

Gerhard Grössing

Kontinuum

Die Geschichte einer Verdrängung,
mit besonderem Augenmerk auf die Quantentheorie

Vorbemerkung

Kategorien wie Kontinuum oder Kontinuität sind in der Geschichte der Geschichtswissenschaft von zentraler Bedeutung und haben dementsprechend das Interesse von Historiker/inne/n evoziert. Das Kontinuum wird in den Geschichtswissenschaften meist hinsichtlich seiner zeitlichen (und nur manchmal hinsichtlich seiner räumlichen) Dimension verwendet. Häufig ist mit Kontinuum ein Konzept von »Dauer« verbunden. Als Fernand Braudel seine einflussreiche Dreiteilung der Geschichte – Ereignisgeschichte, Konjunkturgeschichte und Geschichte der Langen Dauer – vornahm, verband er mit *longue durée* zweifellos eine Vorstellung vom Kontinuum historischer Strukturen sowie vom Kontinuierlichen historischer Prozesse.¹ Braudel bezog sich hier nicht nur implizit auf den Bergson'schen Begriff der Dauer als anthropologischer Kategorie, sondern hatte gewiss auch die Bemerkungen des wohl interessantesten französischen Historikers im 20. Jahrhundert im Sinne: »Diese wirkliche (d. h. »die historische«) Zeit«, so meint Marc Bloch in seiner *Apologie der Geschichte*, »ist ihrer Natur nach ein Kontinuum«,² und noch deutlicher lesen wir: »Man stellt sich den Verlauf der Menschheitsentwicklung als das Ergebnis einer Reihe von kurzen und tiefreichenden Schüben vor, von denen jeder nur den Zeitraum einiger Lebensalter erfüllt. Dem gegenüber beweist eine genauere Beobachtung: Die großen Erschütterungen *in diesem immensen Kontinuum* sind durchaus imstande, sich von den nächstliegenden bis zu den entferntesten Zeiträumen fortzupflanzen.«³ Diese Zitate – vieles Ähnliches findet sich bei vor- wie nachgeborenen Historiker/inne/n – belegen in ihrer Wortwahl und Metaphorik nicht bloß Blochs Bestreben nach einer Anthropologisierung des Geschichts-Bildes, sondern auch sein Bestreben nach dessen Physikalisierung und Biologisierung. Das »Kontinuum« bleibt hier ebenso merkwürdig wie wohl absichtsvoll unscharf. Denn

Historiker/innen haben es viel öfter als mit dem Kontinuierlichen mit dem Diskreten zu tun, mit dem *Ereignis*, dessen Charakter im Geschichtsverlauf sich freilich verändert.⁴

In diesem Artikel soll es nun darum gehen, »Kontinuum« und »Diskretes« noch einmal zu thematisieren – nicht aus der Perspektive der Historiker, sondern als (offene, keineswegs gelöste) Frage der Physik. Ein Forschungsstand soll dargestellt und eine Forschungsperspektive eröffnet werden, beides – ganz dem Journal entsprechend, in dem dies veröffentlicht wird – im Lichte des hier wissenschaftshistorischen Hintergrunds.

I. Die Verdrängung des Kontinuums mittels Zirkelschlüssen und anderen unlauteren Methoden

Was ist in einem Fluss? Wir nehmen ein Sieb oder ein Netz und fischen Dinge heraus, vielleicht auch Flusstiere. Das Wasser ist durch die Löcher unseres Dinge einfangenden Hilfsmittels in den Fluss zurück geronnen, wie Sand zwischen den Fingern durchrinnt. Wollen wir auch das Wasser, so brauchen wir ein anderes Werkzeug, wie eine Schale oder einen Krug. Damit schöpfen wir alles: Wasser und Dinge.

Diskret und kontinuierlich

Die (lebendigen wie die leblosen) Dinge und das Fischernetz bedingen einander, so wie das Wasser und der Schöpfkrug. Der Mathematiker nennt die gefischten Dinge ebenso wie die Knoten und Maschen des Netzes *diskret*: wohl-abgegrenzt (»diskontinuierlich«), mitunter auch abwechselnd hier anwesend, dort abwesend, und so weiter: 0, 1, 0, 1, etc. – wie die Verteilung der Finger (lat. *digiti*) einer Hand. Das Wasser und den Schöpfkrug nennt er *kontinuierlich*: vorhanden im ganzen Bereich des vorgegebenen Volumens, ununterbrochen bis zu den Rändern, dicht, ohne »Maschigkeit«, bei der etwas verloren gehen könnte.

Die Molekularbiologin denkt vornehmlich in diskreten Einheiten. Sie interessiert sich für den diskret-molekularen Aufbau des Flusstierchens, bis hinab zu seinen (vermeintlichen) »genetischen Bausteinen«. Der Ökologe hingegen interessiert sich für mehr: Er braucht nicht nur den Fisch (neben allen anderen Tieren), sondern auch das Wasser, in dem der Fisch lebt, um die Gesamtheit »systemisch« zu verstehen. Wasser und Fisch bewegen sich im Einklang mit den Gesetzen der Strömungslehre (Hydrodynamik), in der etwa Druck und Temperatur maßgebliche Faktoren sind, kontinuierliche Größen.

Die Welt des Diskreten huldigt letztlich einem *Atomismus* auf der Suche danach, »was die Welt im Innersten zusammenhält«. Das hat die Physik des 20. Jahrhunderts nachhaltig geprägt, und mit ihr einen generellen, weit verbreiteten radikalen Reduktionismus. Im Internet ist unter www.vega.org.uk/series/lectures/feynman das Video eines Vortrags von Richard Feynman an der University of Auckland aus dem Jahre 1979 abrufbar. Feynman war wohl einer der bedeutendsten und einflussreichsten Physiker der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts, und »sprühte« geradezu vor Einfallsreichtum, Humor und Eloquenz. Als er jedoch in besagtem Vortrag behauptete, dass die Chemie »im wesentlichen Physik« sei, da lachte das Auditorium – woraufhin der sonst so souveräne Feynman verärgert ausrief: »Das ist kein Scherz!« Offenbar hörte sich für ihn an dieser Stelle der Spaß auf, wo ein Credo berührt wurde, das nicht wirklich auf souveräne Weise bzw. »rational« verteidigt werden kann. So jedenfalls ist erklärlich, warum der Vortragende emotional reagierte und nicht mit der sonst üblichen Nonchalance zur Begründung seiner Behauptung schritt.

Dieses Feynmansche Credo ist von ihm auf vielfältige Weise zur Sprache gekommen, wobei folgende Passage zu seinen meist zitierten gehört

Es beunruhigt mich stets, dass gemäß den Gesetzmäßigkeiten, wie wir sie heute verstehen, eine Rechenmaschine eine unendliche Anzahl von logischen Operationen benötigt, um herauszufinden, was in einem noch so kleinen räumlichen oder zeitlichen Bereich stattfindet. Wie kann das alles in so einer kleinen Region vor sich gehen? Warum sollte es eine unendliche Menge an Logik brauchen, um herauszufinden, was ein kleines Stückchen Raum/Zeit anstellen wird? Und so habe ich oft die Hypothese aufgestellt, dass die Physik letztlich keine mathematische Feststellung brauchen wird, dass die Maschinerie am Ende aufgedeckt vor uns liegen wird, und die Gesetze werden sich als einfache herausstellen, wie das Damebrett mit all seinen scheinbaren Komplexitäten.

(It always bothers me that, according to the laws as we understand them today, it takes a computing machine an infinite number of logical operations to figure out what goes on in no matter how tiny a region of space, and no matter how tiny a region of time. How can all that be going on in that tiny space? Why should it take an infinite amount of logic to figure out what one tiny piece of space/time is going to do? So I have often made the hypothesis that ultimately physics will not require a mathematical statement, that in the end the machinery will be revealed, and the laws will turn out to be simple, like the chequer board with all its apparent complexities.)⁵

Ich finde dieses Zitat außerordentlich bemerkenswert – allerdings nicht in dem positiven Sinn, wie es vielfach Zustimmung unter Proponenten der Idee fand, dass

die ganze Welt ein »zellulärer Automat« sein könnte.⁶ Weit entfernt davon, diese Überlegung als besonders weitsichtig zu bewerten, würde ich sie viel eher als äußerst kurzsichtig einschätzen, in dem Sinn nämlich, dass die Sicht der Dinge vollständig beim Betrachter stehen bleibt: Wenn etwa von einer »unendlichen Menge an Logik« die Rede ist, oder wenn in diesem Zusammenhang auch oft von der Notwendigkeit »unendlicher Information« die Rede ist, müsste eigentlich klar sein, dass hierbei bereits eine unhinterfragte Diskretisierung *vorausgesetzt* wird und damit insgesamt ein Zirkelschluss vorliegt!

