

# Quantenphysik ohne Quantenphilosophie

Detlef Dürr und Dustin Lazarovici  
Mathematisches Institut, LMU München

## Quantenphilosophie

Wenn man beginnt, sich mit der Quantenmechanik zu beschäftigen, muss man vor allem von der Behauptung erschüttert sein, dass mit der „Quanten Revolution“ die Unmöglichkeit festgeschrieben wurde, die Natur in klassischen Begriffen verstehen zu können. Damit meinen wir Begriffe, die von „realen Dingen“ handeln, „draußen in der Welt“. Dem klassischen Verständnis nach ist es die Aufgabe der Physik, die Grundbausteine der Naturbeschreibung zu benennen und die Gesetze zu finden, denen sie gehorchen – so wie beispielsweise das Newtonsche Gravitationsgesetz die Bewegung materieller Punktteilchen beschreibt, die sich vermöge ihrer Massen gegenseitig anziehen. In diesem Sinne entwickelt die physikalische Theorie ein Bild einer objektiven, äußeren Realität. In der Quantenmechanik lernt man, dass die Natur sich einer solchen Beschreibung entzieht. Einer der Urväter der Quantenmechanik, Werner Heisenberg, etwa schrieb, es sei unmöglich ...

„ ... zu der Realitätsvorstellung der klassischen Physik [...] zurückzukehren, also zur Vorstellung einer objektiven, realen Welt, deren kleinste Teile in der gleichen Weise objektiv existieren wie Steine und Bäume, gleichgültig, ob wir sie beobachten oder nicht.“ (Heisenberg 1959, S. 120)

In der Quantenmechanik spricht man zwar ebenfalls von „Teilchen“ wie etwa Elektronen, doch stets mit dem eiligen Zusatz, dass man sich diese nicht als Teilchen im eigentlichen Sinne vorstellen dürfe. In einem der prominentesten Lehrbücher heißt es beispielsweise:

„Dieses Ergebnis kann natürlich nicht mit der Vorstellung von der Bewegung der Elektronen entlang einer Bahn in Einklang gebracht werden. [...]. In der Quantenmechanik gibt es den Begriff der Bahn eines Teilchens nicht.“ (Landau und Lifschitz 1979, S. 2)

Aussagen dieser Art sind gang und gäbe, wenn es um Quantenphysik geht, was die Frage aufwirft: Wovon handelt dann Quantenmechanik eigentlich?

Für Physikstudenten ist es zunächst ein Haufen abstrakter Mathematik, über „Hilberträume“, über „selbstadjungierte Operatoren“ und „quadratintegrierbare Funktionen“, und man mag die Hoffnung haben, dass man mit dem weitergehenden Verständnis dieser Mathematik auch Einsicht in den physikalischen Inhalt der Theorie erhält. Doch das geschieht nicht.

Im besten Fall kommt man dahin, über das „Messproblem“ nachzudenken, über Schrödingers Katze also, und die Frage, warum unsere Erfahrungswirklichkeit so gänzlich anders aussieht, als ein typischer Zustand in der Quantenmechanik. Und vielleicht wird einem dann gesagt, dass mit der Theorie an sich schon alles in Ordnung sei und bloß deren Interpretation noch Gegenstand andauernder Debatten ist. Doch am Ende des Tages bleibt wohl der Eindruck, dass ein Verständnis der Natur im ursprünglichen Sinne des Wortes unmöglich ist. Der Determinismus und die Idee einer objektiven physikalischen Realität wurden mit der Quantenmechanik zu Grabe getragen. Es ist bekannt, dass unter anderen Albert Einstein große Einwände dagegen erhob. Man hört häufig, er habe die Debatte verloren.

Zusammen mit der Quantenphysik entstand auch die Disziplin der *Quantenphilosophie*. Die Quantenphilosophie versucht zu begründen warum, ganz gleich wie skurril und unverständlich uns die Quantenmechanik erscheinen mag, Physik gar nicht anders sein kann – warum also eine Beschreibung der Natur im klassischen Sinne prinzipiell unmöglich ist. Gleichzeitig muss sie aber erklären, wie die Quantenmechanik dennoch unsere Erfahrungswirklichkeit beschreiben kann, in der Katzen entweder tot oder lebendig, nicht aber beides zugleich oder keines von beidem sind. Man könnte vielleicht auf die Idee kommen, eine physikalische Theorie, die ohne Bezüge zu einer objektiven Realität auskommt, sei gerade in ihrer philosophischen Dimension reduzierter, bescheidener, womöglich auch simpler. Doch das stimmt nicht. Quantenphilosophie ist nicht zu verstehen.

Niels Bohr, einer der Begründer der Quantenphilosophie, vertrat die Überzeugung, dass ein rationales Verständnis der Natur in den Grenzen klassischer Logik prinzipiell unmöglich ist. Stattdessen schlug er ein neues Konzept vor, das er „Komplementarität“ nannte. Er schreibt:

„Das in Frage stehende Erkenntnisproblem läßt sich wohl kurz dahin kennzeichnen, daß einerseits die Beschreibung unserer Gedankentätigkeit die Gegenüberstellung eines objektiv gegebenen Inhalts und eines betrachtenden Subjekts verlangt, während andererseits – wie schon aus einer solchen Aussage einleuchtet – keine strenge Trennung zwischen Objekt und Subjekt aufrechtzuerhalten ist, da ja auch der letztere Begriff dem Gedankeninhalt angehört. Aus dieser Sachlage folgt nicht nur die relative von der Willkür in der Wahl des Gesichtspunktes abhängige Bedeutung eines jeden Begriffes, oder besser jeden Wortes, sondern wir müssen im allgemeinen darauf gefaßt sein, daß eine allseitige Beleuchtung eines und desselben Gegenstandes verschiedene Gesichtspunkte verlangen kann, die eine eindeutige Beschreibung verhindern. Streng genommen steht ja die bewußte Analyse eines jeden Begriffes in einem ausschließenden Verhältnis zu seiner unmittelbaren Anwendung.“ (Bohr 1931, S. 62-63)

Erwin Schrödinger beschreibt seine Unterhaltungen mit Bohr folgendermaßen:

„Bohrs augenblickliche Einstellung zu den Atomproblemen [...] ist wirklich sehr merkwürdig. Er ist vollkommen überzeugt, daß ein Verständnis im gewöhnlichen Sinne des Wortes unmöglich ist. Dabei treibt das Gespräch fast immer sofort philosophischen Fragen zu und man weiß bald nicht mehr, ob man den Standpunkt wirklich einnimmt, den er bekämpft und ob man wirklich den Standpunkt, den er einnimmt, bekämpfen muß.“ (Brief an Wien vom 21. Oktober 1926; zitiert nach von Meyenn 2011, S. 320-322, hier S. 320-321)

Am Ende des Tages, wenn alles gesagt ist, bleibt von der Quantenphilosophie vor allem die Moral, dass man nicht versuchen sollte, zur Beschreibung einer objektiven Realität zurückzukehren. Das ist der Kern des Ganzen. Mit anderen Worten: Quantenphilosophie beginnt dort, wo die Notwendigkeit einer *Ontologie* geleugnet wird. Dann, wenn die physikalische Theorie nicht sagen kann oder nicht sagen will, was die fundamentalen, die realen Objekte ihrer Naturbeschreibung sind, kurz, worüber sie eigentlich handelt, bleibt uns nichts übrig, als ins Philosophische abzuschweifen.

### Ich sah das unmögliche vollbracht ...

Einstein hat sich zeit seines Lebens geweigert, die Dogmen der Quantenmechanik als letztes Wort in der Sache zu akzeptieren. Er bestand auf einer objektiven und deterministischen Beschreibung der Welt. Gerade die probabilistische Natur der Quantenmechanik, die Tatsache, dass in der Quantenphysik der Zufall zu regieren scheint, war für ihn stets nur Beleg für die Unvollständigkeit der Theorie, dafür, dass uns entscheidende Bestimmungsstücke fehlen, zusätzliche Variablen, die den Zustand der Welt vollständig beschreiben.

