternative Kausalmen- gen-Modelle	146
6.1.2	Die Quantenüberlagerung als Möglichkeitszustand	150
6.2	Cortès und Smolins Energieminimalismus	151
6.3	Nur zwei Arten von Strukturen	155
7	Fundamentale Energieimpulse und emergenter Raum	159
7.1	Basis-Prinzipien bei Smolin und Cortès	159
7.1.1	Inverse Gravitation	163
7.1.2	Ereigniserbfolgen und Erhaltungsgesetze	167
8	Retro-Kausalität als Grobkörnig- keit des Zeitpfeils	169
8.1	Mikroretrokausalität	169
8.1.1	Diskrete Regionen im Konfigurationsraum der dBB	171

VIII	Inhaltsverzeichnis	
	8.1.2	Die Herausforderung im Mach-Zehnder- Interferometer
		176
	8.1.3	Das einzelne MZI
		179
9	Retro-Kausalität in der Emergenz	183
	9.1	Retro-Kausalität in Mach-Zehnder- Interferometern
		183
	9.2	Unablässiges Heraklit-Werden – statt Parmenides-Sein
		187
	9.3	Geburtsfolge in der <i>ECS</i> -Raumzeit- Geschichte
		189
	9.3.1	Phänomenologie der retrokausalen Beziehungen
		194
10	Komplex und diskret	199
	10.1	Der komplexe Realismus – bei Lee Smolin, Marina Cortês und Clelia Verde
		199
	10.2	Qualia in der Zeit
		204
	10.2.1	Die Neurologie des Gegenwärtigen
		212
	10.3	Neuartige Ereignisse im Universum
		214
	Personenverzeichnis	223
	Sachverzeichnis	227



1

Einleitung

Es soll von Anfang an kein Geheimnis daraus gemacht werden, dass in diesem Buch ein moderner, *materialistischer Realismus* verteidigt wird. Der Versuch, diesen Realismus *unzweideutig monistisch* – also ohne Verfälschungen durch dualistische oder idealistische Residuen – zu formulieren, liegt sozusagen primär im Ehrgeiz der vorliegenden Arbeit.

Über weite Strecken werden wir hier in Ausführlichkeit auf eine sehr inspirierte und übersichtlich gestaltete *interdisziplinäre* Arbeit von Lee Smolin eingehen.

Er verwendet in seinem jüngsten Buch *Quantenwelt*¹ gar keine Formalisierungen, um auch Leser aus Philosophie und anderen Wissenschaften mitnehmen zu können. Smolin beschreibt hier also *informell, heuristisch* – aber nichtsdestoweniger systematisch – die unterschiedlichen Positionen des *Realismus* und des *Antirealismus*.

¹Lee Smolin, *Quantenwelt – Wie wir zu Ende denken, was mit Einstein begonnen hat*, Deutsche Verlags-Anstalt, München 2019 (Übersetzung, Jürgen Schröder): Original: *Einstein's Unfinished Revolution – The Search for what lies beyond the Quantum*, Penguin Press, New York 2019.

Auf neuere, stärker mathematisierte Papiere im arXiv-Format (hervorgegangen aus einer Zusammenarbeit von Lee Smolin mit Marina Cortês et al. – die eher an Kolleg:innen aus der Physik adressiert sind) werden wir aber (ab Kap. 6) ebenfalls ausführlich genug eingehen, denn es handelt sich um brandneue Physik, in der sich schon die Art der mathematischen Formalisierung (gegenüber anderen, eher schwer bis nicht interpretierbaren bzw. instrumentalistisch neutralisierten Gleichungssystemen) durch unmissverständlichen Realitätsbezug auszeichnet.

Smolin richtet in seiner *Quantenwelt* gleich zu Beginn zwei charakteristische Fragen aus, zu denen sich letztlich alle Realist:innen und alle Antirealist:innen irgendwie positionieren müssen. Es sind im wahrsten Sinne existentielle Fragen.

