

|INDETERMINATE⟩⟨APPARATUS|

Civa – Contemporary Immersive Virtual Art

GLOSSAR

Agentieller Realismus

Die Quantenphysik hat unser Verständnis von Realität fundamental verändert. Auf grundlegende Fragen nach dem Wesen von Raum, Zeit, Materie oder Realität liefert sie keine allgemeingültigen Antworten, sondern eröffnet unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten. Der von Karen Baradⁱ vorgeschlagene Ansatz des Agentiellen Realismus geht davon aus, dass die Realität nicht unabhängig von den Praktiken ist, durch die sie hervorgebracht wird. Materie und Bedeutung sind untrennbar miteinander verbunden.

Beobachter*in

Anders als in der klassischen Physik kommt der*dem Beobachter*in in der Quantenphysik eine besondere Rolle zu. Während man in der klassischen Physik davon ausgehen kann, dass physikalische Zustände unabhängig von der Beobachtung real existieren, ist das in der Quantenphysik nicht mehr so klar. Die*der Beobachter*in ist nicht länger außenstehend und unbeteiligt, sondern trägt aktiv zur jeweiligen Beobachtung bei.

Beobachtung

Was genau bei der Beobachtung geschieht, zählt zu den großen Mysterien der Quantenphysik. Der mathematische Formalismus bietet uns eine präzise Beschreibung von Quantensystemen und erlaubt, Wahrscheinlichkeiten vorherzusagen. Was aber genau bei der Beobachtung geschieht, warum ein bestimmter Zustand beobachtet wird und nicht ein anderer, bleibt rätselhaft.

Bra-Ket-Notation

Die erstaunlichen Vorgänge in Quantensystemen entziehen sich vielfach unserer Alltagssprache, können aber mathematisch sehr präzise beschrieben werden. Die wohl beliebteste mathematische Notation der Quantenphysik stammt von Paul Dirac, der auch die Bezeichnung „Bra-Ket-Notation“ einführte: Er nutzte bestimmte Klammern, um Zustände von Quantensystemen und deren Beziehungen auszudrücken. ⁱⁱ Die Hauptelemente sind der Vektor Ket mit der Schreibweise $|\psi\rangle$ und der dual konjugierte Vektor Bra $\langle\varphi|$, also ein mathematisches Objekt und ein dazugehöriges mathematisches Objekt.

Determinismus

Alles, was geschieht, ist vollständig durch vergangene Ursachen festgelegt und könnte mit genügend Wissen exakt vorausgesagt werden – das ist die Idee des Determinismus. Indem die Quantenphysik nur statistische Wahrscheinlichkeiten für Ereignisse vorhersagt, einzelne Messergebnisse aber nie mit Gewissheit prognostizieren kann, widerspricht sie einem strengen Determinismus. Auch spielt beim spontanen Verhalten von Quantensystemen der Zufall eine fundamentale Rolle. Dass die*der

Beobachter*in durch die Messung Zustände beeinflusst, ist mit einem strengen Determinismus ebenfalls nicht verträglich.

Freier Wille

Ist der Determinismus erst einmal aus den Angeln gehoben, ergeben sich noch weitere Fragen, etwa danach, ob es einen freien Willen gibt. Quantenphysiker*innen beschäftigen sich damit schon lang, einen bekannten Vorstoß zum freien Willen von Experimentator*innen sowie von Elementarteilchen lieferten John Conway und Simon Kochen.ⁱⁱⁱ Eine letztgültige Antwort auf die Frage, ob es einen freien Willen gibt, steht noch aus – quantenphysikalische Prozesse im Gehirn sind bis heute rätselhaft.

Intra-Aktion

Interaktionen oder Wechselwirkungen spielen in der Teilchenphysik eine wichtige Rolle: Selbstredend wird bei der Beschreibung solcher Interaktionen davon ausgegangen, dass die Teilchen bereits existieren, bevor sie miteinander wechselwirken. Das von Karen Barad eingeführte Konzept der Intra-Aktion hingegen betont, dass die Realität von Teilchen oder anderen Entitäten erst von deren In-Beziehung-Treten bestimmt wird.^{iv}

Materie

Zwar ist Materie elementar und allgegenwärtig, dennoch hat die Wissenschaft Probleme damit, zu beschreiben, was genau sie ist. In der klassischen Physik wurde Materie als Substanz gedacht: alles Stoffliche, das Masse besitzt und Raum einnimmt. Gemäß der modernen Physik ist alle Materie aus Elementarteilchen aufgebaut, diese wiederum werden als Anregungszustände von Quantenfeldern verstanden, die als fundamentale, räumlich verteilte Entitäten im Universum nicht nur Materie und Energie, sondern auch Kräfte und Wechselwirkungen beschreiben. Für Denker*innen wie Karen Barad ist zentral, dass Materie nicht passiv, sondern handelnd und relational ist.