„Ich bin sogar fest davon überzeugt, daß der grundsätzlich statistische Charakter der gegenwärtigen Quantentheorie einfach dem Umstande zuzuschreiben ist, daß diese mit einer unvollständigen Beschreibung der physikalischen Systeme operiert.“ (Einstein 1956, S. 494)

John Bell hat für diese Variablen den Begriff der „local beables“ eingeführt, ein Neologismus, der sich nur schwer ins Deutsche übersetzen lässt, aber etwas ausdrückt wie „das, was als lokalisiertes Objekt in Raum und Zeit existieren kann“ (leider geht beim Versuch der Übersetzung der ganze Witz und die Prägnanz von Bells Wortschöpfung verloren). In Ermangelung einer schlagkräftigeren Übersetzung möchten wir fortan von (lokalen) *ontologischen Variablen* sprechen. Gemeint ist stets dasselbe: die fundamentalen Elemente der Naturbeschreibung und die Art und Weise, wie diese mit

mathematischen Objekten im abstrakten Formalismus der Theorie korrespondieren – also jene Objekte, von denen *die Theorie* uns sagt, dass wir sie ernst nehmen müssen als elementare Konstituenten der physikalischen Realität.<sup>1</sup>

Eine solche, sagen wir, klassische Theorie macht empirische Vorhersagen dadurch, dass die ontologischen Variablen (oder ein Teil davon) makroskopische Größen beschreiben und diese makroskopischen Größen (oder ein Teil davon) den Ausgang von Experimenten beschreiben. Somit haben die physikalischen Gesetze, die für die ontologischen Variablen formuliert sind, messbare und beobachtbare Implikationen. Insbesondere müssen die ontologischen Variablen natürlich das beschreiben, was der Empirie am unmittelbarsten zugänglich ist: die Verteilung der Materie in Raum und Zeit.

Mit diesem Verständnis kann es physikalische Theorien geben, die *empirisch äquivalent* sind, also dieselben experimentellen Vorhersagen machen, aber verschiedene ontologische Variablen und/oder verschiedene Gesetze zugrunde legen. Dann macht es auch Sinn, von verschiedenen Theorien zu sprechen und nicht etwa bloß von verschiedenen Interpretationen ein und derselben Theorie. Denn insbesondere zeichnen verschiedene Theorien ein unterschiedliches „Welt-Bild“ – nicht im sprichwörtlichen, sondern im buchstäblichen Sinne.

All das halten wir für ziemlich einleuchtend. Und doch, so hört man seit Jahrzehnten, soll in der Quantenphysik alles anders sein. Deshalb mag es überraschen, dass es möglich ist, ontologische Variablen zu benennen und physikalische Gesetze für sie zu finden und so eine Theorie zu erhalten, die empirisch äquivalent zur Quantenmechanik ist. Aber eine solche Theorie existiert und sie ist sogar recht offensichtlich. Ihr zugrunde liegt eine simple Teilchenontologie. Die ontologischen Variablen sind also die Orte von Punktteilchen im physikalischen Raum und diese entwickeln sich in der Zeit gemäß einer Bewegungsgleichung, in der die übliche Wellenfunktion der Quantenmechanik die Rolle eines „Führungsfeldes“ spielt. Die resultierende Theorie ist deterministisch<sup>2</sup> und reproduziert alle statistischen Vorhersagen der Quantenmechanik. Sie heißt *De-Broglie-Bohm Führungsfeldtheorie* oder schlicht *Bohmsche Mechanik*.<sup>3</sup> Tatsächlich entdeckte Louis de Broglie die Bewegungsgleichung schon kurz nach Schrödingers Beschreibung der Wellenmechanik im Jahre 1926. Er präsentierte sein Konzept des Führungsfeldes 1927 auf der berühmten Solvay Konferenz, doch die Idee war noch unausgereift und die Reaktionen ablehnend.

---

<sup>1</sup> In der modernen Debatte über die Quantenmechanik wird auch in diesem Zusammenhang häufig von „verborgenen Variablen“ gesprochen, was absurd ist, weil offenbar das Gegenteil gemeint ist.

<sup>2</sup> Wohlgermerkt sind ontologische Variablen weder gleichbedeutend mit einer deterministischen Beschreibung, noch wird das eine durch das andere bedingt. So ist zum Beispiel die GRW-Formulierung der Quantenmechanik irreduzibel stochastisch und gleichzeitig kompatibel mit verschiedenen ontologischen Variablen.

<sup>3</sup> Für eine ausführliche Darstellung der Bohmschen Mechanik siehe Dürr und Teufel (2009); für ein älteres, aber deutschsprachiges Lehrbuch Dürr (2001).

Unabhängig davon, wurde die Theorie ein Vierteljahrhundert später von David Bohm wiederentdeckt. Es war Bohm, der als Erster zeigte, wie aus dieser Führungsfeldtheorie der wohlbekannte Formalismus der Quantenmechanik für Messprozesse abgeleitet werden kann. John Bell schreibt dazu:

„Doch im Jahre 1952 sah ich das unmögliche vollbracht. Es war in den Arbeiten von David Bohm. Bohm zeigte explizit, wie man in die nichtrelativistische Wellenmechanik Variablen einführen konnte, mit deren Hilfe die nicht-deterministische Beschreibung in eine deterministische überführt werden kann. Und noch wichtiger, meiner Ansicht nach, die Subjektivität der orthodoxen Version, der notwendige Bezug auf den ‚Beobachter‘, kann vermieden werden.“<sup>4</sup>

Auch das physikalische Gesetz, die Bewegungsgleichung der Bohmschen Teilchen, ist nicht schwer zu finden. Eine von zahlreichen möglichen Herleitungen geht wie folgt: In der Quantenmechanik ist die Wahrscheinlichkeitsdichte für den Teilchenort durch das Absolutquadrat der Wellenfunktion gegeben. Diese Wellenfunktion entwickelt sich in der Zeit gemäß der Schrödinger-Gleichung. Die Wahrscheinlichkeitsdichte selber entwickelt sich, wie alle dynamischen Wahrscheinlichkeitsdichten, gemäß einer Kontinuitätsgleichung, die sich nun direkt aus der Schrödinger-Gleichung ergibt. Und aus dieser Kontinuitätsgleichung kann man unmittelbar die Bewegungsgleichung der Teilchen ablesen. Die Wellenfunktion geht darin als Führungsfeld ein. Die Führungsgleichung zusammen mit der Schrödinger-Gleichung ergibt Bohmsche Mechanik.<sup>5</sup>

Tatsächlich ist die Führungsgleichung so offensichtlich, dass sie fast jeder Physiker irgendwann einmal in irgendeiner Form auf dem Papier stehen hat, sie aber nicht ernst nimmt, ja, nicht ernst nehmen kann, wenn er oder sie dem Dogma der Quantenphilosophie anhaftet, dass die zugrundeliegende Teilchenontologie in der Quantentheorie keinen Platz haben darf.

Man mag als Physiker die orthodoxe Quantenmechanik der Bohmschen Mechanik vorziehen, sei es aus metaphysischen Gründen, aus praktischen Gründen oder schlicht aus Gewohnheit und Dünkel (physikalische Gründe gibt es nicht). Doch eines muss klar sein: Die Tatsache, dass Bohmsche Mechanik existiert und dass sie sämtliche Phänomene der nichtrelativistischen Quantenphysik korrekt beschreibt, widerlegt im strengsten Sinne des Wortes

---

<sup>4</sup> John Bell, „On the impossible pilot wave“, in: Bell (1987), S. 160. Übersetzung durch die Autoren.

<sup>5</sup> Bei Bohm findet man die Bewegungsgleichungen in einer anderen Gestalt, die der Hamilton-Jacobi Formulierung der Newtonschen Mechanik entspricht und in der ein zusätzliches Potential auftaucht, das „Quantenpotential“, in das die Wellenfunktion des Systems eingeht. Diese Formulierung verschleiert jedoch den wahren Charakter der Bohmschen Mechanik, die ja keine Newtonsche Theorie ist, sondern eine Führungstheorie, in der die Grundgleichungen für die Teilchenbahnen Differentialgleichungen erster Ordnung sind, das heißt, Begriffe wie Kraft und Beschleunigung tauchen natürlicherweise gar nicht auf. Deswegen ziehen wir die minimale Bellsche Formulierung der Bohmschen Mechanik vor, die direkt das Vektorfeld für die Geschwindigkeiten hinschreibt.

alle Behauptungen, dass eine objektive Beschreibung der Welt unmöglich ist. Sie widerlegt ebenso alle Behauptungen, die Quantentheorie hätte bewiesen, dass das Naturgeschehen irreduzibel zufällig und damit eine deterministische Beschreibung prinzipiell unmöglich ist. Nein, Einsteins Vision, soviel müssen wir einsehen, ist in der Tat realisierbar.