Frage 1:

„(...) existiert die natürliche Welt unabhängig von unserem Geist? Genauer, hat die Materie eine stabile Gesamtheit von Eigenschaften an sich, unabhängig von unseren Wahrnehmungen und unserem Wissen?“

Frage 2:

„(...) können diese Eigenschaften von uns verstanden und beschrieben werden? Können wir genug in Bezug auf die Naturgesetze verstehen, um die Geschichte des Universums zu erklären und seine Zukunft vorherzusagen?“²

Physiker wie Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Louis de Broglie, David Bohm, John Stewart Bell, Detlef Dürr, Roger Penrose sowie das gesamte Personal der *Schleifenquanten-Gravitation* bzw. der *Loop Quantum Gravity* (und verwandte Ansätze), die beide Fragen mit „ja“ beantworten, betrachten wir als Realist:innen.

Wer auf die Frage 1 mit „nein“ antwortet, ist Antirealist:in. Ein besonders prominentes Beispiel dafür dürfte der

²Lee Smolin, *Quantenwelt*, DVA, 2019:18.

frisch gebackene Nobelpreisträger für Physik Anton Zeilinger sein, denn er ordnet die *Eigenschaften der Materie* ganz dem Subjektivismus unserer Operationen mit den Messgeräten zu – bis hin zu deren Herstellung. Damit vertritt Zeilinger einen hartnäckigen Antirealismus, wie wir ihn schon von Niels Bohr kennen.

Die Ablehnung des Realismus durch diesen antirealistischen Ansatz behauptet, dass atomare und Quantensysteme ihre Eigenschaften erst durch unsere Art der Messung *erhalten* – also durch unsere Art der *Operationen*, die wir mit ihnen durchführen. Eigenschaften der Objekte unabhängig von der Messung gibt es folglich nicht. Es gibt sie nur *operational* – wie man sagt. Und damit ist häufig lediglich die informationale Ebene von Zeigerstellungen an Messgeräten gemeint.

Zeilinger drückt das aber auch gerne so aus: „Die Trennung von Wirklichkeit und Information ist nicht haltbar.“³

Interessant ist sicherlich (für die gesamte Diskussion – Antirealismus versus Realismus), dass bei der Verleihung des Nobelpreises für Physik (2022) nicht nur Anton Zeilinger und John Clauser berücksichtigt wurden, sondern auch *Alain Aspect*, der (genau wie John Stewart Bell, um dessen Beweis es in den nachfolgenden Experimenten ging) ein expliziter Realist ist.

John Clauser hatte mit Stuart Freedman schon 1972 ein Experiment zur Überprüfung der berühmten Bell'schen Ungleichungen von 1964 durchgeführt – die bekanntlich eine quantitativ-experimentell falsifizierbare Formulierung des Einstein-Podolski-Rosen-Paradoxons (EPR) darstellen. Dieser Beweis hat nun in der Tat den *lokalen* Realismus widerlegt, wurde von den beiden allerdings auch als Falsifikation *aller möglichen Versionen* von „Hidden Variables“ im

³Diese Bemerkung hatte er übrigens schon 2006 (in einem YouTube-Video) gemacht und seither nicht verändert. Siehe YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=Ba7bALHHN8Q&t=293s>.

Allgemeinen verstanden. Das hat der Beweis aber mitnichten impliziert, wie wir gleich sehen werden.

Alain Aspect hatte dann 1982 verbesserte experimentelle Überprüfungen der Bell'schen Ungleichungen durchgeführt – mit einer ganz anderen Interpretation: nämlich (korrekt) als Bestätigung der nonlokalen Korrelationen *zusätzlich* zu den lokalen Wechselwirkungen. Nonlokale Korrelationen wurden dabei von Bell und Aspect von Anfang an *nicht* als Wechselwirkungen im üblichen Sinn eingeschätzt. Und obwohl Clauser tatsächlich die ersten Verschränkungsexperimente in Interferometern auf den Weg gebracht hatte, wurden selbige von ihm – genau wie später bei Zeilinger – als eine Widerlegung von Hidden Variables im Allgemeinen und als eine Abweisung der Kritik des Realismus an der orthodoxen Quantenmechanik (kurz *QM*) betrachtet.