Objektivität

Ist der Mond da, wenn niemand hinsieht? Ja, würde man aus einer herkömmlichen, klassischen Perspektive argumentieren, in der es sinnvoll ist, zwischen einer subjektiven Beobachtung und einer objektiven Realität zu unterscheiden. Da die Beobachtung in der Quantenphysik kein neutraler Prozess ist, sondern den Zustand des gemessenen Systems beeinflusst, ist ein klassisches Verständnis von Objektivität im Lichte der Quantenphysik nicht mehr länger aufrechtzuerhalten.

Potenzialität

Da die Quantenphysik mit statistischen Wahrscheinlichkeiten operiert und keine definitiven Vorhersagen für Einzelereignisse erlaubt, steht die Möglichkeit oder Potenzialität im Fokus der quantenmechanischen Beschreibung: Solange ein System nicht gemessen ist, entwickelt es sich gemäß all seiner Möglichkeiten. Erst durch die Messung wird ein bestimmter Zustand realisiert.

Quant

Namensgebend für die Quantenphysik war die Einsicht von Max Planck, dass Energie quantisiert übertragen wird, also in diskreten Paketen.^v Ein Quant ist demnach die kleinste Einheit einer physikalischen Größe wie Energie. Der Ansatz der Quantisierung klingt nach einer recht marginalen

Idee. Wie sich herausgestellt hat, ergeben sich daraus aber erstaunliche Konsequenzen, die im Rahmen der Quantenphysik beschrieben werden.

Quantencomputer

Im Gegensatz zu klassischen Computern, die mit Bits (0 oder 1) arbeiten, nutzen Quantencomputer Qubits, die gleichzeitig 0, 1 oder eine Überlagerung beider Zustände sein können. Die besonderen Effekte der Quantenphysik wie Superposition und Verschränkung ermöglichen, komplexere Rechenprobleme zu lösen. Quantencomputer arbeiten daher nicht mit einer binären Ja-Nein-Logik, sondern können nichtbinäre, mehrdimensionale quantenphysikalische Zustände nutzen.

Quantenphysik

Die Quantenphysik ist neben der Relativitätstheorie eine der beiden großen Theorien der modernen Physik. Sie wurde ab 1900 entwickelt und ist der Oberbegriff für alle physikalischen Theorien und Konzepte, die auf dem Prinzip der Quantisierung basieren. Dazu zählen etwa die Quantenmechanik, die Quantenfeldtheorie, aber auch die Quanteninformationstheorie, aus der sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Quantentechnologien

Werden quantenphysikalische Prinzipien gezielt genutzt, um bestimmte technische Aufgaben zu lösen, spricht man von Quantentechnologien. Dabei werden meist zwei Generationen unterschieden: Zu den frühen Quantentechnologien zählen Laser, Transistoren und Halbleiterbauelemente, weshalb auch klassische Computer und Smartphones als Quantentechnologien gelten. Als Quantencomputer bezeichnet man sie dennoch nicht – diese gehören der zweiten Generation von Quantentechnologien an, die besondere Effekte der Quantenphysik wie Superposition und Verschränkung nutzen.

Realität

Die Vorstellung von einer objektiven Welt, die unabhängig von der Beobachtung existiert, diese Vorstellung von Realität erscheint durch die Quantenphysik zweifelhaft. Verschiedene Interpretationen der Quantenphysik bieten unterschiedliche Erklärungen dafür an, was real ist. Sie reichen von einer relationalen Ontologie, in der die grundlegenden Bausteine der Realität keine Dinge sind, sondern Beziehungen,^{vi} bis hin zur Viele-Welten-Theorie, in der unendlich viele Universen parallel existieren.^{vii}

Schrödingers Katze

Um zu zeigen, wie absurd die Quantenphysik ist, übertrug Erwin Schrödinger in einem Gedankenexperiment Quantenphänomene auf ein Lebewesen: Wird eine Katze in einer Kiste mit einer radioaktiven Substanz positioniert, hängt ihre Existenz vom Verhalten des radioaktiven Atoms ab. Solange die Kiste geschlossen bleibt, erlaubt die Quantenphysik nur Wahrscheinlichkeitsaussagen. Die Katze befindet sich somit in einem Überlagerungszustand von tot und lebendig. Erst das Öffnen der Kiste ermöglicht eine definitive Aussage.^{viii}

Schwarze Löcher

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein ist der Raum nicht statisch und unveränderlich, sondern wird durch massive Objekte gekrümmt, wobei die Krümmung stärker ausfällt,

je größer die Masse ist. Wenn Masse sehr stark in einem sehr kleinen Raum konzentriert ist, entsteht im Extremfall ein schwarzes Loch. Dessen Gravitation ist so massiv, dass in einer bestimmten Umgebung nichts mehr entweichen kann, nicht einmal Licht.