Die logischen Operationen einer herkömmlichen Rechenmaschine basieren auf der binären Logik, die die Welt ausschließlich in Nullen und Einsen erfasst, und ein Informationsmaß wie das bei weitem gebräuchlichste, d. h. das Shannonsche, ist proportional dem negativen Logarithmus der Wahrscheinlichkeit eines Zustandes, wobei unter dieser »Wahrscheinlichkeit« auf das Wissen bzw. Unwissen des Betrachters rekuriert wird. Liegt also etwa ein in Betracht genommener Wert aus einem Kontinuum, sagen wir zwischen Null und Eins, vor, so ist dessen »Wahrscheinlichkeit« *a priori* praktisch null (und die »Information« damit unendlich), weil es eben unendlich viele mögliche Zahlenwerte zwischen Null und Eins gibt, von denen dieser eine realisiert worden ist. Das ist natürlich sehr unpraktisch. Doch wo steht geschrieben, dass sich die Welt so verhalten *müsse*, dass sie mit unseren derzeitigen Instrumentarien der Logik und Informationstheorie, also mit diskreten Hilfsmitteln, stets auf praktikable Art erfasst werde? Könnte es nicht auch sein, dass die Welt einfach auf verschiedensten Ebenen abläuft und dabei mal diskrete, mal kontinuierliche *Beschreibungsmoden* vorteilhafter sein werden, aber keine allgemeine Regel existiert, wonach »letztlich« ein Modus der allein zielführende wäre? Es kommt ja auch niemand auf die Idee, die Entstehung und Ausbreitung eines Tsunami dadurch zu modellieren, dass er den zeitlichen Verlauf der einzelnen, praktisch unendlich vielen Wassermoleküle nachrechnet.

Sowohl die verbreitet angenommenen »punktförmigen« Teilchen der Elementarteilchen-Physik, als auch das Kontinuum in der Beschreibung von Wellenphänomenen sind nichts anderes als *Abstraktionen*, die auch in der Mikrophysik nie bewiesen werden können, weil dies in beiden Fällen unendliche Präzision erforderte und daher operational unüberprüfbar ist. Erkennt man aber, dass beide nur – miteinander praktikable – »Werkzeuge« zur Beschreibung von Naturvorgängen sind, so müssten beide als gleichwertige Optionen bewertet werden. Allerdings gibt es in den letzten Jahrzehnten eine starke Tendenz dazu, aus ideologischen und/oder marktorientierten Gründen *einer* Sichtweise absoluten Vorrang einzuräumen: Sie manifestiert sich heute im weltweit proklamierten Anspruch, dass die aus Nullen und Einsen (oder generell: aus diskreten Werten) gebildete »digitale Information« der »Urstoff der Welt« sei. Die Unendlichkeit zwischen Null und Eins, das Kontinuum

dazwischen, wird dabei negiert – obwohl etwa Norbert Wiener, der Begründer der Kybernetik, daran erinnerte, dass »jedes digitale Gerät in Wirklichkeit ein analoges«⁷ ist.

Digital und analog

Was heißt »analog«? In den Anfängen von Kybernetik und Informationstheorie wurden die Begriffe *digital* und *analog* sehr kontrovers diskutiert, wobei mit der Gegenüberstellung von »diskret codiert« versus »kontinuierlich codiert« zunächst weitgehende Übereinstimmung erzielt wurde. Wie erst heute, etwa mit dem wissenschaftshistorischen Aufarbeiten der von Heinz von Foerster herausgegebenen Proceedings der *Macy Conferences* (1946-1953), klar wird, ist es den anwendungsorientierten Wissenschaftlern wie John von Neumann gelungen, die komplexe Frage nach »digital oder analog« in eine »pragmatische« umzudefinieren. Damit wird wie selbstverständlich von einer – etwa mit dem menschlichen Gehirn gleichgesetzten – Rechenmaschine als digitalem Gerät ausgegangen, und die zu Grunde liegenden analogen physikalischen Prozesse, die erst zu digitalen Resultaten führen können, auf die Frage möglichst hoher »Umschalt-Geschwindigkeiten« reduziert (d. h. etwa zwischen den beiden digitalen Zuständen 0 oder 1). Der später als »von Neumann-Architektur« elektronischer Rechner beschriebene Computer-Aufbau ist also dadurch gekennzeichnet, dass seine Schalter möglichst schnell operieren, was nach Neumann bedeutet, dass jegliches Schaltelement »in dem einen oder anderen seiner beiden extremen Zustände vorgefunden wird und nur sehr wenig vorübergehende Zeit in den dazwischen liegenden Zuständen verbringt, die das verbindende Kontinuum formen. So gibt es eine Kombination von relativ sicherem Verhalten zuerst, dann einen schnellen Übergang, und dann wieder ein relativ sicheres, wenn auch anderes, Verhalten.« (...) »Man muss wohl sagen, dass in nahezu allen Bereichen der Physik die zugrundeliegende Realität analogisch ist, das heißt, die wahren physikalischen Variablen sind in nahezu allen Fällen kontinuierlich. (...) Die digitale Vorgehensweise ist gewöhnlich ein menschliches Artefakt zum Zweck der [einfachen] Beschreibung.«⁸

Übertragen auf die Modellierung des menschlichen Gehirns durch ein rein digitales Netzwerk, entsprach dem auch ein Ignorieren analoger Prozesse im Gehirn. Neumann kümmerte sich einfach nicht darum, welche Prozesse hinter der (fälschlicher Weise) als universell angenommenen »Alles-oder-Nichts«-Funktion von Nervenzellen stehen. Entscheidend sei, so der merkwürdige Zirkelschluss, den wir in ganz ähnlicher Weise schon bei Feynman festgestellt haben, dass das Gehirn gar nicht analog funktionieren könne, weil es unmöglich sei, so viel Information zu verarbeiten!⁹

Andere Teilnehmer der Macy-Konferenzen waren im Verdrängen alles Kontinuierlichen noch deutlicher. Dass in Digitalrechnern »diskrete Handlungen vor dem Hintergrund kontinuierlicher Vorgänge simuliert werden«, verleitete Julian Bigelow zu folgender Forderung: »Ich glaube, es ist entscheidend, hervorzuheben, dass das eine verbotene Zone des Dazwischen einschließt und eine Abmachung, dieser verbotenen Zone niemals irgendeinen Wert zuzuschreiben.«¹⁰ Und Walter Pitts schlug vor, »die tatsächliche Kontinuität zu ignorieren«, sie so zu behandeln, »als würden diese Übergänge einfach nicht existieren.«¹¹

Wenn also Kontinuitäten wissentlich ignoriert und wenn damit *verbotene Zonen* ausgerufen werden: Warum können dann bis heute namhafte Wissenschaftler behaupten, dass diskrete Information (sei sie nun auf herkömmliche Weise »digital«, oder neuerdings auch »quantenmechanisch«) den »Ur-Stoff der Welt« ausmache?¹² Eine mögliche Antwort wurde mit dem Hinweis auf technologisch ausgerichteten Pragmatismus bereits angedeutet. Es lassen sich aber auch mit großer Plausibilität tiefer liegende Ebenen angeben, wovon eine gleichfalls schon genannt wurde: Ein universaler Atomismus, demzufolge alles in der Welt aus diskreten, also begrenzten, und damit im Prinzip (und unter den weiteren Rahmenbedingungen) technisch kontrollierbaren Einheiten aufgebaut sei. Auf rein ideologischer beziehungsweise metaphysischer Ebene treffen wir hier natürlich wieder auf alte Anschauungen, die letztlich einem christlich-abendländischen Platonismus das Wort reden – das Wort, das gemäß der Überlieferung »im Anfang« gewesen sein soll. Heute gibt es eine andere Kurzformel dafür, John A. Wheelers »It from Bit«: primär sei »Information« in der Welt, und die Materie ein bloßes Derivat davon.¹³

Reduktionismus und Emergenz

Diesem atomistischen Glauben, der sich auch im Festhalten an der Möglichkeit einer »Theory of Everything« manifestiert, lassen sich allerdings sehr konkrete und nicht weniger pragmatische Argumente entgegenhalten. Dazu zählt etwa, dass die *Messung jeder fundamentalen physikalischen Größe* nur dann *mit höchster Präzision* gelingt, wenn dabei ein konkret benennbares *kollektives Prinzip* zur Anwendung kommt. Was ist zunächst unter einem kollektiven Prinzip zu verstehen? Nun, man denke etwa an Schallwellen oder an den ruhigen Fluss von Wasser aus einem Wasserhahn. Wie wir wissen, besteht die Luft wie das Wasser aus Atomen bzw. Molekülen, die in wildem Durcheinander unterwegs sind und mitunter kollidieren. Wie kann daraus die hohe Regelmäßigkeit von Schallwellen oder der laminare Wasserfluss entstehen? Der Grund dafür liegt in einem Organisationsprinzip, das man mit dem Wort »Hydrodynamik« umschreiben kann: Dieses Prinzip kann allerdings nicht vorliegen,

wenn man es nur mit einigen wenigen, oder mit einigen tausend Atomen zu tun hat; dazu sind vielmehr Millionen von Millionen solcher Teilchen nötig.¹⁴ Dann können wir nämlich auf der Beschreibungsebene mit der Annäherung der Vorgänge durch die Mathematik des Kontinuums operieren, und so werden Schall und laminarer Fluss universelle Phänomene, die weitgehend unabhängig sind von der speziellen Art der die »Flüssigkeiten« ausmachenden Atome.