John Stewart Bell hatte schon 1964 argumentiert, dass unsere Welt entgegen der Annahme Einsteins, bestimmte nonlokale Korrelationen aufweisen müsste (wie sie aus der *QM* folgen), womit Einsteins Lokalitätsannahme *für alle denkbaren Korrelationen* falsifiziert sein musste. Denn Einstein hatte gedacht, dass *alle* Korrelationen echte Wechselwirkungen sein müssten. Damit waren sie für ihn natürlich nur noch als unzulässige „spukhafte Fernwirkungen“ zu verstehen.

Nun hatte sich spätestens mit den Resultaten der Experimente zwar herausgestellt, dass Einstein unrecht damit hatte, nonlokale *Korrelationen* (aller Art) zu bezweifeln, aber natürlich nicht, dass er im Unrecht damit war, an der Möglichkeit von Hidden Variables fest zu halten. *Diesen* Realismus Einsteins haben nämlich beide, Bell und Aspect, von Anfang an zu *stärken* gesucht. Denn ihre Arbeiten haben *nicht* ergeben, dass Hidden Variables in der Wirklichkeit nicht existieren können, sondern ganz im Gegenteil, dass sie sehr wohl in einem nonlokalen Realismus in Form der *Verschränkungen selbst* existieren können. Das ist möglich, wenn man sie *nicht*

wie die orthodoxe *QM* als fundamental, sondern wie Smolin als *emergent* begreift – und Lokalität übrigens ebenso, nämlich im Zusammenhang eines *nicht*fundamentalen Raums (unten). In diesem Bild sind sie dann auch gar nicht mehr so „versteckt“. Fundamental kausal sind bei Smolin am Ende nur noch Energie-Impuls-Ereignisse (allerdings anders als bei Einstein sind sie in einen *irreversiblen* Zeitpfeil eingebunden, der keinerlei Raumzeit-Relativismus toleriert).

Der Realismus konnte also *nicht* erfolgreich von Bohrs Subjektivismus bzw. Operationalismus angegriffen werden – wie eine Mehrheit der Physiker seinerzeit dachte. Diese beiden Punkte werden häufig überhaupt nicht als *zwei* verschiedene Probleme gesehen.

Bell und Aspect haben gezeigt, wie wichtig es ist, diese beiden Punkte zu separieren, denn sie waren eben beide Realisten, die Einsteins Realismus *verteidigt* und (entsprechend korrigierend) um die Nonlokalität *erweitert* haben. Die ersten Bemühungen um eine solche *halbklassische* Beschreibungsweise in der Physik verdanken wir im Übrigen schon David Bohm.⁴ Diese erste Form einer *halbklassischen* Beschreibung, die sowohl klassische als auch Quantensysteme (separiert) auf ihren jeweiligen Skalen beschreibt, wurde in jüngster Zeit von den Physiker:innen aus dem Umfeld der Loop Quantum Gravity übernommen und konsequent weiterentwickelt.

Wir sehen in diesem Zusammenhang, dass *echte* Wechselwirkung (also *physikalischer* Informationsaustausch, der immer mit der einen oder anderen Form von Energie-Impuls-Übertragung zusammenhängt) tatsächlich höchstens mit *c* stattfinden kann (*das* nennt man lokal).

Bell wollte zum Thema separater (eigener) Eigenschaften zeigen, dass die Verletzung seiner Ungleichung (durch

⁴David Bohm, *Quantum Theory*, (1951), 1979, Prentice-Hall, Inc; Dover Publications, New York.

verschränkte Paare) gilt, was in allen folgenden Experimenten bestätigt wurde. Nur die Verschränkung zweier oder mehrerer Teilchen sorgt ja dafür, dass man den beteiligten Teilchen (in diesem neuen Zustand eben) keine separaten Eigenschaften mehr zusprechen kann, sondern nur noch der Verschränkung als ganzer (und die ist eben nonlokal in dem Sinne, dass sie *instantan* modelliert wird, also gar nichts mit Wechselwirkung bzw. Informationsübertragung im üblichen Sinne zu tun haben kann). Für *nicht*verschränkte freie Quantenteilchen gilt das aber eben nicht.