## Was stimmt nicht mit der Quantenmechanik?

Wenn man ernsthaft zur Kenntnis genommen hat, dass Bohmsche Mechanik existiert, ist man bereits von so manchen dogmatischen Fesseln befreit. Doch wie geht es weiter? Man könnte nun sagen, wenn die Standard-Quantenmechanik die richtigen experimentellen Vorhersagen macht, so sei das doch gut genug. Und man könnte weiter sagen, alles, was an der Bohmschen Mechanik „zusätzlich“ ist – die Teilchen und ihre Bahnen, die Bewegungsgleichung, die Vorstellung einer objektiven Realität – müsse eben *Ockhams Rasiermesser* zum Opfer fallen, jenem Ökonomieprinzip der Wissenschaft, wonach von zwei Erklärungen stets die simple vorzuziehen ist, die mit der geringeren Anzahl an Hypothesen auskommt. Wir glauben, dass dies ein Fehlschluss wäre. Wir glauben, dass die Ontologie nichts Zusätzliches ist, sondern am Anfang der Theorie stehen muss und dass Ockhams Rasiermesser, auf diese Weise angewendet, eine verstümmelte, eine unvollständige Beschreibung der Dinge hinterlässt.

Was also stimmt nicht mit der Quantenmechanik? In Ermangelung der ontologischen Variablen, von denen wir fordern sollten, dass die Art und Weise ihrer Korrespondenz mit Objekten der physikalischen Welt möglichst fasslich sei, wird ein physikalischer „Zustand“<sup>6</sup> in der Quantenmechanik durch ein recht abstraktes mathematisches Objekt beschrieben, durch eine „Wellenfunktion“ oder einen „Zustandsvektor“ oder vielleicht durch eine „Dichtematrix“. Diese Objekte sind mathematisch gut zu verstehen, doch ihre physikalische Bedeutung, in jedem Sinne, der über eine funktionelle Bestimmung im Rahmen des abstrakten Formalismus hinausgeht, ist alles andere als offenbar und bleibt in den üblichen Formulierungen der Theorie auch eher vage. Wenn man aber bereit ist zu akzeptieren, dass diese Art der Beschreibung die vollständige ist, so wird man sogleich feststellen müssen, dass sie einer Welt entspricht, die auf groteske Weise indefinit ist. Gegenstände haben keinen wohlbestimmten Ort, Messungen kein eindeutiges Resultat, Katzen sind gleichzeitig tot und lebendig und dergleichen. Das ist das sogenannte *Messproblem* der Quantenmechanik. Kurz gesagt: Typische Zustände in der Quantenmechanik sind gänzlich verschieden von der Welt, in der wir leben.

---

<sup>6</sup> Die Frage „Zustand wovon?“ verbittet sich natürlich.

Diese Probleme werden für gewöhnlich umgangen, indem man zusätzliche Postulate in die Theorie einführt, um den Ausgang von Messungen zu beschreiben, allen voran das *Kollapspostulat*, welches besagt, dass die übliche Zeitentwicklung der Quantenmechanik – gegeben durch die Schrödinger-Gleichung – ihre Gültigkeit verliert, sobald am System eine Messung durchgeführt wird. Die üblichen – deterministischen – Gesetze der Quantenmechanik werden dann durch eine zufällige Dynamik ersetzt, die dafür sorgt, dass Beobachter die Welt in Ordnung sehen, Messapparate nicht zwei Ergebnisse zugleich anzeigen, Katzen entweder tot oder lebendig sind usw.

Diese Lösung hat aber ihren Preis. Zum einen muss man akzeptieren, dass zur Beschreibung von Messungen Regeln angewendet werden, die von den ansonsten gültigen Gesetzen verschieden sind und sich auch nicht aus diesen ableiten lassen. Schon hier scheitert das Argument von Ockhams Rasiermesser. Die Standard-Quantenmechanik ist keinesfalls ökonomischer als die Bohmsche Mechanik. Des Weiteren muss man damit leben, dass diese zusätzlichen Regeln nicht in präziser, mathematischer Sprache formuliert sind, also eher in den Bereich der Quantenphilosophie fallen, als in den Bereich der Physik. Die Begriffe der „Messung“ und des „Beobachters“ spielen hier eine zentrale Rolle. In der orthodoxen Quantenmechanik ist der Mensch nicht mehr bloß Zuschauer im Theater der Welt; er ist es, der durch den Akt der Messung seine Realität erst erschafft. Pauli nannte dies eine „*außerhalb der Naturgesetze stehende Schöpfung*“ (Brief an Born vom 31. März 1954, in: von Meyenn 1999, Bd. 4, Teil II, S. 547). Man kann den Reiz verstehen, der von so einer romantischen Idee ausgeht. Doch es kann nicht gut gehen, wenn man so vage Konzepte einführt in die physikalische Beschreibung der Natur. John Bell schreibt:

„Es scheint als wäre die Theorie exklusiv mit ‚Messergebnissen‘ befasst und hätte über alles andere nichts zu sagen. Was genau qualifiziert ein physikalisches System dazu, die Rolle eines ‚Beobachters‘ zu spielen? Hat die Wellenfunktion des Universums Tausende von Millionen von Jahren darauf gewartet zu kollabieren, bis der erste lebende Einzeller erschien? Oder musste sie etwas länger warten, auf ein höher qualifiziertes System ... mit einem Dokortitel? Wenn die Theorie nicht nur auf hoch-idealisierte Situationen unter Laborbedingungen anwendbar sein soll, sind wir nicht gezwungen einzugestehen, dass ‚mess-ähnliche‘ Prozesse mehr oder weniger die ganze Zeit stattfinden, mehr oder weniger überall? Haben wir dann nicht die ganze Zeit irgendeinen Kollaps?“<sup>7</sup>

Die Regeln der Quantenmechanik mögen gut genug sein für die meisten praktischen Zwecke. Doch muss Physik nicht mehr leisten? Wenn wir an einer vollständigen und konsistenten Beschreibung der Natur interessiert sind, dann müssen wir uns auch die Frage stellen: Wenn der Beobachter und

---

<sup>7</sup> John Bell, „Against measurement“, in: Bell 1987, S. 216. Übersetzung durch die Autoren.

die Messung in der Quantenmechanik eine so fundamentale Rolle spielen, welche Theorie beschreibt dann den Beobachter und den Messapparat und den Vorgang der Messung?

Wir glauben, dass das Messproblem, so ernsthaft es sein mag, bloß ein Symptom für das tiefer liegende Leiden der Quantenmechanik ist: dass völlig unklar ist, wovon sie eigentlich handelt, was der Gegenstand ihrer Beschreibung ist. In der Physik muss man wissen, worüber man spricht. Man muss wissen, was die ontologischen Variablen sind, die beables, das ist die Voraussetzung für die Formulierung einer klaren und konsistenten Theorie. Ohne eine Ontologie, die den Bogen schlägt vom abstrakten mathematischen Formalismus zur physikalischen Welt, ist die Theorie Gegenstand absurder Mystifizierung und schier endloser Debatten über die richtige Interpretation. In der Quantenmechanik dauern diese Debatten bis heute an.

Alle diese Unklarheiten sind im höchsten Maße unbefriedigend. Und sie sind in höchstem Maße unnötig, weil sie im Widerspruch zu der plausibleren Betrachtungsweise stehen, wonach alles im Universum, Beobachter und Messung eingeschlossen, durch einen vollständigen Satz physikalischer Gesetze beschrieben wird, der uns sagt, wie sich die elementaren Bausteine dieses Universums verhalten. In der Bohmschen Mechanik gibt es kein Messproblem. Der Zustand eines physikalischen Systems ist zu jeder Zeit eindeutig durch die Konfiguration der Elementarteilchen beschrieben, also die Verteilung der Materie im physikalischen Raum. Der Messprozess ist Teil der physikalischen Beschreibung und unterliegt denselben Gesetzen. Die Welt ist da, ob man hinschaut oder nicht. Das ist nicht ganz alles, was es dazu zu sagen gäbe, aber das Wesentliche.

Mittlerweile wird von immer mehr Physikern anerkannt, dass die orthodoxe Quantenmechanik in der beschriebenen Form keinen Bestand haben kann. Und dennoch tut man sich schwer damit, die Notwendigkeit einer Ontologie einzusehen – darin bleibt man ganz orthodox. Stattdessen hört man zum Beispiel häufiger, das Messproblem der Quantenmechanik werde durch das Phänomen der *Dekohärenz* gelöst. In aller Kürze bedeutet Dekohärenz, dass durch den fortschreitenden Prozess der quantenmechanischen Verschränkung ein System bei der Wechselwirkung mit einer makroskopischen Umgebung seine Interferenzfähigkeit verliert und somit etwa die experimentelle Realisierung der Überlagerung von „toter Katze“ und „lebendiger Katze“ praktisch unmöglich ist. Das ist soweit korrekt und tatsächlich hat Dekohärenz viel damit zu tun, warum unsere makroskopische Welt so aussieht, wie sie aussieht. Aber Dekohärenz allein löst nicht das Messproblem. Dekohärenz erklärt das Verschwinden der Interferenzfähigkeit. Aber was Dekohärenz nicht erklärt, was sie nicht erklären kann, ist der Übergang vom *Möglichen* zum *Faktischen*. Wir fragen uns: Wie sollte eine solche Erklärung überhaupt möglich sein, wenn die theoretische Beschreibung nicht schon fundamentale Objekte enthält, denen man Faktizität zusprechen kann?