Jetzt können wir uns der oben erwähnten Frage nach der präzisen Messung fundamentaler physikalischer Größen zuwenden. So ist etwa das Elektron ein »Elementarteilchen«, von dem man nach dem atomistischen Prinzip annehmen sollte, dass man die Materie *auseinandernehmen* müsste, um eine seiner »fundamentalen« Eigenschaften wie z. B. seine Ladung zu messen. Befasst man sich allerdings mit den gängigen Hochpräzisions-Messungen der Ladung des Elektrons, so wird man feststellen, dass dabei vielmehr die Ausnützung eines emergenten Phänomens, der Eigenschaften flüssigen Wassers, notwendig ist! Der Festkörper-Physiker R. B. Laughlin (Nobelpreis 1998) verwendet dieses und andere Beispiele zur Illustration seiner sehr umfassend angelegten Feststellung: *Jede physikalische Größe, die mit großer Genauigkeit bekannt ist, verdanke diese Genauigkeit einem kollektiven Prinzip.* Laughlin betont in seiner Nobelpreis-Rede,¹⁵ dass etwa der so genannte »fraktionelle Quanten-Hall-Effekt« oder die Supraleitfähigkeit emergente Phänomene sind, die nicht aus »ersten Prinzipien« wie etwa der Schrödinger-Gleichung hergeleitet werden können, auch um zu unterstreichen, dass »die Idee des Reduktionismus meistens falsch ist, vielleicht sogar immer.«¹⁶ Den Zweiflern an dieser Sichtweise hält er folgendes entgegen: »Eine häufige Reaktion in frühen Stadien des Lernens findet sich in der Annahme, dass Supraleitfähigkeit und der Quanten-Hall-Effekt eben nicht fundamental seien und daher nicht ernst genommen werden müssten. In diesem Fall schlage ich bloß das Handbuch des *American Institute of Physics* auf und zeige dem Ungläubigen, dass die akzeptierten Werte von e (elektrische Elementarladung) und h (Plancksches Wirkungsquantum) durch diese Effekte *definiert* sind, und damit hat sich's dann.«¹⁷

Am Ende seiner Rede kam Laughlin noch auf eine andere Bedeutung des Begriffs »fundamental« zu sprechen (*vis á vis* Überlegungen zu »Theories of Everything« wie z. B. die Theorie der so genannten »Strings«), nämlich in dem engeren Sinn, dass »fundamentale« Größen¹⁸ (wie z.B. die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit) nicht hergeleitet werden können, sondern *postuliert* werden müssen:

Ich habe keine Ahnung, ob die Eigenschaften des Universums, wie wir es kennen, fundamental oder emergent sind, doch ich meine, dass die bloße Möglichkeit des Letzteren die String-Theoretiker zu einer Denkpause veranlassen sollte, da es implizieren würde, dass mehr als ein Satz von mikroskopischen

Gleichungen mit dem Experiment übereinstimmt – sodass wir so lange blind sind gegenüber diesen Gleichungen, als nicht bessere Experimente entworfen werden – und auch, dass die wahre Natur der mikroskopischen Gleichungen für unsere Welt irrelevant ist. Die Herausforderung an das konventionelle Denken über das Universum durch diese »small science«-Entdeckungen ist also irritierend und sehr tief.

(I have no idea whether the properties of the universe as we know it are fundamental or emergent, but I believe that the mere possibility of the latter should give the string theorists pause, for it would imply that more than one set of microscopic equations is consistent with experiment – so that we are blind to these equations until better experiments are designed – and also that the true nature of the microscopic equations is irrelevant to our world. So the challenge to conventional thinking about the universe posed by these small-science discoveries is actually troubling and very deep.)¹⁹

Atomismus und Hydrodynamisches Prinzip

In zahlreichen wissenschaftlichen und populärwissenschaftlichen Darstellungen werden Diagramme wie jenes aus Abb. 1 angeführt, die einige der »wesentlichsten Strukturen« im Universum auflisten: Atome, Moleküle, einzelne Zellen, Pflanzen,

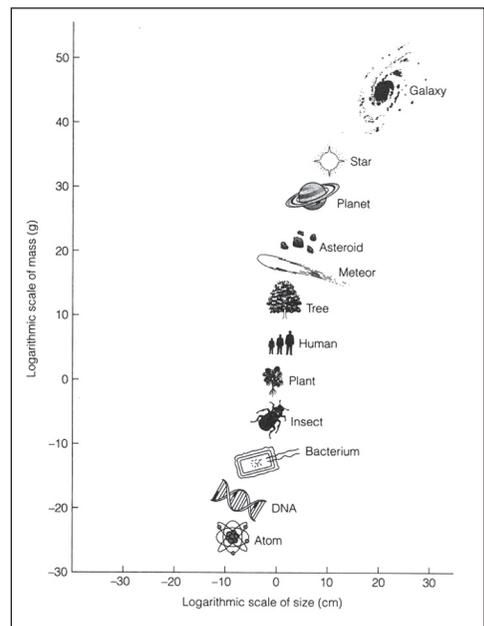


Abb. 1: Auswahl »wesentlicher Strukturen« im Universum bei John D. Barrow, *The artful Universe*, Oxford 1995.

Tiere, Menschen, Felsen, Monde, Planeten, Galaxien. Nie findet man in solchen Diagrammen oder Tabellen: Flüsse, Wälder, Wüsten, Wolken, Meere, Eisenbahn- oder Telekommunikations-Netzwerke, Städte, ... Abb. 2 zeigt hingegen einige Beispiele für »kontinuierliche« Strukturen auf allen Längenskalen, die durch »hydrodynamische« Gleichungen der Kontinuums-Mathematik beschrieben werden.

Nun ergeben sich allerdings neue Fragen, wie etwa jene nach den Grenzen (der Beschreibung wie des Beschriebenen): Wo endet das Meer? Am Strand, aber wo genau? Einmal hier, einmal da: die Grenze wogt. Genau genommen ist das Meer also nicht de-finierbar? Nun, es ist zumindest nicht digital, sondern durch ein Kontinuum charakterisiert. Freilich besteht es vornehmlich aus Wasser, und dieses aus

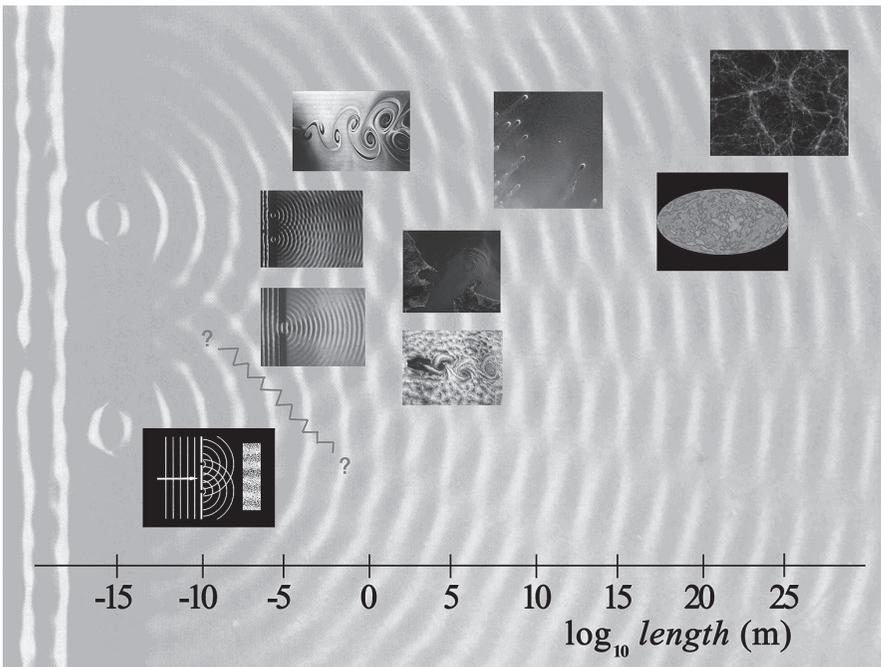


Abb. 2: Einige Beispiele für »kontinuierliche« Strukturen auf allen Längenskalen, die in Zusammenstellungen wie Abb. 1 nicht vorkommen. Die hier abgebildeten Strukturen können allesamt durch Gleichungen der Kontinuums-Mathematik beschrieben werden, wie sie üblicherweise in der Hydrodynamik Verwendung finden. Die Abbildung zeigt, von rechts nach links: Hydrodynamisches Modell des frühen Universums, Fluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung, »Gastropfen« im Helix-Nebel, Strömungswirbel bei der Insel Guadeloupe, Strömungswirbel auf einer Skala von Zentimetern, Beugungsmuster der Meereswellen am »Spalt« von Gibraltar, Beugung von Wasserwellen am Spalt im Zentimeter-Bereich, Beugung von Wasserwellen am Doppelspalt im Zentimeter-Bereich, Schema der Interferenz von Wellen auf Quantenniveau (wobei aber von der orthodoxen Quantentheorie der hier gezeigte, hydrodynamische Kontext heute meist ignoriert wird). Aus Gerhard Grössing, Wasser als Vorbild zur Naturforschung, in: Bernd Busch, Red., Wasser, Köln 2000, 69-81.