Das war eine Differenz, die vom Operationalismus entweder überhaupt nicht verstanden wurde oder aber nicht verstanden werden sollte. Denn die Vertreter dieser Position wollten mit ihrer Messtheorie ja gerade zeigen, dass man von hier aus doch auch den einzeln auftretenden Teilchen bzw. Quantensystemen die Realität eigener Eigenschaften absprechen könne.

Genau das versucht tatsächlich der *gesamte* Operationalismus, indem er behauptet, dass diese subjektivistisch herphantasierte individuelle Eigenschaftslosigkeit auch für nichtverschränkte Teilchen gelten müsse, denn deren Eigenschaften würden ja durch die operationale Beobachtung (= Messung) erst entstehen – gewissermaßen mit dem Bewusstsein des Beobachters „verschränkt“. Man könne also gar nicht sinnvoll von messungsunabhängigen Teilcheneigenschaften reden.

Das sind aber natürlich alles unzulässige Ableitungen, die nichts mit der Entdeckung der Nonlokalität verschränkter oder auch superponierter Systeme zu tun haben. Die gibt es nämlich nur *zusätzlich* zum quasiklassischen Verhalten von freien Teilchen mit definiten Eigenschaften.

Zelinger nahm (in einem neueren Interview) dazu insofern Stellung, als er gar nicht mehr (also auf keiner Größenskala) an Grenzen für Wellenüberlagerungen glauben mochte. Damit verschwinden natürlich die lästigen eigenen

bzw. nichtinterferierenden Eigenschaften einzelner freier Teilchen bzw. isolierter Wellen auf triviale Weise. Nun kann man das zwar rein logisch nicht ausschließen, wenn man das Ganze allerdings *idealistisch* aufzäumt, ergeben sich merkwürdige Ableitungen.

Als kleine Anekdote kann man hier vielleicht auch Zeilingers recht eigene Vorstellung eines theologisch inspirierten Determinismus anführen, auf den er in dem erwähnten Interview abhebt.⁵ Einstein hing bekanntlich einem Deismus an: Gott hat die Naturgesetze gemacht, greift aber danach nicht mehr ein. Wie metaphorisch Einstein das gemeint hat, lassen wir einmal dahingestellt. Zeilinger denkt dagegen (theistisch) an einen (auch aktuell eingreifenden) Gott, der seiner Meinung nach durchaus deterministisch auf den Zufall wirken kann. Gott macht da also anscheinend dasselbe wie die Operationalisten mit ihren Messinstrumenten – beide schaffen (zumindest im Moment der Detektion bzw. des göttlichen Eingriffs) offenbar *wirkmächtig* die unabhängigen Eigenschaften der Dinge ab.

1.1 Halbklassischer und Quantenrealismus

Dieser vom Operationalismus so angefeindete halbklassische Realismus sowie auch der Quantenrealismus wird aber von Smolin verteidigt und im Folgenden von ihm ausführlich analysiert.

Smolin erinnert in seinem Buch nämlich gleich zu Beginn daran, dass die meisten Wissenschaftler:innen – in Bezug auf mesoskopische bzw. makroskopische Dinge – klassisch realistische Positionen vertreten (vom Staubkorn bis zu

⁵Referenz: YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=Ba7bALHHN8Q&t=293s>.

Galaxien). Denn die und ihre (gewissermaßen makroskopisch „grobkörnigen“) Wechselwirkungen beschreiben wir ja immer noch erfolgreich in der klassischen Physik (Galilei, Kepler, Newton, Hamilton). Und als deren krönenden Abschluss betrachten wir wohl zu Recht Einsteins Relativitätstheorien.