Spukhafte Fernwirkung

Obwohl er maßgeblich zu ihrer Entwicklung beitrug,^{ix} hatte Albert Einstein allerhand an der Quantenphysik auszusetzen: Einerseits stieß er sich daran, dass der Zufall eine fundamentale Rolle zu spielen scheint. Darüber hinaus erkannte er, dass Quantensysteme auf eine Weise korreliert sein können, die es so bei klassischen Systemen nicht gibt. Er bezeichnete diese Verschränkung abschätzig als „spukhafte Fernwirkung“^x.

Superposition

Der Gedanke, dass sich ein Teilchen an mehreren Orten zugleich befinden kann, ist eine der faszinierendsten und erstaunlichsten Erkenntnisse der Quantenphysik. Das Prinzip wird Superposition oder Überlagerung genannt. Gemäß der Quantenphysik kann sich ein Quantenobjekt in mehreren Zuständen gleichzeitig befinden, solange es nicht gemessen wird. Erst durch die Messung wird ein bestimmter Zustand realisiert, und der Superpositionszustand „kollabiert“.

Teilchen

Eine feste Kugel mit einem bestimmten Aufenthaltsort – so hat man sich Teilchen in der klassischen Physik vorgestellt. Quantenphysikalisch betrachtet ist die Beschreibung von Teilchen wesentlich komplexer. Im Sinne der Quantenfeldtheorie handelt es sich dabei um den quantisierten Anregungszustand eines Feldes. Der Aufenthaltsort lässt sich vor der Messung nur mit Wahrscheinlichkeiten angeben, und auch weitere Eigenschaften des Teilchens sind erst durch die Messung klar bestimmbar.

Unbestimmtheit

Obwohl es unserer Intuition widersprechen mag, sind die Eigenschaften von Quantensystemen unbestimmt, solange sie nicht gemessen sind. Diese Unbestimmtheit bezieht sich nicht nur darauf, was wir über die Quantensysteme wissen, sondern diese sind in einem objektiven Sinn nicht festgelegt.

Verschränkung

Die Verschränkung gilt neben der Superposition als Herzstück der Quantenphysik. Dabei sind zwei oder mehrere Quantenobjekte, die sich ihrerseits jeweils in Superpositionszuständen befinden, miteinander so verbunden, dass ihr Zustand nicht unabhängig voneinander beschrieben werden kann. Eine Änderung bei einem Teil führt daher zu einer sofortigen Zustandsänderung bei den verschränkten Partnern – selbst über große Distanzen hinweg. Die Grundidee stammt von Einstein und Kollegen,^{xi} der Begriff Verschränkung (engl. *entanglement*) wurde von Erwin Schrödinger geprägt.^{xii}

Wellenfunktion

Die Wellenfunktion ist das mathematische Objekt, mit dem ein Quantenzustand beschrieben wird. Üblicherweise wird sie mit dem griechischen Buchstaben ψ bezeichnet. Da die Wellenfunktion nicht

direkt beobachtet werden kann, scheiden sich die Geister darüber, ob sie eine reale Bedeutung jenseits ihrer mathematischen Funktion hat, und wenn ja, welche. Jedenfalls lässt sich aus der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit ableiten, ein Teilchen bei einer Messung an einem bestimmten Ort zu detektieren.

ⁱ Karen Barad, *Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*, Durham 2007.

ⁱⁱ P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4., überarb. Ausg., Oxford 2010.

ⁱⁱⁱ John Conway / Simon Kochen, „The Free Will Theorem“, in: *Foundations of Physics*, 36. Jg., Heft 10, 2006, S. 1441–1473.

^{iv} Barad 2007 (wie Anm. 1).

^v Max Planck, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum“, in: *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2. Jg., 1900, S. 237–245.

^{vi} Carlo Rovelli, „Relational Quantum Mechanics“, in: *International Journal of Theoretical Physics*, 35. Jg., Heft 8, 1996, S. 1637–1678.

^{vii} Hugh Everett, „‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics“, in: *Reviews of Modern Physics*, 29. Jg., Heft 3, 1957, S. 454–462.

^{viii} Erwin Schrödinger, „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“, in: *Die Naturwissenschaften*, 23. Jg., Heft 48, 1935, S. 807–812.

^{ix} Albert Einstein, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, in: *Annalen der Physik*, 17. Jg., Heft 6, 1905, S. 132–148.

^x Albert Einstein / Max Born / Hedwig Born, *The Born-Einstein Letters: Friendship, Politics, and Physics in Uncertain Times. Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with Commentaries by Max Born*, New York 2005.

^{xi} Albert Einstein / Boris Podolsky / Nathan Rosen, „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“, in: *Physical Review*, 47. Jg., Heft 10, 1935, S. 777–780.

^{xii} Schrödinger 1935 (wie Anm. 8).