Molekülen. Doch abgesehen davon, dass das Verhalten von Wasser nur als kollektives Phänomen vieler (sehr komplex miteinander agierender) Moleküle verstanden werden kann, sind auch Moleküle wiederum, und erst recht die sie aufbauenden Atome, mittels Quantentheorie zu beschreiben. Diese Theorie ist aber unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass sie diskrete Einheiten («Teilchen») mit kontinuierlichen Phänomenen («Wellen») in Verbindung bringt.

Teilchen und Wellen

Hier gelangen wir zu einem weiteren zentralen wissenschaftshistorischen Problem, das um ein Verbot kreist: das Verbot, sich mittels «Wellen» ein anschauliches Bild der Quantenvorgänge zu machen, obwohl dies nachweislich möglich ist. Auch dieses Verbot hängt mit einem »pragmatischen« Diktat, vor allem US-amerikanischen Ursprungs, zusammen, das Fragen nach einer »feinstofflichen« Materialität der Quanten (die sich in entscheidender Weise in ihrer Wellennatur äußert) zugunsten »unphilosophischer«, sprich technischer, Effizienz hintanstellt. Obwohl unter Physikern keineswegs Übereinstimmung darüber herrscht, erklärt etwa Richard Feynman in seinem berühmten Buch über die Quantenelektrodynamik:

Es ist sehr wichtig, zu wissen, dass sich Licht wie Teilchen verhält, speziell für diejenigen von Ihnen, die zur Schule gegangen sind und dort etwas über Licht zu hören bekamen, das sich wie Wellen verhalten soll. Ich sage Ihnen wie es sich *tatsächlich* verhält – wie Teilchen.²⁰

Diese meinungsstarke Aussage erscheint aber in einem anderen Licht, wenn man Feynmans weitere Aussagen in besagtem Buch berücksichtigt, etwa, dass »die Art, wie wir die Natur beschreiben müssen, generell unverständlich für uns« sei, oder: »... ich hoffe, Sie können die Natur akzeptieren, wie Sie ist – absurd.«²¹ Interessant ist dabei, dass bis zum heutigen Tag (aus noch genauer zu diskutierenden Gründen) maßgebliche Physiker eher bereit sind, das formale Regelwerk der Quantentheorie als funktionierend, aber unverständlich zu akzeptieren, als den kontinuierlichen Wellenphänomenen denselben Status zuzusprechen wie den Teilchen, was nachweislich auch zu einem tieferen Verständnis der Theorie führen kann.

Doch die Zeichen mehren sich in einer großen Zahl von Wissensgebieten, dass – wie jedes Paradigma – die ingenieurs-mäßige Zerlegung der Welt in manipulierbare, diskrete Einheiten an ihre Grenzen stößt und Widersprüche entstehen lässt, die nicht mehr wegzuleugnen sind. Beispiele dafür reichen von den eben erwähnten Quantenphänomenen über alle Skalen bis hin zu Fragen der Kosmologie.

Auch in letzterer nimmt man heute zur Kenntnis, dass um die Annahme eines Kontinuums oder »Mediums«, in dem die sichtbare materielle Welt eingebettet zu sein scheint, kein Weg vorbeiführt. So werden etwa Galaxien heute nicht mehr als »Welteninseln« betrachtet, voneinander getrennt durch die »unendlichen Tiefen« eines leeren Weltraums, sondern als besonders starke »Verdichtungen« einer eher »schaumartig« vernetzten Materieverteilung. Ein oft verwendetes Bild ist dabei jenes von brechenden Ozeanwellen, die für die Galaxien stünden, während der ganze Ozean metaphorisch die nicht-leuchtende (und auch in der Fachsprache so genannte »dunkle«) Materie versinnbildlicht.

In keinem Fall wird nun aber ein diskretes durch ein kontinuierliches Paradigma abzulösen sein, sondern beide sollten letztlich als jeweils begrenzt brauchbare Optionen zur Beschreibung einer Welt anerkannt werden, die bei stetem Vorantreiben des einen Paradigmas irgendwann notwendigerweise ins andere umkippt und umgekehrt. So wäre also die Welt wie ihre Beschreibung: stets im Fluss.

II. Totalitäre Geschichtsschreibung in der Quantenphysik

In einem Festvortrag an der Universität Wien im Jahre 1987, anlässlich des 100. Geburtstages von Erwin Schrödinger, hat der berühmte Quantenphysiker John Bell den (wörtlich) »Skandal« beklagt, dass die so genannte »deBroglie-Bohm-Interpretation« (dBBI) der Quantenmechanik nicht in gleichwertiger Weise mit der »Kopenhagener Interpretation« behandelt und an den Universitäten gelehrt wird. Im Gegenteil, über Jahrzehnte hinweg, bis zum heutigen Tag, ist die dBBI immer wieder marginalisiert beziehungsweise vollkommen falsch dargestellt worden. Tatsächlich hat aber John Bell seine eigenen Arbeiten zur Quantentheorie fast ausschließlich den Implikationen rund um die besagte dBBI gewidmet. Im November 2000 fand an der Universität Wien ein Symposium mit renommierten Physikern aus aller Welt anlässlich des 10. Todestags von John Bell statt. Dazu wurden Physiker eingeladen, die nachweislich erst kurz zuvor wieder dezidiert falsche Darstellungen der Anliegen der dBBI publizierten. Hingegen war kein einziger Repräsentant der dBBI unter den Rednern, obwohl die Tagung in Bells Namen abgehalten wurde. Der Skandal fand also seine Fortsetzung.

Auch berühmte Physiker wissverstehen,²² verdrängen, lügen

Die Geschichte lässt sich von dem berühmten Artikel ausgehend erläutern, den Einstein, Podolsky und Rosen (EPR) im Jahre 1935 publiziert hatten.²³ Zentrale Themenbereiche ihrer Arbeit waren zwei Begriffe: a) der Begriff der »Realität« (sie bezeichnen ein Ereignis als ein »Element der Realität«, wenn es mit Sicherheit vorhergesagt werden kann: wenn z. B. eine Geldmünze auf der Vorderseite eine »1« und auf der Rückseite einen »Adler« zeigt, so kann nach einem Münzwurf, der die »1« obenauf liegen lässt, mit Sicherheit vorhergesagt werden, dass auf der Rückseite ein »Adler« zu sehen sein wird; d. h., auch der zunächst unbeobachtete »Adler« ist dann ein »Element der Realität«), und b) ein rein quantenmechanischer Effekt, der heute unter dem Begriff der »Nichtlokalität« zusammengefasst wird (metaphorisch übertragen, könnte man sagen, dass die »1« an einem Ort gemessen ohne Verzögerung einen »Adler« an einem anderen Ort impliziert, der beliebig weit weg sein kann).

Dieser Nichtlokalität ist (nach de Broglie in den 1920er Jahren) David Bohm seit den 1950er Jahren nachgegangen.²⁴ Heute spricht man von der »deBroglie-Bohm Interpretation« (dBBI) der Quantentheorie, die versucht, mittels so genannter »verborgener Parameter« (welche ihrerseits auf ein das Quanten-Vakuum erfüllendes hydrodynamisches »Medium« hinweisen, das manchmal auch – wieder – »Äther« genannt wird) die nichtlokalen wie alle anderen Effekte der Quantentheorie *kausal* darzustellen: Dabei werden diskrete »Teilchen« in einem wellenartigen bzw. kontinuierlichen »Führungsfeld« – je nach dieses Feld determinierendem experimentellen Kontext –, mithin »kausal«, in bestimmte Richtungen gelenkt. Historisch hat sich aber eine andere Interpretation durchgesetzt, nämlich die so genannte »Kopenhagener«: Sie ist nicht daran interessiert zu ergründen, was »hinter« den derzeit bekannten (und im reinen »Teilchen«-Bild unverstandenen wie unverständbaren) Quanteneffekten liegt, sondern begnügt sich mit dem Formalismus der Quantentheorie, der allein ausreicht, um die unzähligen technologischen Verwertungserfolge stets weiter voranzutreiben. Allerdings zu einem Preis: Der Begriff der »Realität« wird dermaßen radikal in Frage gestellt, dass dabei besonders viel Spielraum für Mystifikationen eröffnet wird.²⁵

Jedenfalls wurde durch ausreichend dokumentiertes Lobbying über Jahrzehnte hinweg die dBBI marginalisiert bzw. explizit falsch dargestellt (auch von führenden Physikern!), der »Materialist« Bohm in der McCarthy-Ära sogar politisch verfolgt, und Vertretern der dBBI blieb bis vor einigen Jahren öffentliche Anerkennung (geschweige denn, die Möglichkeit, größere Forschungsgelder aufzutreiben) weitgehend versagt.²⁶

Kommt es eventuell auf Tagungen heute zu Diskussionen um die Kontroverse zwischen der dBBI und »Kopenhagen«, so hört man sehr oft den Standard-Satzbe-

ginn: »Aber die Quantentheorie sagt, dass...«, wobei automatisch impliziert wird, dass »die Quantentheorie« mit der orthodoxen Sichtweise synonym sei – ein klassisches rhetorisches Mittel zur puren Machtausübung, nicht aber zur redlichen wissenschaftlichen Kontroverse.²⁷

Letztere findet leider sehr oft überhaupt nicht statt. Dafür wird in einem »Anti-Materialismus« geschwelgt, der mit einem mysteriösen Hinterfragen unseres »Realitätsbegriffs« (s.o.) gekoppelt wird. Hier macht leider auch Anton Zeilinger, Organisator der Bell-Konferenz an der Universität Wien, keine Ausnahme. Seine weltbekannten Experimente zur so genannten »Quanten-Teleportation« und eine Reihe anderer (meines Erachtens wichtigerer) Experimente stellen zwar ohne Zweifel bedeutsame wissenschaftliche Errungenschaften dar. Dies hat aber nur sehr wenig mit den privaten weltanschaulichen Positionen zu tun, die von Zeilinger, wenngleich bloß auf spekulativ/interpretativer Ebene, medial massiv mittransportiert werden. Dazu gehört unter anderem eine vehemente Ablehnung kausaler Interpretationen wie der dBBI zugunsten von Lobpreisungen einer vermeintlichen »Verrücktheit« der Quantenphänomene.