Auf der Ebene der Atome und der Elementarteilchen finden sich schon erheblich weniger Realist:innen – was unmittelbar den indeterministischen Postulaten bzw. dem *rein* probabilistischen Ansatz der *orthodoxen* Quantenmechanik zu verdanken sein dürfte. Hier gibt es viele sozusagen vorsätzliche Antirealist:innen, die in der Regel glauben, dass die Quantenmechanik den Realismus (insbesondere in Form der möglichen Beurteilung einzelner Quantensysteme – in einem Aufwasch mit verborgenen Variablen) *ausschließt*.

Einstein war in diesem Zusammenhang bekanntlich der Erste, der den Verdacht äußerte, dass die orthodoxe Quantenmechanik unvollständig sein müsse – vor allem auch, weil Wellenfunktionen hier *nicht* als real gesehen wurden. Denn *das* erschien dem Entdecker des *Welle-Teilchen-Dualismus* bei Photonen⁶ wohl in der Tat einigermaßen *unvollständig*. Auch als de Broglie diesen Dualismus (ebenso stark experimentgestützt wie Einsteins Bosonen-Dualismus) auf das Elektron (und allgemein auf alle Fermionen) ausdehnen konnte, waren die Antirealisten nicht überzeugt.

Das ist natürlich nicht wirklich überraschend, denn die Kopenhagener und Göttinger Physiker hatten sich ja schon geweigert, *wenigstens das Teilchen* nicht operationalistisch zu behandeln. Das gab es bei ihnen ja auch nur während einer Messung, eben im Moment der Messung in seiner ganz eigensinnigen Existenz als „Messteilchen“, gewissermaßen ohne eigene Vergangenheit und Zukunft. Und so halten die Antirealist:innen das bis heute vor.

⁶Entdeckt bekanntermaßen unisono mitsamt dem photoelektrischen Effekt, der Teilcheneigenschaft.

An die Unvollständigkeit der orthodoxen Quantenmechanik glauben dagegen alle Nachfolger:innen Einsteins im Realismus ebenfalls bis heute. Und das tun sie, weil in der Quantenmechanik (eben aufgrund der rein operationalistischen Philosophie) genau genommen *die gesamte Ontologie* fehlt. Anders gesagt, unvollständiger geht es eigentlich gar nicht.

Die Antirealist:innen werden von Smolin in drei Gruppen eingeteilt:

In der ersten Gruppe werden jene genannt, die die Eigenschaften der Elementarteilchen *nicht* für intrinsisch halten. Die Eigenschaften sollen, wie erwähnt, ausschließlich existieren zu dem Zeitpunkt, an dem wir sie messen – sie werden also gewissermaßen jeweils erst so recht „erzeugt“ durch unsere Interaktionen mit den Teilchen. Diese Gruppe kann man wohl zu Recht als „radikale Antirealisten“ bezeichnen. Und der radikalste Vertreter dieser Position war Niels Bohr.

In der *zweiten Gruppe* findet sich die Auffassung, dass theoretische Physiker (und Philosophen allgemein) sich nicht mit den materiellen Dingen an sich bzw. deren physikalischen Eigenschaften beschäftigen sollten, sondern nur mit unserem Wissen darüber, sofern das mathematikintern widerspruchsfrei zu formulieren wäre.

Es war zwar schon immer (logisch) einigermaßen unklar, wie man ohne Voraussetzung von materiellen Dingen zu irgendwelchem Wissen – auch nur über das eigene Wissen – gelangen sollte, denn schließlich sind wir auch materielle Körper. Das heißt, unser Wissen wird in diesen Körpern geboren und verarbeitet. Nichtsdestoweniger werden diese idealistischen Positionen – insbesondere in der Quantendiskussion – immer noch irritationslos angeboten.

Smolin nennt die Vertreter dieser Position *Quantenepistemologen*, weil sich dieser Personenkreis bevorzugt auf rein erkenntnistheoretische bzw. methodologische Fragestellungen nach dem „Wie“ des Erkenntnisgewinns

zurückzieht – also nicht mehr ontologisch nach dem „Was“ fragt.