## Bohmsche Mechanik und Unschärfe

Wie ist es möglich, dass in einer Quantentheorie Teilchen und Teilchenbahnen existieren können? Ist nicht die Heisenbergsche Unschärferelation eine der fundamentalsten Erkenntnisse der Quantenphysik? Und besagt nicht diese Unschärferelation, dass ein „Teilchen“ nicht zugleich einen wohlbestimmten Ort und eine wohlbestimmte Geschwindigkeit haben kann, dass also die klassische Teilchenvorstellung unvereinbar ist mit den Gesetzen der Quantenphysik? Aber Bohmsche Mechanik existiert und die statistischen Gesetze der Quantenmechanik folgen aus ihr, das ist ein Fakt. Mehr noch: Die Unschärferelation selbst folgt aus der Bohmschen Mechanik.

Wie also kann das sein?

Die Unschärferelation ist ein mathematisches Theorem und in diesem Sinne wahr. Doch es muss richtig gesagt werden, wovon dieses Theorem eigentlich handelt, dann klärt sich der scheinbare Widerspruch auf. Die Unschärferelation ist nämlich eine Aussage über *statistische Größen in Messexperimenten*. Für die Orts-Impuls-Unschärfe ist sie sehr gut zu verstehen. Wenn man nämlich den Ort des Teilchens misst, dann wird die effektive Wellenfunktion<sup>8</sup> gemäß dem Bornschen statistischen Gesetz verändert, und zwar konzentriert sie sich durch die Messung auf den Genauigkeitsbereich der Ortsmessung. Für die anschließende Geschwindigkeits- bzw. Impuls-Messung wird nun geschaut, wohin das Teilchen nach einiger Zeit gewandert ist. Diese Bewegung des Teilchens basiert auf dem „Zerfließen“ der Wellenfunktion unter der Schrödinger-Zeitentwicklung. Das Zerfließen ist nun aber umso stärker, je schärfer die Wellenfunktion konzentriert ist, also je genauer die Ortsmessung ausgeführt wurde. Und dies übersetzt sich direkt in die Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsmessung. Kurzum, je genauer die Ortsmessung, desto stärker sind die möglichen Geschwindigkeiten gestreut.

In der Quantenmechanik gibt es nur statistische Größen und nichts außerdem. Deshalb muss scheinbar nichts mehr dazu gesagt werden. Doch die Identifikation von statistischen Größen mit dem, was „real“ ist, kann leicht zu Missverständnissen führen, wie wir noch ausführlicher diskutieren werden. In der Bohmschen Mechanik ist die Sache klar: Die Teilchen, also die ontologischen Variablen, und die statistischen Größen, die von ihnen abgeleitet werden, und die der Unschärferelation unterworfen sind, sind zwei Paar Schuh. So einfach ist das.

---

<sup>8</sup> In der Bohmschen Mechanik gibt es keinen Kollaps der Wellenfunktion. Aber durch ihre Rolle als Führungswelle sind nicht alle ihre Anteile effektiv führend, sondern nur der Teil, in dessen Bereich die Bohmschen Teilchen liegen. Dies erlaubt die Definition einer effektiven Wellenfunktion, welche die mathematisch präzise Fassung der kollabierten Wellenfunktion aus der orthodoxen Quantenmechanik ist.

Eine tatsächliche Konsequenz der eben beschriebenen Analyse ist jedoch die, dass die Messung von Teilchenbahnen der Bohmschen Mechanik subtil ist. Eine Messung stellt immer eine Wechselwirkung mit dem physikalischen System dar und eine Wechselwirkung wird im Allgemeinen das Führungsfeld verändern und damit die Bohmschen Bahnen. Es besteht allerdings die Möglichkeit durch „schwache Messungen“, das sind solche, die das System nur minimal stören, die Bahnen der Teilchen im Experiment nachzuvollziehen. Erst kürzlich ist dies für das berühmte Doppelspaltexperiment gelungen (Kocsis, Braverman et.al. 2011).

## Die Theorie entscheidet, was man beobachten kann

Es wird häufig gesagt, die Aufgabe einer physikalischen Theorie bestehe letztlich darin, empirisch überprüfbare Vorhersagen über physikalische Messgrößen zu machen. Dabei kann leicht vergessen werden, dass sich die Messgrößen und ihre Bedeutung überhaupt erst aus einer theoretischen Naturbeschreibung ergeben. Es wäre leichtsinnig so zu tun, als seien uns die Phänomene in irgendeiner absoluten Weise gegeben und die Physik hätte keine andere Sorge, als diese möglichst präzise zu quantifizieren.

Wenn wir ein wenig über die Gegebenheiten einer „Messung“ reflektieren, dann werden wir feststellen, dass die Dinge subtiler sind, als unsere gewöhnliche Sprechweise vermuten lässt. Eine Waage misst zunächst kein Gewicht, sondern die Auslenkung einer Feder. Ein Thermometer misst keine Temperatur, sondern die Ausdehnung einer Flüssigkeit. Ein Amperemeter misst keinen Strom, sondern die Drehung einer metallischen Spule. Und in einem Stern-Gerlach-Versuch beobachten wir keinen Spin, sondern Punkte auf einem Detektorschirm. Erst die Theorie erlaubt uns, von all dem auf physikalische Größen zu schließen. Und wenn wir tiefer eindringen, zu einer mikroskopischen Beschreibung, dann stellen wir fest, dass wir „Wärme“ und „Strom“ tatsächlich als Bewegung von Teilchen begreifen können. In diesem Sinne warnte Einstein den jungen Heisenberg:

„Aber vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in Wirklichkeit genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann. Sehen Sie, die Beobachtung ist ja im allgemeinen ein sehr komplizierter Prozeß. Der Vorgang, der beobachtet werden soll, ruft irgendwelche Geschehnisse in unserem Meßapparat hervor. Als Folge davon laufen dann in unserem Apparat weitere Vorgänge ab, die schließlich auf Umwegen den sinnlichen Eindruck und die Fixierung des Ergebnisses in unserem Bewußtsein bewirken. Auf diesem ganzen langen Weg vom Vorgang bis zur Fixierung in unserem Bewusstsein müssen wir wissen, wie die Natur funktioniert, müssen wir die Naturgesetze wenigstens praktisch kennen, wenn wir behaupten wollen, daß wir etwas beobachtet haben.“ (zitiert aus Heisenberg 1969, S. 92)

Sobald es um Quantentheorie geht, gibt es nicht vieles, über das sich die Physiker einig sind. Wenn es aber eine Erkenntnis gibt, über die weitestgehend Einverständnis besteht, dann ist es die, dass im Quantenregime der Vorgang der Messung eine aktive Rolle spielt für das, was gemessen wird. Angesichts dessen mag es erstaunen, dass es bis zu den Arbeiten von Bohm (1952) und Ludwig (1953) innerhalb der Quantentheorie keine physikalische Beschreibung des Messprozesses gab. Nach Heisenbergs Beschreibung der Matrizenmechanik und Schrödingers Beschreibung der Wellenmechanik verging also ein Vierteljahrhundert, in dem es keine Physik der quantenmechanischen Messung gab – dafür umso mehr Metaphysik über die quantenmechanische Messung. Es ist diese Zeit, die unsere Denk- und Sprechweise bis heute prägt und in der die Konfusion ihren Anfang nahm. Erst in den letzten Jahrzehnten kamen die Erkenntnisse von Bohm und Ludwig wieder ins Bewusstsein einiger Physiker, insbesondere auch durch die wegweisenden Arbeiten von John Bell.