Doch hierzulande waren die Verhältnisse noch nie anders. Der Vorgänger auf Zeilingers Lehrstuhl, Peter Weinzierl, hat (um bloß ein Beispiel zu geben) in einem Leserbrief an das »Spektrum der Wissenschaft« (Juni 1995) einen Aufsatz David Alberts über die dBBI heftig kritisiert (in einer Zeit übrigens, in der sich schon ein breiteres Interesse an der dBBI unter Physikern etabliert hatte). Dabei schrieb Weinzierl unter anderem: »Meines Erachtens ist selten eine Theorie so eindeutig widerlegt worden wie die von Bohm und darum nur mehr von historischem Interesse. (...) Albert erweckt jedoch den Eindruck, diese Theorie stehe immer noch im Mittelpunkt der Diskussion unter Physikern, was sicherlich für 90 Prozent von ihnen nicht zutrifft.«²⁸ Zum Glück war die Redaktion des »Spektrum« aufmerksam genug, und antwortete dem ehemaligen Ordinarius des Instituts für Experimentalphysik der Universität Wien in einer süffisanten Anmerkung: »Entgegen einer verbreiteten Meinung bedeuten die Bellschen Ungleichungen keine Widerlegung der Bohmschen Quantentheorie. Sie schließen jegliche lokale Theorie der Quantenphysik aus, das heißt jede, die den typischen Quanteneffekt der Korrelationen getrennter Messergebnisse als Scheineffekt erklären und auf klassisch-lokale Wirkungen zurückführen möchte. Die Bohmsche Theorie gehört nicht zu ihnen: Sie ist eine explizit nicht-lokale Theorie.«²⁹ [... die Bell erst zu seinen Ungleichungen inspirierte, wäre noch hinzuzufügen!]

Derartige falsche Unterstellungen gab es immer wieder, von den 1950er bis zu den 1990er Jahren, aber in neuester Zeit? Nun, da lesen wir in einem (sonst sehr interessanten) Paper von David Deutsch, Artur Ekert und Rossella Lupacchini über den Weg eines Photons durch ein so genanntes »Interferometer« (ähnlich einem

Doppelspalt), von dem die dBBI gezeigt hat, dass dieser kausal erklärbar ist und trotzdem die richtigen quantenmechanischen Interferenz-Effekte impliziert:

Jegliche Erklärung, die annimmt, dass das Photon genau einen Weg durch das Interferometer nimmt, führt zum Schluss, dass die zwei Detektoren im Durchschnitt jeweils zur Hälfte ansprechen sollten, wenn das Experiment durchgeführt wird. Doch das Experiment zeigt, dass es anders ist [d. h., es zeigt Interferenz-Effekte, G. G.]!

(Any explanation which assumes that the photon takes exactly one path through the interferometer leads to the conclusion that the two detectors should on average each fire on half the occasions when the experiment is performed. But experiment shows otherwise!)³⁰

Einer der Autoren, Artur Ekert, hat übrigens auf der Bell-Tagung in Wien vorgetragen. Ein weiteres Beispiel: In der Zeitschrift *Science* vom 11. 8. 2000 haben Daniel Kleppner und Roman Jackiw vom MIT einen Übersichtsartikel über »One Hundred Years of Quantum Physics« publiziert. Darin wird auch kurz auf die Bellschen Ungleichungen und die Möglichkeit von »verborgenen Parametern« eingegangen. Die entsprechenden Experimente hätten gemäß den Autoren Folgendes gezeigt:

Ihre kollektiven Daten sprachen in entscheidender Weise gegen die Möglichkeit von verborgenen Variablen. Für die meisten Wissenschaftler tilgte dies jeden Zweifel über die Richtigkeit der Quantenmechanik.

(Their collective data came down decisively against the possibility of hidden variables. For most scientists this resolved any doubt about the validity of quantum mechanics.)³¹

(Angesichts solcher Sätze, in *Science*, im Jahr 2000, kann es einem schon die Sprache verschlagen!) Einer der Autoren, Roman Jackiw, hat übrigens auf der Bell-Tagung in Wien vorgetragen.

Der Titel der Wiener Tagung lautete »Quantum [Un]speakables«,³² in Anspielung an das Buch John Bells, »Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics«,³³ in dem all seine Aufsätze zum Thema Quantenphysik (und Relativitätstheorie sowie Physik des »Äthers«) zusammengefasst sind. Mindestens 80 Prozent der Artikel befassen sich explizit mit der dBBI, implizit ohnehin alle. Wäre die Tagung ganz eng auf die »Bellschen Ungleichungen« und ihre technologischen Konsequenzen (hinsichtlich Quantencomputer, -Kryptographie u.s.w.) eingeschränkt gewesen, so wäre nichts dagegen zu sagen, dass kein einziger Vertreter der dBBI zu Wort kam. Da aber die Tagung offensichtlich Bells Person und Gesamtwerk anlässlich seines

10. Todestags gewidmet war, bestätigt die Einladungspolitik der Veranstalter nur zu deutlich die Ignoranz und die geradezu zynischen Machtverhältnisse in der »physics community«, gegen die John Bell Zeit seines Lebens angekämpft hat.

Doch damit nicht genug: Im Februar-Heft 2001 des *Scientific American* veröffentlichten Max Tegmark und John A. Wheeler einen Artikel mit dem Titel »100 Years of the Quantum«. ³⁴ Nun ist zumindest Wheeler jemand, der mit der Kontroverse um die dBBI sehr vertraut ist, da er sich immer wieder als expliziter Gegner der Theorien verborgener Variablen von Bohm und anderen engagierte. Trotzdem mag man sich darüber wundern, dass er (und mit ihm andere führende Physiker anlässlich ähnlicher Gelegenheiten) sogar zu Lügen wie der folgenden in einem weitverbreiteten Medium greift:

Könnten die offenbar zufälligen Quantenprozesse durch irgend eine unbekannte Größe innerhalb von Teilchen, so genannte »verborgene Variablen«, ersetzt werden?³⁵

CERN-Theoretiker John Bell zeigte, dass in diesem Fall Größen, die in bestimmten schwierigen Experimenten gemessen werden könnten, unausweichlich zu den Standard-Vorhersagen der Quantentheorie in Widerspruch stünden. Nach vielen Jahren erlaubte es die Technologie, diese Experimente durchzuführen und die Möglichkeit verborgener Variablen auszuschließen. (Could the apparent quantum randomness be replaced by some kind of unknown quantity carried out inside particles, so-called »hidden variables«? CERN theorist John Bell showed that in this case, quantities that could be measured in certain difficult experiments would inevitably disagree with standard quantum predictions. After many years, technology allowed researchers to conduct these experiments and eliminate hidden variables as a possibility.)³⁶

Angesichts derartiger Beispiele, die noch dazu bloß die Spitze eines Eisbergs im Meer der Quanten-Informationen ausmachen, lässt sich durchaus an der Redlichkeit mancher im Wissenschaftsprozess Beteiligter zweifeln. Dabei haben wir noch gar nicht die Fülle an populärwissenschaftlichen Büchern zum Thema überblickt, in denen die dBBI – sofern sie überhaupt vorkommt – nur sehr »stiefmütterlich« behandelt wird. Ein Beispiel ist vielleicht besonders interessant, das Buch mit dem Titel *Entanglement* des bekannten Wissenschaftsjournalisten Amir D. Aczel. Immerhin findet man darin ein ganzes Kapitel (!) zu David Bohm und seinem Schüler Yakir Aharonov. Doch umso überraschender ist bei der Lektüre der Umstand, dass Bohm hier zwar breiter Raum geboten wird, aber Aczel es schafft, das Herzstück von Bohms theoretischen Bemühungen (die dBBI) mit keinem einzigen Wort zu erwähnen!³⁷

Diese Beispiele belegen eine Geschichtsschreibung, die, fände sie im politischen Kontext statt, nicht anders als totalitär zu bezeichnen wäre! Offenbar verleitet der geradezu fundamentalistische Anti-Materialismus der herrschenden Quanten-Orthodoxie zu Methoden, wie sie selbst in schlimmsten Zeiten des Stalinismus nicht anders praktiziert wurden: Totale Fehldarstellung der Gegenseite, meist gar völlige Nicht-Erwähnung, beziehungsweise – wenn es sich schon nicht verhindern lässt – Anführung der Leistungen einzelner (Bell, Bohm) unter Auslassung der Erwähnung ihrer eigentlichen Absichten.