Der Bayesianismus, der sich auf rein subjektive Grade eines „Fürwahrhaltens“ (durch „Fachleute“, die nicht näher definiert werden) beschränkt, gehört hier neuerdings zu den auffälligsten Vertretern. Karl Popper, der ja im Zusammenhang von *Propensitäten* (= objektiven Verwirklichungstendenzen) eine objektive Wahrscheinlichkeitsinterpretation in seiner *Logik der Forschung* vorgelegt hatte, hat den Bayesianismus übrigens schon sehr früh als eine weitere Spielart des *Subjektivismus* der sogenannten „induktivistischen“ Wahrscheinlichkeit des logischen Empirismus identifiziert. Denn die Interpretation der Wahrscheinlichkeit durch die Bayesianer und ihre Nachfolger hatte in der Tat nie irgendetwas mit objektiver Wahrscheinlichkeit zu tun.

Formal bzw. ableitungstechnisch ist die Wahrscheinlichkeit bei Thomas Bayes mit $P(A|B)$ natürlich völlig korrekt dargestellt.⁷ Sie besagt, dass die *bedingte* Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A unter der Bedingung, *dass B eingetreten ist*, gültig ist. Formal ist diese Formel also völlig unschuldig, weil zwangsläufig tautologisch (als Wenn-dann-Satz). Das *Erkennen* der Wahrheit von B wird nun allerdings im Zusammenhang eines subjektiven „Für-wahr-haltens“ als hinreichend vorhanden betrachtet. Letzteres wiederum wird über Grade der angeblichen „Bewahrheitung“ der jeweiligen Behauptung angeboten. Gemeint sind damit bestimmte „bestätigende“ Instanzen induktivistisch aufgezählter Beobachtungsbeispiele.

Häufig wird dieser Subjektivismus aber sogar rein a priori angeboten. Das heißt, *Überprüfungen* dieser „Fachurteile“ sind gar nicht vorgesehen. Im Zusammenhang des sogenannten Quanten-Bayesianismus (kurz: QBismus) ist man dann auch gern mal davon überzeugt, die

⁷Vollständig: $P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$.

„Quantenparadoxien“ der Superpositionen schon a priori „entschärft“ zu haben. „Eine neue Deutung namens QBismus geht davon aus, dass die Wellenfunktion nur die subjektive Erwartungshaltung des quantenmechanischen Beobachters wiedergibt.“⁸ Das kann dann offenbar übergangslos zum Wahrheitskriterium promoviert werden.

Da die Wellenfunktion ja für den gesamten Antirealismus nicht als real gilt, sondern lediglich als mathematisches Werkzeug verstanden wird, kann man den QBismus als radikal-subjektivistische Spielart der allgemeinen antirealistischen Position betrachten.

Die *dritte* von Smolin genannte Gruppe ist der Operationalismus. Weil diese Position bei ihm besonders treffend beschrieben ist, möchte ich ein Originalzitat verwenden. Wir haben schon gehört, dass die Quantenmechanik sich nicht auf unabhängige Wirklichkeit (über Messungsergebnisse hinaus) beziehen soll:

„(...) vielmehr ist sie eine Menge von Verfahrensweisen zur Befragung von Atomen. Sie bezieht sich nicht auf die Atome selbst, sondern darauf, was geschieht, wenn Atome in Kontakt mit großen Vorrichtungen treten, die wir zu ihrer Messung benutzen.“⁹ Werner Heisenberg wird hier als bekanntester Vertreter genannt.

Um nun die unterschiedlichen *realistischen* Ansätze weiter darzustellen, stellt Smolin eine *dritte* Frage:

„Besteht die natürliche Welt hauptsächlich aus der Art von Gegenständen, die wir sehen, wenn wir uns umblicken, und aus den Dingen, aus denen sie zusammengesetzt sind?“¹⁰

Und weiter gefragt, wäre das Ganze typisch für das gesamte Universum? Ein naiver Realist würde hier wohl mit *ja* antworten. *Naiv* ist bei Smolin aber in keiner Weise abwertend gemeint, sondern sollte im Sinne von „stark,

⁸Hans Christian von Baeyer, „Spektrum der Wissenschaft“, 11/2013.