In den üblichen Formulierungen der Quantentheorie ist die Situation aber, kurz gesagt, folgende: Ganz am Anfang stehen die „Messgrößen“, die mit selbstadjungierten Operatoren auf dem Hilbertraum der Zustände identifiziert werden. Physiker haben dies dermaßen verinnerlicht, dass Messgrößen und selbstadjungierte Operatoren sogar sprachlich verschmolzen sind in den Begriff der *Observablen*.<sup>9</sup> Die Beschreibung der Messung wird dann mit einer Reihe von Axiomen oder Postulaten geregelt, die im Wesentlichen sagen, wie sich Zustände ändern und wie Wahrscheinlichkeiten von Messergebnissen zu berechnen sind. Der Messprozess selber ist nicht Teil der Theorie; die Beobachtungsgrößen hingegen sind in der Theorie elementar. Sie sind eben das, was im Experiment beobachtet wird und nicht weiter zurückführbar auf eine fundamentalere Beschreibung der Dinge. Dieser Status der Beobachtungsgrößen und die verführerische Sprechweise der „Messung einer Observablen“ verleiten uns aber leicht zu einem naiven Realismus über Observablen. Denn was kann es bedeuten, wenn wir sagen, dass verschiedene Messungen, an verschiedenen Systemen, durch verschiedene Methoden „dieselbe Observable messen“? Wenn wir der aufgezeichneten Größe immer denselben Namen geben (etwa „Spin“, „Impuls“, „Drehimpuls“, ...), dann müssen wir scheinbar davon ausgehen, dass es in der physikalischen Welt in irgendeiner Form ein entsprechendes Gegenstück gibt, das in all diesen verschiedenen Situation gleichsam „gemessen“ wird. Aber ein solches gibt es nicht; wir dürfen die Observablen nicht als Abbild der Eigenschaften irgendwelcher „realer“ physikalischer Objekte begreifen. Dies ist auch die Aussage

---

<sup>9</sup> Diese Identifikation ist nicht nur höchst problematisch, sondern, zumindest in dieser Lehrbuch-Form, auch falsch. Es hat sich mittlerweile die Erkenntnis durchgesetzt, dass viele Mess-Experimente durch „positive operatorwertige Maße“ (POVMs für engl.: positive operator valued measures) beschrieben werden müssen. Aus der Bohmschen Beschreibung von Messprozessen ergeben sich diese ganz natürlich. Ein Spezialfall davon sind die „projektorwertigen Maße“ (PVMs für engl.: projection valued measures), die als äquivalent zu den selbstadjungierten Operatoren gesehen werden können.

zahlreicher „no-go“ Theoreme über „verborgene Variablen“. Natürlich sind diese Resultate nur dann bemerkenswert, wenn man denn in so naiver Weise von den Observablen denken möchte. In der orthodoxen Quantentheorie ist aber völlig unklar, wie man sonst darüber denken soll. Über was sprechen wir also? Man kann sich des Eindrucks nicht verwehren, dass die ganze Rechnerei mit Operatoren einfach im Vertrauen darauf geschehen muss, dass der Experimentator schon wissen wird, was er zu messen hat, weil die Theorie selber dazu (abgesehen von Analogien zur klassischen Physik) recht wenig zu sagen hat.

Es war wieder einmal Einstein, der das Problem klar erkannte. Im zuvor zitierten Gespräch mit Heisenberg machte er die fast prophetische Bemerkung:

„Ich habe den Verdacht, dass Sie gerade an der Stelle, von der wir gesprochen haben, in Ihrer Theorie später noch Schwierigkeiten bekommen werden. Ich will das genauer begründen. Sie tun so, als könnten Sie auf der Seite der Beobachtungen alles so lassen, wie bisher, das heißt, als könnten Sie einfach in der bisherigen Sprache über das reden, was die Physiker beobachten.“ (zitiert aus Heisenberg 1969, S. 95)

In der Quantenphysik können wir nicht mehr so unraffiniert über unsere Beobachtungen sprechen. Wir brauchen aber *etwas*, von dem wir sprechen können und das sind die ontologischen Objekte. Die „Seite der Beobachtungen“ muss sich dann aus der neuen Theorie ergeben, die von den ontologischen Objekten handelt. Diese Theorie ist Bohmsche Mechanik. Damit wird alles klar verständlich. Die Bohmsche Mechanik liefert eine (in den Grenzen der Theorie) vollständige und objektive Beschreibung der Dinge, und daraus folgt alles andere. Es gibt keine zusätzlichen Postulate, nur Theoreme, die aus den Grundgleichungen der Theorie abgeleitet sind. Studiert man also die Bohmsche Mechanik, dann erkennt man, welche Rolle die Observablen spielen, welchen Status die Postulate der orthodoxen Formulierung haben und was das Wesen einer quantenmechanischen Messung ist (siehe dazu Dürr, Goldstein und Zanghì 2004).

Am Anfang stehen die ontologischen Variablen, die Teilchen im physikalischen Raum, und wenn wir wissen wollen, was eigentlich „gemessen“ wird, dann müssen wir die Theorie daraufhin analysieren, wie sich die Teilchen typischerweise in Messexperimenten verhalten, also in Situation, in denen ein System an einen „Apparat“ gekoppelt wird, der daraufhin verschiedene, makroskopisch unterscheidbare Zustände einnehmen kann. Die ganz wesentliche Einsicht, die man dabei erhält ist nun die, dass alles, was „messbar“ ist, nicht real ist und alles, was „real“ ist, nicht messbar ist – mit einer Ausnahme, das ist der Ort von Teilchen. In der Bohmschen Mechanik wird also manifest, worauf schon Bohr eindringlich bestanden hat, dass in der Tat *keine* intrinsischen Eigenschaften gemessen werden, die dem physikalischen System, das heißt den Teilchen, auf irgendeine objektive Weise zukommen, unabhängig davon ob gemessen wird und wie gemessen wird.

# Quantengleichgewicht und die Rolle des Zufalls in der Bohmschen Mechanik

Bohmsche Mechanik ist, wie die Newtonsche Mechanik, eine deterministische Theorie. Der Zustand eines physikalischen Systems, ja des ganzen Universums, ist zu jeder Zeit eindeutig festgelegt durch das physikalische Gesetz. Sind die Anfangsbedingungen des Systems zu irgendeinem Zeitpunkt gegeben, dann ist seine zukünftige Entwicklung – im Prinzip – vollständig berechenbar aus der physikalischen Theorie. Aber wie ist dies vereinbar mit der probabilistischen Natur der Quantenmechanik? Welchen Platz hat der Zufall in einem deterministischen Bohmschen Universum?

Es ist eine weitverbreitete Annahme, dass der Zufall in der Quantenphysik grundsätzlich verschieden ist vom „klassischen Zufall“, der beispielsweise in die statistische Mechanik eingeht. Dieser „Quanten-Zufall“ soll absolut sein und irreduzibel, nicht zurückführbar auf unsere Ignoranz bezüglich der Anfangsbedingungen oder anderer Bestimmungsstücke des physikalischen Systems. Bohmsche Mechanik steht natürlicherweise im Widerspruch zu dieser Sichtweise. Max Born schreibt in seiner Arbeit über quantenmechanische Streutheorie:

„Ich habe in meiner vorläufigen Mitteilung diesen Indeterminismus ganz besonders betont, da er mir mit der Praxis des Experimentators in bester Übereinstimmung zu sein scheint. Aber es ist natürlich jedem, der sich damit nicht beruhigen will, unverwehrt, anzunehmen, dass es weitere, noch nicht in die Theorie eingeführte Parameter gibt, die das Einzelereignis determinieren. In der klassischen Mechanik sind dies die ‚Phasen‘ der Bewegung, z.B. die Koordinaten der Teilchen in einem bestimmten Augenblick. Es schien mir zunächst unwahrscheinlich, dass man Größen, die diesen Phasen entsprechen, zwanglos in die neue Theorie einfügen könne; aber Herr Frenkel hat mir mitgeteilt, dass dies vielleicht doch geht. Wie dem auch sei, diese Möglichkeit würde nichts an dem praktischen Indeterminismus der Stoßvorgänge ändern, da man ja die Werte der Phasen nicht angeben kann; sie muss übrigens zu denselben Formeln führen, wie die hier vorgeschlagene ‚phasenlose‘ Theorie.“ (Born 1926, S. 826-827)

Es ist nicht bekannt, was Herr Frenkel im Sinn hatte. Obwohl Bohmsche Mechanik zeigt, dass es tatsächlich sehr einfach ist, Variablen einzuführen in der Art, wie Born es für „unwahrscheinlich“ hielt, hatte er doch recht mit der Schlussfolgerung, dass eine solche Theorie, eine mit „Phasen“, notwendigerweise zu derselben statistischen Beschreibung führen muss, insbesondere also zu Borns statistischem Gesetz über die  $|\psi|^2$ -Verteilung der Teilchenorte.

Dieses Phänomen, dass die tatsächlichen Werte der fundamentalen Variablen irrelevant werden für die statistische Beschreibung, ist bereits aus der klassischen Physik bekannt: Ein System im thermischen Gleichgewicht, beispielsweise ein Gas, kann mit den Mitteln der statistischen

Mechanik beschrieben werden, durch Wahrscheinlichkeitsdichten und makroskopische (thermodynamische) Größen. Den Gasmolekülen bleibt es dabei unbenommen sich weiterhin auf ihren wohlbestimmten, klassischen Bahnen durch den Raum zu bewegen. Darin sieht man allgemein hin nichts Mysteriöses. Aber eine statistische Beschreibung basiert dennoch auf Begriffen wie „Wahrscheinlichkeit“ oder „Zufall“, die keinen Platz zu haben scheinen in einer deterministischen Theorie, egal ob man nun an Bohrsche Mechanik oder Newtonsche Mechanik denkt. Wie also kommt der Zufall ins Spiel? Genau so, wie es einst Ludwig Boltzmann für die klassische Physik erklärt hat. Den Zufall gibt es nicht!