Zeilingers Zufall

Manchmal kommen wissenschaftliche Sensationen leise daher und bleiben für eine größere Fachkollegenschaft, geschweige denn für eine breitere, interessierte Öffentlichkeit, lange verborgen, bis sie dann aber doch – mit etwas Glück oder »zufällig« – in weiteren Kreisen Bekanntheit erlangen. Die Physiker Geremia, Stockton und Mabuchi vom *California Institute of Technology* haben in einem raffinierten Experiment etwas geschafft, was viele (Quanten-) Physiker für unmöglich hielten: Sie haben den vermeintlich unüberwindbaren Zufall gesteuert, bis ein von ihnen gewünschtes Resultat binnen kürzester Zeit (100 Mikrosekunden) erreicht wurde. Leider wurde ihre Arbeit in den Medien nicht für interessant genug erachtet – vielleicht auch, weil sie zur Ent-Mystifizierung beiträgt, während »populäre« Medien viel lieber das Mysterium breittreten.

Diese Physiker haben gezeigt, dass der Quanten-Indeterminismus durch eine »blitzschnelle« Feedback-Prozedur während eines Messvorgangs so gesteuert werden kann, dass letztlich bei einem bestimmten – gewöhnlich rein »zufälligen« – Prozess ein determiniertes Resultat herauskommt. Konkret haben sie eine Atom-Wolke von etwa 100 Milliarden Cäsium-Atomen auf 1 Mikro-Kelvin heruntergekühlt, so dass die Wolke sich in einem Volumen von einem Zehntel eines Kubikzentimeters aufhielt.

In diesem Zustand verhält sie sich, obwohl aus sehr vielen Atomen bestehend, wie *ein* Objekt, das zum Beispiel eine bestimmte Spin-Richtung aufweist, die im Experiment gemessen wird. Nun besagt Heisenbergs Unschärfe-Relation, dass bei Messung einer Spin-Komponente (sagen wir, in z-Richtung), die Komponenten in den anderen Richtungen (x, y) dem reinen Zufall unterworfen sind und nicht bestimmt werden können. Selbst die eine (z-) Komponente kann nur im statistischen Mittel vorhergesagt werden, in der Einzelmessung ist sie mal so, mal so. Durch einen genialen Trick haben nun die CalTech-Physiker den Zufall überlistet: Mittels eines sehr schwachen Lasers haben sie die Atomwolke nur »ein wenig« gemessen (>weak

measurement«, ein schon länger bekanntes Verfahren), und die nachher gemessene Polarisation hat den Physikern angedeutet, in welcher *ungefähren* Richtung sich die Wolke dreht.³⁸ Dann haben sie ein Magnetfeld eingeschaltet, das diese bestimmte Richtung verstärkt und danach wieder einen Laser-Impuls durchgeschickt, der jetzt schon eine genauere Variante des Drehimpulses lieferte. Und das haben sie mehrmals wiederholt, bis der Spin eindeutig festlag, im Prinzip dort, wo sie ihn haben wollten. All das erfolgte binnen 100 Mikrosekunden – und zwar mit einem vorher-sagbaren Resultat für jede spezifische Messung, nicht bloß im (von der Schrödinger-Gleichung vorgegebenen) statistischen Mittel.³⁹

Die CalTech-Gruppe hat also bewiesen, dass ein Quantensystem so gemessen werden kann, dass ein vorhergesagtes bzw. vorhersagbares Resultat herauskommt, und nicht bloß ein zufälliges. Ein Quantensystem kann in einen gewünschten Zustand übergeführt werden. Dies widerspricht eklatant den herkömmlichen Quanten-Mythologien:

Lehrbücher der Quantenmechanik haben Generationen von Physik-Studenten mit der Idee verwirrt, dass der Akt der Messung eines quantenmechanischen Systems ein Resultat erzeugt, das inhärent zufällig, unvorhersagbar und ohne Grund ist, selbst obwohl das durchschnittliche Resultat vieler identischer Messungen genau vorhersagbar ist. Autoren haben viel Tinte darüber verschwendet, dieses mysteriöse Verhalten der Natur zu interpretieren.

(Quantum mechanics textbooks have mystified generations of physics students with the idea that the act of measuring a quantum-mechanical system produces a result that is inherently random, unpredictable, and without cause, even though the average result of many identical measurements is precisely predictable. Writers have spilled much ink in interpreting this mysterious behavior of nature.)⁴⁰

Einige Beispiele derart verbrauchter Tinte findet man in Artikeln Anton Zeilingers, wie etwa jenem mit dem vielsagenden Titel: »Jenseits jeder Gewißheit. Das Rätsel der Quantenwelt«. ⁴¹ Da ist davon die Rede, dass in der herkömmlichen klassischen Physik der Zufall ein »subjektiver« sei: »Er ist auf nicht ausreichende Kenntnis der Details zurückzuführen. Eine solche Erklärung ist in der Quantenphysik nicht mehr möglich, da solche Details nicht existieren. Der Zufall in der Quantenphysik ist daher ein objektiver.« ⁴² (In anderen Worten behauptet Zeilinger hier ganz flott, dass verborgene Variable nicht existieren: Weil weder die gegenwärtig orthodoxe Theorie noch das Experiment heute an sie herankommen, gibt es sie eben gar nicht! Dies erinnert natürlich in frappierender Weise an die Zweifel zu Ende des 19. Jahrhunderts an der damals »unbewiesenen« und stark bekämpften »Atomhypothese«.)

Eine typische »Objektivität« *ex cathedra*, die da verkündet wird! Die Dinge *existieren* laut Zeilinger (und einer großen Anzahl einflussreicher Physiker) nicht, bis sie per Messung ihre Zufälligkeit offenbaren.

Die CalTech-Resultate bereiten dieser Auslegung jetzt natürlich Probleme: Denn wann in diesem Experiment sollte die »Existenz« noch nicht da sein und wann plötzlich schon? Sätze wie »we cannot influence the specific value obtained through the measurement« (A. Zeilinger)⁴³ sind nun jedoch eindeutig widerlegt. Damit werden aber auch Aussagen wie die folgende in der *Neuen Züricher Zeitung* vom 30. Juni 1999 zu bloßen, tatsächlich unbegründeten Behauptungen: »Die Quantenphysik sagt, dass es für den Zeitpunkt des einzelnen [radioaktiven] Zerfalls keinerlei Grund gibt, nicht einmal einen verborgenen. Man [sic!] spricht hier von objektivem Zufall.« (Dass etwa die Bohmsche Interpretation der Quantentheorie sehr wohl einen potentiellen, »verborgenen« [»hidden variable«] Grund angeben kann, wird also nicht nur verschwiegen, sondern überhaupt kraft Objektivitätsrhetorik als Möglichkeit hinweggefegt. Um etwa in der Aussage in der *Neuen Züricher Zeitung* zu gipfeln:) »Dieser objektive Zufall ist wahrscheinlich eine der profundesten Entdeckungen der Naturwissenschaften [sic!] in unserem Jahrhundert [sic!].«⁴⁴

Neuerdings wurde der vermeintliche »objektive Zufall« der Quantentheorie von Zeilingers Gruppe bei kryptographischen Verfahren zur Anwendung gebracht und damit eine »abhörsichere« Bank-Überweisung getätigt. Es ist allerdings fragwürdig, ob diese »Objektivität« (und damit die Abhörsicherheit) Bestand haben wird. Denn sie gründet sich letztlich darauf, dass bis vor kurzem kein Weg zur Beeinflussung des »Zufalls« existierte. Die Arbeit der CalTech-Gruppe bringt hier aber erste fundamentale Zweifel auf. Letztlich könnte doch wieder bloß Ronald Laings berühmter Ausspruch übrig bleiben: »Nichts ist subjektiver als eine Objektivität, die gegen die eigene Subjektivität blind ist.«⁴⁵

Verrückt: Quantenphysik oder Quantenphysiker?