⁹Lee Smolin, *Quantenwelt*:21–22.

¹⁰*Quantenwelt*:22.

unverbraucht, unkompliziert“ aufgefasst werden. Dieser Titel ist also genau besehen eine Lanze für einen *mutigen* Realismus, der sich nicht vor seinem eigenen Schatten fürchtet, als wäre *er* eine seltsame Weltansicht. Denn wir sehen die wirklich wunderlichen Positionen doch eher in den verschiedenen Erscheinungsformen des Antirealismus und sogar noch bei den Ideen eines hilflos verkomplizierten mystischen oder „magischen Realismus“, wie Smolin das später explizit nennt.

Die letztgenannten Vertreter des Realismus glauben etwa, dass die Welt, wie wir sie wahrnehmen, nicht typisch für unser gesamtes Universum ist. Sie bezeichnen unsere Wahrnehmungsinterpretationen als „subjektiv“, weil wir gewissermaßen nur jeweils aus *einer* von vielen *verwirklichten* Möglichkeitswelten auf diesen angeblich subjektiven Ausschnitt blicken, den wir gewöhnlich als das komplette (sichtbare) Universum betrachten, dabei aber in den anderen Welten ebenfalls (in einer alternativen Existenz) leben würden (davon aber nichts wüssten). Sie postulieren in diesem Zusammenhang „Viele Welten“ in Form von *Wellenverzweigungen*, die untereinander *keine* kausalen Verbindungen besäßen und von denen wir deshalb auch keine Wirkungen spüren könnten.¹¹

Ich sollte vielleicht zugeben, dass ich selbst anfangs nicht ganz ungerührt über dieses „Wunschwelten-Setting“ nachgedacht habe. Im Bild dieser vielen Welten wird aber (bei genauerem Hinsehen) jede quantenmechanische Superposition als Möglichkeitsüberlagerung – in einem Meer von universell kausal unverbundenen Wellenverzweigungen – zu

¹¹ Speziell von Heinz Dieter Zeh wird diese kausale Abgeschlossenheit der einzelnen Wellenverzweigungen übrigens als eine *Folge* der Dekohärenz dargestellt, die letztlich zu den vielen Welten von Everett III führen müsse. Nun werden durch Dekohärenz zwar Superpositionen gestört oder auch völlig zerstört (das wird eingeräumt), aber laut Zeh unmittelbar auch wieder in anderen, neuen Überlagerungen aufgelegt, die kausal nichts mehr mit den alten zu tun haben sollen. Letzteres ist eine unüberprüfbare Hypothese. Wir werden weiter unten eine weniger barocke Definition von Dekohärenz kennenlernen.

einer jeweils *eigenen Welt*. Und die wird dann folgerichtig als jeweils nur *subjektiv* erfahrbar betrachtet, weil man von hier aus die jeweils anderen kausal abgeschlossenen Welten nicht sehen kann.

Dieser Vorstellung wird man allerdings nur beipflichten wollen, solange man die Prämisse ernst nimmt, dass sich buchstäblich bei jeder Wechselwirkung im Universum, durch dekohärierende Zerstörung der alten, nun verschwundenen Superposition, zwei oder noch mehr neue Wellenverzweigungen inkludiert in *neuen* Superpositionen bilden. Und das hat man sich in einer geradezu *titanischen* Superpositionsproliferation vorzustellen – wenn man sich überlegt, wie viele derartige Wechselwirkungen es wohl pro Sekunde in unserem Universum geben mag.

Und insbesondere fragt man sich wohl, warum die dann kausal unabhängig sein sollten und wie das physikalisch überhaupt gehen soll in (per definitionem) *ein und demselben Universum*, denn sie müssten ja im Dekohärenzgeschehen jeweils *lokal entstehen* (also als Anfangsbedingung kausalen lichtartigen Abstand besitzen, nicht etwa raumartigen).