Denken wir uns als einfachstes Beispiel den Wurf einer Münze oder, besser noch, viele Münzen, die zugleich und in hinreichendem Abstand durch die Luft wirbeln und zu Boden fallen. Wir können und sollten dieses „Experiment“ als eines betrachten, das durch die deterministischen Gesetzen der klassischen Mechanik beschrieben wird. Wo und auf welcher Seite die Münzen landen, ist also eindeutig festgelegt durch die Spezifizierung geeigneter Anfangsbedingungen.<sup>10</sup> Nun, ganz gleich wie viele Münzen geworfen werden, kein physikalisches Gesetz verbietet es, dass am Ende, sagen wir, zweimal so viele Münzen *Kopf* zeigen wie *Zahl*. Oder, dass sogar *alle* Münzen mit dem Kopf nach oben landen. Doch die Anfangsbedingungen, die zu so einem Ergebnis führen, sind sehr speziell und müssen umso spezieller sein, je mehr Münzen geworfen werden. Andererseits ist es wahr, dass, wenn wir ein hinreichend großes Ensemble von Münzen betrachten, *für fast alle Anfangsbedingungen* ungefähr gleich viele Münzen *Kopf* zeigen werden, wie *Zahl*. Das und nur das meinen wir damit, wenn wir sagen: „Die Wahrscheinlichkeit, dass *Kopf* oder *Zahl* fällt, beträgt jeweils 1/2 (oder 50%).“

Dies war Boltzmanns Einsicht, dass wir davon sprechen müssen, was *typisch* ist, was in der *überwiegenden Mehrzahl der Fälle* geschieht. Es war ebenso Boltzmanns Einsicht, dass wir, wenn wir über das „Typische“ sprechen, über das Universum als Ganzes sprechen müssen. Denn sonst können wir den „Zufall“ oder, wie wir jetzt richtiger sagen können, die Frage nach der Typizität der Anfangsbedingungen immer weiter „hinaus“ schieben. Boltzmann betrachtet also ein typisches Universum, wobei er „typisch“ über ein ausgewähltes Maß auf dem Phasenraum des Universums definiert, das stationäre Liouville-Maß.<sup>11</sup> Dann argumentiert er, dass Untersysteme eines typischen Universums (also die physikalischen Systeme, die wir beobachten) sich wie Systeme im statistischen Gleichgewicht verhalten. Eben so, wie in einem typischen Münzwurfexperiment die relativen

---

<sup>10</sup> Offensichtlich interessiert uns in diesem Gedankenexperiment nicht der „menschliche Faktor“, falls es ihn denn geben sollte. Wir denken uns den Prozess also als völlig mechanisch.

<sup>11</sup> Dies alles sind mathematisch präzise definierte Begriffe. Das intuitive Verständnis genügt hier aber, um das Wesentliche zu begreifen, dass nämlich die dynamischen Gesetze ein Maß motivieren müssen auf der Menge der Anfangsbedingungen, oder (was beinahe das selbe ist) auf den möglichen Konfigurationen der ontologischen Variablen, das uns sagt, was „typisch“ ist.

Häufigkeiten von *Kopf* und *Zahl* der theoretischen Wahrscheinlichkeit entsprechen. Analog kann man nun beweisen: In einem typischen Bohmschen Universum verhalten sich Untersysteme wie Systeme im *Quantengleichgewicht*, wobei Quantengleichgewicht durch die oben zitierte Bornsche  $|\psi|^2$ -Verteilung gegeben ist (siehe Dürr, Goldstein und Zanghì 1992).

Was gibt es dazu noch zu sagen? Vielleicht nur noch dies, dass wir natürlich davon ausgehen, in einem typischen Bohmschen Universum zu leben, denn wäre dem nicht so, dann müssten wir eine Erklärung für die Atypizität unseres Universums geben. Gleichzeitig ist unser Universum aber offensichtlich sehr speziell. Wir sagen „offensichtlich“, weil es uns in einem weniger speziellen Universum gar nicht geben würde. Ein weniger spezielles Universum wäre thermisch gleichförmig und statisch; es gäbe keine Strukturen, wie unser Sonnensystem und ganz sicher niemanden, der sich all diese Fragen stellen könnte (stattdessen wäre alles unter dem Einfluss der Gravitation zu einem einzigen Materiekumpen kollabiert und schließlich in einem riesigen schwarzen Loch verendet). Boltzmann hatte berechtigterweise Schwierigkeiten damit, diese Tatsache mit seiner Prämisse eines typischen Universums in Einklang zu bringen. Auch heute ist das Rätsel noch nicht ganz gelöst, doch mit dem Verständnis der Bohmschen Quantentheorie können wir die Dinge richtig benennen. Die Wellenfunktion des Universums, also das Führungsfeld, ist sehr speziell. Ihre Spezialität muss die Strukturiertheit des Universums erklären und die *Irreversibilität* – das Anwachsen der Entropie. Bezüglich dieser Wellenfunktion (oder genauer, bezüglich des Maßes, das sie definiert,) ist das Universum aber typisch und die Bohmschen Teilchen im Quantengleichgewicht. Was allerdings die Spezialität der Wellenfunktion ausmacht ist heute eine der brennendsten Fragen der Kosmologie.

Wir müssen noch etwas zur *Ununterscheidbarkeit* der Bohmschen Teilchen bemerken, weil hierüber viel Verwirrung herrscht. Die Teilchen in der Bohmschen Mechanik sind – sofern von derselben Art – in ihren dynamischen Eigenschaften gleich und in diesem Sinne ununterscheidbar. Dies führt sofort zu einer Wellenfunktion, die unter Vertauschung von Teilchenorten entweder symmetrisch oder antisymmetrisch ist. Und damit ergibt sich entsprechend die sogenannte bosonische oder fermionische Statistik, oder kurz die Boson-Fermion-Alternative. Insbesondere ist also die Ortsverteilung der Teilchen symmetrisch, und wenn in der Quantentheorie von „ununterscheidbaren Teilchen“ gesprochen wird, obwohl es ja eigentlich keine Teilchen gibt, dann meint man genau das. (Mittlerweile versteht man aber, dass die Dinge tiefer liegen, und sich die Ununterscheidbarkeit der Teilchen bereits in der speziellen Struktur des Konfigurationsraumes zeigen muss). Es wird manchmal gesagt, diese Ununterscheidbarkeit stehe im Widerspruch zur Existenz von diskreten Teilchen, also Objekten, die einen wohlbestimmten Ort haben. Das ist falsch, wie Bohmsche Mechanik ja demonstriert. Schon die zugrundeliegende Annahme, dass es sich dabei um ein Quantenphänomen handeln würde, ist ein Irrtum.

Denken wir uns zum Beispiel ein System von zwei Elektronen und versuchen uns dann vorzustellen, die beiden Teilchen würden ihre Plätze tauschen. Es gibt keine physikalische Eigenschaft, die beide Konfigurationen voneinander unterscheiden könnte, sie stellen also exakt denselben physikalischen Zustand dar. Es macht deshalb nicht viel Sinn, überhaupt von einer solchen Vertauschung zu sprechen. Freilich kann man sagen, dass sich die Teilchen ja durch ihren Ort unterscheiden. Doch das ist ohne Bedeutung. Die Natur kümmert es nicht, ob wir sagen: „Dies hier vorne ist Elektron 1 und das da hinten ist Elektron 2.“ Die Natur kümmert es nur, dass hier vorne ein Elektron und da hinten ein Elektron ist.