Es ist ein geradezu erstaunliches Phänomen (das hoffentlich bald wissenschaftshistorisch genauer untersucht werden wird), mit welcher Hartnäckigkeit seit Jahrzehnten ton-angebende Quantenphysiker von der »Verrücktheit« oder »Magie« der Quantenphänomene reden und dies mit Beispielen zu illustrieren versuchen, die allesamt in einer »Teilchensprache« vorgebracht werden.⁴⁶ So werden etwa Photonen (Lichtteilchen) selbst in Ein-Teilchen-Szenarios folgendermaßen dargestellt: *Ein Teilchen* würde von einer Quelle *zu mehreren, unterschiedlichen Zeitpunkten* emittiert und nur die über alle möglichen Emissions-Zeiten integrierte Gesamtheit liefere das korrekte und experimentell bestätigte quantenmechanische Resultat (womit sich

gleich einmal »Zeit als Illusion« herausstelle). Ganz ähnlich verhielte es sich nach der Kopenhagener Interpretation auch in räumlicher Hinsicht: Ein Teilchen würde alle möglichen Wege zwischen zwei Punkten im Raum durchheilen (im Beispiel des Doppelspalts heißt das etwa: *ein Photon geht gleichzeitig durch beide Spalte* – was natürlich wahrlich verwundern müsste!), und das korrekte quantenmechanische Resultat würde durch Überlagerung (Superposition) aller dieser Teilchen-Wege berechnet. Zu diesem und ähnlichen »Mysterien« (wie etwa, dass laut Feynman die Quantenmechanik *negative Wahrscheinlichkeiten* für Ereignisse vorhersage) hat sich allerdings schon John Bell ganz unmissverständlich geäußert:

Ist es angesichts der Kleinheit der Szintillation am Schirm nicht klar, dass wir es mit einem Teilchen zu tun haben? Und ist es angesichts von Beugungs- und Interferenzmustern nicht klar, dass die Bewegung des Teilchens von einer Welle gelenkt wird? De Broglie hat im Detail gezeigt, wie die Bewegung eines Teilchens, das durch bloß eines von zwei Löchern hindurch geht, ... durch Wellen beeinflusst werden kann, die beide Löcher passieren. Und zwar so, dass das Teilchen nicht dorthin geht, wo die Wellen einander aufheben, sondern dorthin angezogen wird, wo sie zusammenwirken. Diese Idee erscheint mir so natürlich und einfach, das Welle-Teilchen-Dilemma auf eine derart klare und gewöhnliche Weise aufzulösen, dass es ein großes Mysterium für mich ist, dass sie so generell ignoriert wurde.

(Is it not clear from the smallness of the scintillation on the screen that we have to do with a particle? And is it not clear, from the diffraction and interference patterns, that the motion of the particle is directed by a wave? De Broglie showed in detail how the motion of a particle, passing through just one of two holes ... could be influenced by waves propagating through both holes. And so influenced that the particle does not go where the waves cancel out, but is attracted to where they cooperate. This idea seems to me so natural and simple, to resolve the wave-particle dilemma in such a clear and ordinary way, that it is a great mystery to me that it was so generally ignored.)⁴⁷

In dem bereits erwähnten populären Aufsatz von Michael Brooks mit dem Titel »Kurioser und kurioser«⁴⁸ wird zwar einerseits auch wieder das »Quanten-Mysterium« via Berufung auf das Teilchen-Bild evoziert, doch in einem erläuternden »Kasten« mit der gleichfalls bezeichnenden Überschrift »Paradox lost« wird die experimentelle Realisierung eines von Lucien Hardy vorgeschlagenen Experiments besprochen, das gleichfalls zu »verrückten« Resultaten führe. Der Leiter des Experiments, Klaus Mølmer von der Universität Aarhus (Dänemark), sieht aber offenbar keinerlei Mysterium:

Es ist gar nicht so verrückt, insistiert er. Die Quantentheorie erlaubt es, die Teilchen auch als Wellen zu betrachten, und das Experiment reflektiert ganz einfach die destruktive Interferenz dieser Wellen. Trotzdem denkt er, dass das eine hervorragende Auflösung ist. Bei einer physikalischen Realisierung des Hardy-Paradoxons würde man erwarten, dass die Hölle losgeht und alles unsinnig wird. Aber dem ist nicht so.

(It's not that weird, though, he insists. Quantum theory allows the particles to be considered also as waves, and the experiment simply reflects the destructive interference of those waves. Nevertheless, he believes it is a brilliant resolution. In a physical realisation of the Hardy paradox, you would expect all hell to break loose and everything to become nonsensical. But it doesn't.)⁴⁹

Vielleicht sollten sich die Quantenphysiker doch nicht vorschnell auf das reine Teilchenbild beschränken? Im dritten Teil dieses Artikels möchte ich nun unter Hinweis auf meine eigenen Arbeiten darlegen, dass sich die Quantenmechanik tatsächlich als auf »klare und gewöhnliche Weise« *verstehbare* Beschreibung von Naturvorgängen herausstellen könnte.

III. Verständliche Quantenphysik: Wellen *und* Teilchen

Eine wesentliche Schlussfolgerung aus den ersten beiden Kapiteln dieses Artikels liegt in der Ablehnung jeglichen radikalen Reduktionismus, der das mikrophysikalische Geschehen ausschließlich auf die Dynamik von Teilchen zu beschränken trachtet. Vielmehr zeigt sich, dass – zumindest, sofern die Ebene der heute bekannten Quantenphänomene betroffen ist – die Natur derart gestaltet zu sein scheint, dass eine vollständige und verstehbare Beschreibung von Quantenprozessen nur durch die Kombination der Physik von Teilchen und Wellen in einem Modellierungsrahmen erfolgen kann. Da seit vielen Jahren bekannt ist, dass das so genannte »Vakuum« tatsächlich nicht »leer« ist, sondern eine Art von »Medium« repräsentiert, in dem sich »Teilchen« bewegen, ist es nur natürlich, sich den Quantenphänomenen zuallererst unter dieser Prämisse zu nähern.

Wie von Edward Nelson gezeigt wurde,⁵⁰ kann die gemäß der Schrödinger-Gleichung erfolgende Bewegung auf eine Art von *Brownscher Bewegung* auf einem hypothetischen Subquanten-Niveau reduziert werden, wobei Teilchen Kollisionen im Rahmen von Diffusionsprozessen unterliegen. Eines der Probleme mit der Nelsonschen Theorie liegt aber darin, dass sie – zumindest in ihrer ursprünglichen Form – keine geeignete Erklärung für die quantenmechanische Nichtlokalität liefern kann.⁵¹ Dies mag wiederum damit zu tun haben, dass auch Nelson bloß *ein* »fundamenta-

les« Niveau annimmt, nämlich das der Teilchendynamik. Bedenkt man aber, dass die klassische Brownsche Bewegung gerade die *Bewegung von Teilchen in einem Medium* beschreibt, so wäre es doch nur logisch, besagte Dynamik auf Subquanten-Niveau so anzunehmen, dass eine Beschreibung sowohl von Teilchen, als auch von Wellen notwendig ist, wobei die Wellen von den Teilchen ausgingen (ähnlich wie die kreisförmigen Wellen auf glatter Wasseroberfläche, die von einem hineingeworfenen Stein herrühren), d. h. von einer »wackeligen« Bewegung der Teilchen im Medium herrührten.

Tatsächlich konnte ich im Rahmen eines derartigen Modellierungs-Programms in einer Reihe von Publikationen nachweisen, dass sich die Essenz der Quantentheorie (Schrödinger-Gleichung, Heisenbergsche Unschärferelation, Superpositionsprinzip und Bornsche Regel für die Wahrscheinlichkeits-Amplituden) aus der klassischen Physik herleiten lässt – freilich unter einer neuen Perspektive auch der letzteren.⁵²

In meinem Ansatz sind sowohl die Teilchen-Positionen, als auch die Wellenkonfigurationen »verborgene (oder besser, mit Bell: unkontrollierbare) Variable«, die durch eine Subquanten-Dynamik zu beschreiben sind. Dies bedeutet unter anderem, dass der Schrödingerschen Wellenfunktion Ψ keine realistische Ontologie zugeschrieben werden braucht (wie Schrödinger selbst noch vermutet hatte), sondern Bedeutung nur dadurch zukommt, dass sie (wie in der orthodoxen, Kopenhagener Sichtweise) die Gesamtheit unseres Wissens über den Quantenzustand repräsentiert. In diesem Sinn bleibt auch die deBroglie-Bohm-Interpretation gewissermaßen »auf halbem Weg« stehen, da in ihrem Rahmen der Wellenfunktion noch immer Fundamentalcharakter zukommt und die Dynamik der »verborgenen Variablen« durch Funktionen von ihr determiniert sind.

Nur der Nelsonsche Ansatz, und nunmehr auch meiner, versucht eine *Begründung* der Ψ -Funktion und der ihre zeitliche Dynamik beschreibenden Schrödinger-Gleichung, wobei in meinen Arbeiten nun besonderes Augenmerk auf die nichtlokalen Merkmale der Theorie gelegt wird. Letzteres wird aber gerade dadurch möglich, dass den Wellenphänomenen der gleiche Status wie dem von Teilchen zugeschrieben wird. Das heißt konkret, dass die Ebene der Quantenmechanik (im Unterschied zur klassischen Physik) durch die Bewegung von Teilchen zu charakterisieren ist, die *Fluktuationen* unterworfen sind, wobei diese entweder a) von Teilchen-Teilchen-Kollisionen auf Subquanten-Niveau oder b) von Wellenfronten herrühren können, die durch die (das umgebende Medium beeinflussenden) Wellenkonfigurationen bestimmt sind.⁵³ Es kann gezeigt werden, dass letztere durch den gesamten experimentellen Versuchs-Aufbau mitbestimmt sind und somit letztlich von nichtlokalem Charakter sein können. Auch im Rahmen der klassischen Physik wären dann im Prinzip Teilchen vorstellbar, von denen Wellen ausgehen, doch in

diesem Fall werden – wie in einer Zoom-Bewegung weg vom Beobachtungsgegenstand – die Fluktuationen relativ gesehen so klein, dass sie letztlich unbeobachtbar sind. Der stochastische Teilchenweg erscheint dann als »geglättet« und die Wellen gehen »praktisch« exakt zentrisch-symmetrisch vom Teilchen-Ort aus (Abb. 3). Dies bedeutet aber, dass letztere keinen Impuls des Teilchens »wegtragen« – ganz im Unterschied zur »näheren Betrachtung« auf Quantenniveau, wo gerade dies passiert und durch die so verursachten Fluktuationen bzw. Änderungen des Teilchen-Impulses nunmehr nachweislich die Quantenphänomene erzeugt werden.