Als Ableitung aus diesen Überlegungen betrachte ich die Vorstellung der vielen Welten deshalb inzwischen eher als eine Art frommes Wunschwelten-Programm im Realismus – oder mit Smolin als „magischen Realismus“. Denn man muss sich klarmachen, mit dieser Theorie gibt es kein wirkliches Sterben. Das könnte einem magischen Realisten sicherlich als quasireligiöse Trostvorstellung dienen. Wenn man in der einen Wellenverzweigung stirbt, lebt man mit der Wahrscheinlichkeit, $P = 1$, also notwendig, in einer anderen weiter – weil ja immer *alle* Möglichkeiten *verwirklicht* sind in jeweils eigenen Welten. Die einzelne Welt, in der man sich jeweils partiell *erlebt*, wird folglich als *subjektiv* (klassisch) betrachtet.



2

Teilchen und ihre Wellen

2.1 Superpositionen der Quanten

In der Viele-Welten-Theorie (wie im Übrigen auch in vielen anderen Ansätzen realistischer Provenienz) besteht die Schwierigkeit zu bestimmen, wo die Grenzen der quantenmechanischen Superposition (bezogen auf *alle* Größenskalen) liegen müssten. Ein *nicht* magischer Realist würde wohl sagen: im Auftreten von *echten Dekohärenzen*, die eben *nicht* zu jeweils neuen Wellenverzweigungen führen.

Stattdessen entstehen daraus letztlich – durch die Zerstörung der Superpositionen – sowohl quantenmechanische Individualitäten einzelner, eben nicht interferierender Quantensysteme und emergent letztlich auch quasiklassische Realisierungen der jeweiligen *Entitäten* in Größenordnungen, in welchen die Gesamtwellenlängen der beteiligten Atome unterhalb des Durchmessers der jeweiligen makroskopischen Entitäten liegen. Und mit einer solchen (demystifizierten) Dekohärenz wird auch das Problem mit Schrödingers Katze im halb klassischen Realismus gelöst. Die Katze steht,

aufgrund ihres Durchmessers, der (wegen ihrer großen Masse) immer sehr viel größer ist als ihre Gesamtwellenlänge, einfach nicht mehr für Überlagerungen aus der umgebenden Quantenwelt zur Verfügung. Das heißt, nicht nur während der Öffnung, sondern auch vor der Öffnung (und auch wieder nach der Schließung) des Kastens ist die Katze immer *entweder* tot *oder* lebendig – nie beides zugleich. An Letzteres (also gewissermaßen an die Mystizismus-Version des Antirealismus) mochte die Mehrzahl der Kommentator:innen ja vielleicht auch schon rein logisch nie im Ernst glauben.

In einem (im wahrsten Sinne) *angemessenen* realistischen Gesamtbild unserer Welt scheint es opportun, klassische Größenordnungen *in ihrem Verhalten* bzw. in ihren Eigenschaften vom Verhalten der Quantensysteme zu unterscheiden, denn ihr Verhalten unterscheidet sich ja tatsächlich.

Quantensysteme und bestimmte atomare Entitäten bis hin zu durchaus erheblichen Molekülgrößen können (insbesondere in geeigneten experimentellen „Fallen“ zu denen trivialerweise auch Quantencomputer gehören) jederzeit superponieren – emergente makroskopische Systeme offenbar nicht. Dieser halb klassische Ansatz, an den Lee Smolin in seiner Trennung von *Fundamentalem* und *Emergentem* anknüpft (unten), stammt in erster Instanz tatsächlich schon von David Bohm.

Superpositionen von Quantenteilchen (bzw. deren Eigenschaften, wie etwa ihren Impuls oder ihren Ort) können wir nichtsdestoweniger in unserem einen und einzigen ungeteilten Universum ansiedeln und zugeben, dass sich Photonen und auch Elektronen (wie wir durch Einstein und de Broglie gelernt haben) je nach dem Modus ihrer Wechselwirkungen in ihrer Welleneigenschaft oder in ihrer Teilcheneigenschaft zeigen können. Denn wir sehen ja beide Verhaltensweisen bzw. die materiellen Auswirkungen ihrer jeweiligen Existenz auf Fotoplatten, Detektionsschirmen