## Wo Einstein irrte – Nichtlokalität und die Bellsche Ungleichung

Die Bohmsche Mechanik liefert also eine vollständige Beschreibung der Dinge, so wie Einstein sie im Sinn hatte. Wirklich *ganz* so, wie Einstein sie im Sinne hatte? Warum war er, der selbst einst ein Führungsfeld für Photonen erdachte, nie ein Fürsprecher von de Broglies und Bohms Führungsfeldtheorie? Wir kennen keine detaillierte Kritik von Einstein an der Bohmschen Arbeit und können nur spekulieren. Die Vermutung liegt aber nahe, dass der Grund darin zu suchen ist, dass die Bohmsche Mechanik ein Prinzip verletzt, welches Einstein (anders als der Determinismus übrigens) wahrlich heilig war: das Prinzip der *Lokalität*. Die Wellenfunktion, also das Führungsfeld der Bohmschen Mechanik, ist auf dem „Konfigurationsraum“ definiert. Das bedeutet, alle Teilchen eines physikalischen Systems werden zugleich und miteinander geführt. Einsteins physikalisches Weltbild beruhte aber auf der Überzeugung, dass ein Ereignis, welches an einem festen Punkt in Raum und Zeit stattfindet, durch keine anderen Einflüsse bestimmt sein dürfe als solche, die in der Vergangenheit dieses Ereignisses liegen und sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. In der Bohmschen Mechanik ist dies erkennbar nicht der Fall. Denn alles, was mit einem Teilchen geschieht, kann unmittelbar und instantan die Bahn aller anderen mit ihm geführten Teilchen beeinflussen. Wohlgermerkt bedeutet dies keine direkte Verletzung der speziellen Relativitätstheorie, weil sich daraus nicht notwendiger ergibt, dass man Signale überlichtschnell senden kann. Und tatsächlich ist dies in einem typischen Bohmschen Universum auch nicht möglich. Es gibt auch keine „Kraft“ (im Newtonschen Sinne), die sich schneller als das Licht ausbreitet, so ein Konzept kommt in der Bohmschen Theorie nicht vor.

Für Einstein war aber Nichtlokalität in jeder Form inakzeptabel. „Spukhaft“ nannte er sie. Als er und seine Mitarbeiter das berühmte EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) - Gedankenexperiment entwickelten, setzten sie ganz selbstverständlich voraus, dass eine solche spukhafte Nichtlokalität ausgeschlossen ist und demonstrierten, dass daraus die Unvollständigkeit der quantenmechanischen



Beschreibung folgt. Die Bohmsche Mechanik liefert aber eine nichtlokale Beschreibung der Natur. Und nun kann man fragen: Ist das notwendig so? Oder ist es auch möglich, im Sinne Einsteins, eine lokale Naturbeschreibung zu finden? Die Frage ist weniger prosaisch die: Ist die Welt lokal oder nichtlokal? Man kann nicht erwarten, darauf eine Antwort zu finden. Man muss sich klarmachen, dass es sich hier um eine meta-theoretische Frage handelt. Doch John S. Bell hatte den Wagemut und die Genialität sie zu beantworten. 1964, knapp ein Jahrzehnt nach Einsteins Tod, übersetzte er sie in eine experimentell überprüfbare Hypothese. Für messbare Größen in einem experimentellen Aufbau, angelehnt an das EPR-Experiment und erdacht von Bohm, leitete Bell eine mathematische Ungleichung her. Genauer bezieht sich diese Ungleichung auf gewisse Korrelationen von Spin-Einstellungen, doch das ist zweitrangig. Die *einzigste* Annahme, die seiner Herleitung zugrunde liegt, ist Lokalität. Aber die Vorhersagen der Bohmschen Mechanik – und damit die Vorhersagen der Quantenmechanik – verletzen die Bellsche Ungleichung. Also muss Quantenmechanik nichtlokal sein. Aber die experimentellen Tests bestätigen die Vorhersagen der Quantenmechanik. Also ist die Natur nichtlokal.<sup>14</sup> Man muss sich die Tiefe und Tragweite dieser Erkenntnis bewusst machen. Hier wird eine Wahrheit formuliert, die über jeder Theorie steht. Die Welt ist nichtlokal. Jede korrekte, vollständige Beschreibung der Welt ist also nichtlokal.

Man hat Bells Theorem das tiefgründigste Resultat der modernen Physik genannt. Man hat es auch das am meisten missverstandene Resultat der modernen Physik genannt und wahrscheinlich ist beides richtig. Dabei sind die Missverständnisse unnötig, weil Bell selbst die Dinge mit bestechender Klarheit gesagt hat, zum Beispiel in seinem wundervollen Aufsatz „Bertlmann’s socks and the nature of reality“ (zu finden in Bell 1987). Um aber die simple und doch erschütternde Folgerung nicht akzeptieren zu müssen, wurden Alternativen konstruiert, die eigentlich nicht existent sind. Dann heißt es beispielsweise, die Verletzung der Bellschen Ungleichung würde bedeuten, dass die Natur entweder *nicht lokal* oder *nicht realistisch* ist. Und weil es aus irgendeinem Grunde weiter heißt, eine Theorie, die eine nichtlokale Welt beschreibt, sei weniger plausibel als eine Theorie, die gar keine Welt beschreibt, wurde der größte experimentelle Triumph der Bohmschen Mechanik zu einem Ablehnungsgrund gemacht und Bell, der entschiedenste Vertreter der Bohmschen Mechanik seiner Zeit, absurderweise zum Kronzeugen gegen sie. Doch „Lokalität“ ist ein physikalischer Begriff. „Realismus“ ist ein philosophischer Begriff. Das allein sollte uns schon misstrauisch machen. Dieser Realismus, von dem die Rede ist, findet sich weder als Begrifflichkeit in den Arbeiten John Bells, noch entspricht er einer Prämisse, die an irgendeiner Stelle in sein

---

<sup>14</sup> Es heißt, die Experimente beinhalteten noch „Schlupflöcher“. Doch diese werden in dem Maße kleiner, wie die Experimente ausgeklügelter werden und man müsste schon annehmen, dass sich die Natur gegen uns verschworen hat, um uns mit der Verletzung der Bellschen Ungleichung hinters Licht zu führen, wenn man der Schlussfolgerung der Nichtlokalität entkommen will.

Theorem eingeht. Dort, wo er überhaupt etwas physikalisches meint, bezieht er sich auf die Existenz „verborgener Variablen“ (die Zufallsvariablen, für die Bells Ungleichung formuliert ist) und ist dann einer jener unnötigen Missverständnisse, von denen wir gesprochen haben; denn die Existenz dieser Variablen ist keine zusätzliche Prämisse, sondern eine Folgerung aus der Lokalitätsannahme – das war gerade das EPR-Argument! Dort, wo der Realismus aber nichts physikalisches meint, müssen wir uns fragen, ob er überhaupt eine physikalisch relevante Kategorie darstellt. Die Aussage „Die Welt ist real(istisch)“ scheint uns aber als wissenschaftliche Hypothese nicht viel zu taugen und wir haben nicht den Eindruck, dass etwas sinnvolles gesagt wird, weder indem man sie bejaht, noch indem man sie negiert. Vielmehr wird hier einer tiefen physikalischen Wahrheit mit Argumenten der Quantenphilosophie begegnet, um zu begründen, warum die Dinge nicht so gesagt werden dürfen, wie sie sind.

Wir müssen also die Nichtlokalität der Natur als Tatsache akzeptieren. Und dann stellen wir fest, dass diese Tatsache zunächst in einem Spannungsverhältnis zur Einsteinschen Relativität steht und uns zwingt, deren Bedeutung zu überdenken. Wir haben bereits darauf hingewiesen, dass es falsch wäre, beide Konzepte im unvereinbaren Widerspruch zueinander zu sehen. Doch eine endgültige Versöhnung von Relativität und Nichtlokalität ist bisher noch nicht gelungen. Lorentz-invariante Verallgemeinerungen der Bohmschen Mechanik, basierend zum Beispiel auf der Diracschen Wellengleichung, sind durchaus möglich und wurden bereits ausführlich beschrieben (siehe zum Beispiel Dürr, Goldstein, Münch-Berndl und Zanghì 1999). Doch eine befriedigende Theorie, die auch die Wechselwirkung zwischen Materie beschreibt und damit eine theoretische Analyse des Messprozesses in einer relativistischen Raumzeit ermöglicht, ist bisher noch nicht gefunden worden. Dies weist auf einen schweren Mangel der bis heute bekannten relativistischen Quantentheorien im Allgemeinen hin, denn wäre zumindest deren statistische Beschreibung klar, so wäre eine Vervollständigung zu einer relativistischen Bohmschen Mechanik ähnlich einfach wie im nichtrelativistischen Fall.

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Spannungen zwischen Nichtlokalität und Relativität nicht etwa erst aus der Bohmschen Beschreibung erwachsen, aber sehr wohl in ihr am deutlichsten zutage treten. Das ist deshalb so, weil die Bohmsche Mechanik die physikalischen Objekte in der Raum-Zeit (die Teilchen) explizit beschreibt. In der orthodoxen Quantenmechanik müssen wir stattdessen irgendwann in irgendeiner Form über den Kollaps der Wellenfunktion sprechen. Und wie dies nun in einem relativistischen Kontext zu verstehen ist, wie der Kollaps zu geschehen hat, ob zum Beispiel instantan für alle Beobachter, oder doch „relativ“, vom Beobachter abhängig, ist noch ungeklärt. Die zentrale Rolle, die *ein* Beobachter beim Kollaps der Wellenfunktion spielt, steht hier

im Widerspruch zum Relativitätsprinzip, wonach alle Beobachter für die physikalische Beschreibung gleichwertig sind.

Wir glauben, dass eine Quantentheorie in der Art der Bohmschen Mechanik der beste Ansatz ist, um die offenen Fragen anzugehen. Denn es ist die Bohmsche Mechanik, die uns überhaupt erst erlaubt, über quantenmechanische Prozesse als Ereignisse in der Raum-Zeit zu sprechen, ganz gleich ob diese Raum-Zeit nun galileisch oder relativistisch, flach oder gekrümmt ist.

## Zum Status der Wellenfunktion in der Bohmschen Mechanik

Es gibt einen Unterschied zwischen philosophischen Betrachtungen über eine vollständige physikalische Theorie und dem Versuch, Lücken in der physikalischen Beschreibung durch Metaphysik zu füllen. Von erster Art ist zum Beispiel die Frage nach dem ontologischen Status der Wellenfunktion in der Bohmschen Mechanik. Bohmsche Mechanik ist eine Theorie über Teilchen. Die Wellenfunktion sagt, wie sich diese Teilchen bewegen. Physikalisch ist also alles klar und man kann über das Wesen der Wellenfunktion streiten, ohne damit die Grundfesten der Realität zu erschüttern.

In der Bohmschen Mechanik gibt es im Grunde nur *eine* Wellenfunktion, die Wellenfunktion des Universums. Diese Wellenfunktion führt sämtliche Teilchen und definiert, was ein typisches Universum ist. Davon abgeleitet sind die effektiven Wellenfunktionen von Untersystemen, die man zwar meistens meint, deren Status aber offenbar ein anderer ist. Unsere Frage bezieht sich also vornehmlich auf das primäre Objekt, die Wellenfunktion des Universums. Ohne Physiker und Philosophen in ihren kreativen Möglichkeiten einschränken zu wollen andere Alternativen zu erdenken, stellen wir fest, dass die Positionen, die in dieser Frage eingenommen werden können, im Wesentlichen von dreierlei Art sind:

(1) Man kann sich damit begnügen, dass die physikalische Beschreibung klar ist und die Rolle der Wellenfunktion innerhalb der Theorie vollständig beschrieben und mathematisch konsistent ist. Dies bedeutet, dass man bezüglich der tieferen Implikationen der Frage indifferent ist und die Wellenfunktion einfach als ein mathematisches Objekt betrachtet, das da ist, damit das Gesetz für die Teilchenbewegung formuliert werden kann.

(2) Man kann die Wellenfunktion als physikalisches Objekt im Sinne einer nichtlokalen ontologischen Größe ernst nehmen. In diesem Denkbehelf ist die Wellenfunktion aber kein physikalisches Feld im üblichen Sinne, denn sie existiert nicht im physikalischen Raum, sondern auf dem abstrakten Konfigurationsraum, der unfassbar viele Raumdimensionen hat: drei Dimensionen für jedes einzelne Teilchen im Universum.

(3) Man kann zu guter letzt eine gänzliche andere Sichtweise annehmen und die Wellenfunktion nicht als Teil der physikalischen Welt betrachten, sondern als Teil des *physikalischen Gesetzes*. Dies ist die *nomologische Interpretation* der Wellenfunktion.

Es ist sehr gut möglich, dass ein Bohmsches Universum von einer stationären Wellenfunktion beschrieben wird, also einer Wellenfunktion, die sich mit der Zeit nicht verändert. Auf diese Möglichkeit sind Physiker bereits häufiger gestoßen und standen dann vor dem Problem der „Zeitlosigkeit“. Denn eine stationäre Wellenfunktion würde ja ein Universum beschreiben, das völlig statisch ist, in dem sich nichts bewegt. In einer Bohmschen Theorie hingegen sind es die ontologischen Variablen, die sich in der Zeit entwickeln und damit den Zustand des Universums verändern – auch in einem stationären Führungsfeld. Eine stationäre Wellenfunktion würde sich gut mit der nomologischen Interpretation vertragen; die Unveränderlichkeit der Wellenfunktion wäre dann Ausdruck der Unveränderlichkeit des physikalischen Gesetzes.

## Schlusswort

Erwin Schrödinger, aus einem Brief an Wilhelm Wien, Zürich, 25. August 1926:

„Ich möchte aber heute nicht mehr gern mit Born annehmen, daß solch ein einzelnes Ereignis absolut zufällig d. h. vollkommen undeterminiert ist. Ich glaube heute nicht mehr, daß man mit dieser Auffassung (für die ich vor vier Jahren sehr lebhaft eingetreten bin) viel gewinnt. [...].

Ich glaube Born übersieht dabei, daß – angenommen dieses Bild läge vollkommen durchgearbeitet vor – es immer noch dem Geschmack des Beschauers anheimgestellt bleiben würde, was er nun als real ansehen will, die Partikel oder das Führungsfeld. Ein philosophisches Kriterium der Realität gibt es ja nicht, wenn man nicht sagen will: real ist einzig der sinnenfällige Komplex, alles andere sind nichts als Bilder.

Bohrs Standpunkt, eine räumlich-zeitliche Beschreibung sei unmöglich, lehne ich a limine ab. Die Physik besteht nicht nur aus Atomforschung, die Wissenschaft nicht nur aus Physik und das Leben nicht nur aus Wissenschaft. Der Zweck der Atomforschung ist, unsere diesbezüglichen Erfahrungen unserem übrigen Denken einzufügen. Dieses ganze übrige Denken bewegt sich, soweit es die Außenwelt betrifft, in Raum und Zeit. Gelingt also die Einfügung in Raum und Zeit nicht, so ist der ganze Zweck verfehlt und man weiß nicht, welchem Zweck damit überhaupt gedient sein sollte.“ (zitiert nach v. Meyenn 2011, S. 305-307, hier S. 306).

## Danksagung

Wir danken Niklas Boers für die wertvollen Gespräche während der Entstehung dieses Artikels.

## Zitierte Literatur

- Bell, John S. (1987): *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. Zitiert gemäß 2. Auflage 2004.
- Bohm, David (1952): „A suggested interpretation of the quantum theory in terms of ‘hidden’ variables“. *Physical Review* 85, S. 166-193.
- Bohr, Niels (1931): *Atomtheorie und Naturbeschreibung: Vier Aufsätze mit einer einleitenden Übersicht*. Berlin: Springer.
- Born, Max (1926): „Quantenmechanik der Stoßvorgänge“. *Zeitschrift für Physik* 38, S. 803-827.
- Dürr, Detlef (2001): *Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon, Münch-Berndl, Karin und Zanghì, Nino (1999): „Hypersurface Bohm-Dirac models“. *Physical Review Letters A* 60, S. 2729-2736.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (1992): „Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty“. *Journal of Statistical Physics* 67, S. 843-907.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (1997): „Bohmian mechanics and the meaning of the wave function“. In: R. S. Cohen, M. Horne und J. Stachel (Hgg.): *Experimental metaphysics. Quantum mechanical studies for Abner Shimony. Volume 1*. Dordrecht: Kluwer, S. 25-38.
- Dürr, Detlef, Goldstein, Sheldon und Zanghì, Nino (2004): „Quantum equilibrium and the role of operators as observables in quantum theory“. *Journal of Statistical Physics* 116, S. 959-1055.
- Dürr, Detlef und Teufel, Stefan (2009): *Bohmian mechanics*. Berlin: Springer.
- Einstein, Albert (1956): „Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten“. In: P. A. Schilpp (Hg.): *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*. Stuttgart: Kohlhammer, S.493-511.
- Ghirardi, GianCarlo, Rimini, Alberto und Weber, Tullio (1986): „Unified dynamics for microscopic and macroscopic objects“. *Physical Review D* 34, S. 470-491.
- Heisenberg, Werner (1959): *Physik und Philosophie*. Stuttgart: S. Hirzel.
- Heisenberg, Werner (1969): „Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein (1925-1926)“. In: *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. München: Piper, S.85-100.
- Kocsis, Sacha, Braverman, Boris, Ravets, Sylvain et al. (2011): „Observing the average trajectories of single photons in a two-slit interferometer“. *Science* 332, S.1170-1173.
- Landau, Lev D. und Lifschitz, Evgeny M. (1979): *Lehrbuch der theoretischen Physik, Band III: Quantenmechanik*. Berlin: Akademie-Verlag.
- von Meyenn, Karl (Hg.) (1999): *Wolfgang Pauli, wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.* 4 Bände. Berlin: Springer.
- von Meyenn, Karl (Hg.) (2011): *Eine Entdeckung von ganz außerordentlicher Tragweite, Schrödingers Briefwechsel zur Wellenmechanik und zum Katzenparadoxon*. Berlin: Springer.