Im folgenden möchte ich für mathematisch versiertere Leser/innen eine kurze Beschreibung versuchen, da durch sie erst die »feineren« Gedanken des Programms erkennbar werden. Auch soll hier auf geringfügig andere Weise argumentiert werden als in den genannten Publikationen, was dadurch ermöglicht wird, dass die Dinge unter verschiedensten Blickwinkeln betrachtet sich stets zum gleichen Gesamtbild zusammenfügen – was meines Erachtens sehr für die wesentlichen Elemente der Theorie spricht. Da sich in diesem Jahr das berühmte *annus mirabilis* von Albert Einstein zum hundertsten Male jährt, möchte ich mit zwei Gedanken beginnen, die sich in ganz entscheidender Weise auf Einsteins Arbeiten von 1905 beziehen. Da ist zunächst das Modell einer »Lichtuhr« zu erwähnen, mit der sich seine Überlegungen zur Speziellen Relativitätstheorie⁵⁴ einfach illustrieren lassen. Uns soll hier aber nur interessieren, dass diese – in einem sehr idealisierten Fall – aus zwei parallelen Spiegeln gedacht werden kann, zwischen denen ein Photon hin- und herläuft. Jedes Mal, wenn das Photon eine »Runde« abschließt, »tickt« die Lichtuhr. In anderen Worten erreicht diese Uhr mit ihrer inversen »Frequenz« eine unüberwindbare Grenze ihrer Messgenauigkeit: Die bestmögliche zeitliche Auflösung ist $\Delta t = 1/\Omega$, wobei die Lichtuhr – als so genannter »harmonischer Oszillator« – auf vollkommen äquivalente Weise auch durch einen Lichtleiter in der Form eines Rings mit Radius r repräsentiert werden kann. Die »Kreisfrequenz« ist dann durch $\Omega = c/r$ gegeben, wobei c die Geschwindigkeit des Lichts in der Lichtuhr darstellt.⁵⁵

Nun erinnern wir uns aber Einsteins anderer Arbeit aus dem Jahre 1905, nämlich jener zum »lichtelektrischen Effekt«, in der erstmals die fundamentale Relation postuliert wird, dass die Energie E eines Teilchens nur in diskreten »Klumpen« gemessen werden kann beziehungsweise »quantisiert« ist⁵⁶:

$$E = \hbar\omega, \quad (1.1)$$

wobei $\hbar = h/2\pi$, h das Plancksche Wirkungsquantum und ω die charakteristische Kreisfrequenz des Photons ist. Da nun aber die Oszillation des Photons als »harmonischer Oszillator« beschrieben werden kann, können wir auch das einzelne Photon selbst als »miniaturisierte Lichtuhr« beschreiben: Auch in diesem Falle haben wir es

mit einer unüberwindlichen Beschränkung der Zeit-Auflösung zu tun, die nunmehr durch die Kreisfrequenz des Photons selbst vorgegeben ist. In anderen Worten, die idealer Weise als »kontinuierlich« denkbare Zeit-Achse muss in *operationaler* Hinsicht derart diskretisiert werden, dass Abschnitte minimaler zeitlicher Auflösung δt vorliegen, sodass deren Inverses durch eine fixe, systemisch bedingte Größe gegeben ist, nämlich gerade die Kreisfrequenz: $\frac{1}{\delta t} \rightarrow \omega$

Dies wird in der folgenden Rechnung von Nutzen sein. Neben der in Gleichung (1.1) definierten Energie werden wir als zweite empirische Tatsache zu berücksichtigen haben, dass pro Freiheitsgrad ein zusätzlicher Energie-Beitrag hinzuzuzählen ist, die so genannte »Nullpunktsenergie«

$$\delta E = E_0 = \frac{\hbar\omega}{2} . \quad (1.2)$$

Sie repräsentiert Fluktuationen der Teilchen-Energie auf Grund der »unruhigen« Umgebung des (nur so genannten) »Vakuums«, weshalb man auch von Vakuum-Fluktuationen spricht. Sie wurde erstmals 1924 gemessen, also noch bevor die Quantentheorie im allgemeinen und die Schrödinger-Gleichung im besonderen ausformuliert waren.⁵⁷

Die Gleichungen (1.1) und (1.2) sind, gemeinsam mit der de Broglieschen zu (1.1) analogen Formulierung des Impulses, $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$ (mit der Wellenzahl \mathbf{k}), die einzigen empirischen beziehungsweise »fundamentalen« Relationen, die zur Herleitung der Schrödinger-Gleichung notwendig sind. Im folgenden Schritt wird nun, ausgehend von der Annahme eines Feldes von Vakuum-Fluktuationen, das das »Teilchen« umgibt, eine weitere nützliche Relation aus der klassischen statistischen Mechanik hergeleitet. Gehen wir von dem Ansatz aus, dass sich das Teilchen im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem es umgebenden Vakuum befinden kann, so lässt sich mit der herkömmlichen Definition der Entropie $S_e = k \ln P$ (wobei k die Boltzmannsche Konstante und P die »Wahrscheinlichkeits-Dichte« bezeichnen) in differentieller Notation schreiben:

$$d \ln P = \frac{dQ}{kT} = - \frac{d(\delta E)}{\delta E} , \quad (1.3)$$

wobei Q und T jeweils auf das Teilchen bezogenen Hitze-Austausch und die Umgebungs-Temperatur bezeichnen und δE ein »Energie-Bad« beschreibt, das wir jetzt mit dem thermischen Bad der Nullpunktsenergie identifizieren.

Mit der oben erläuterten Bedingung für die zeitliche Auflösung, die durch die inverse Kreisfrequenz vorgegeben ist, erhalten wir aus den Gleichungen (1.2) und (1.3), dass

$$P = P_0 e^{-\frac{d(\delta E)}{\delta E}} = P_0 e^{-\frac{2d(\delta E)}{\hbar\omega}} = P_0 e^{-\frac{2}{\hbar} d(\delta E) \delta t} . \quad (1.4)$$

Wählen wir (ohne Beschränkung der Allgemeinheit des Modells) $P_0 = 1$, so erhalten wir aus (1.4), dass

$$\frac{\partial}{\partial t} \ln P dt = -\frac{2}{\hbar} d(\delta E) dt. \quad (1.5)$$

Nun lässt sich die aus der klassischen Physik wohlbekannte Wirkungs-Funktion S einführen, aus der sich etwa die Energie durch die Formel $E = -\frac{\partial}{\partial t} S$ berechnen lässt.

Dann gilt aber auch für Energie-Fluktuationen, dass $\delta E = -\frac{\partial}{\partial t} \delta S$,

wobei für kurze zeitliche Abschnitte $\delta S = \text{konstant}$ anzunehmen ist (was trivialer Weise auch bedeutet, dass $\frac{\partial}{\partial t} d(\delta S) = 0$). Somit können wir Gleichung (1.5) so umformen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \ln P dt = \frac{2}{\hbar} d(\delta S). \quad (1.6)$$

Dieses Resultat werden wir später gut gebrauchen können. Zunächst wollen wir aber eine andere, grundsätzliche physikalische Gegebenheit besprechen. Dabei handelt es sich um die so genannte »Kontinuitätsgleichung«, die das klassische Gesetz der Erhaltung eines (aufgrund der stochastischen Dynamik einzuführenden) »Wahrscheinlichkeits-Stroms« von Teilchen (in einem so genannten »Konfigurationsraum«) beschreibt. Mit der (normierten) Wahrscheinlichkeits-Dichte P besagt diese, dass die zeitliche Veränderung von P in einem bestimmten Raum-Volumen dem »Durchfluss« des Teilchenstroms (berechnet mittels »Nabla-Operator« ∇ , der den räumlichen Gradienten symbolisiert) mit Geschwindigkeit \mathbf{v} entsprechen muss:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{v}P). \quad (1.7)$$

Betrachten wir zunächst nur den stationären Fall von (1.7), d.h., wenn die linke Seite verschwindet, so erhalten wir

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{\nabla P}{P} \cdot \mathbf{v}. \quad (1.8)$$

Aus dieser Beziehung ist ersichtlich, dass der klassische, so genannte »Hamiltonsche Fluss« (von inkompressiblen Flüssigkeiten), der durch eine verschwindende Divergenz von \mathbf{v} charakterisiert ist,

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1.9)$$

nur dann erreicht wird, wenn auch die rechte Seite von (1.8) verschwindet, d.h. wenn folgende zwei Vektoren orthogonal zueinander stehen:

$$\left(\frac{\nabla P}{P}\right) \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (1.10)$$

Mit Ausnahme des trivialen Falles, dass $\nabla P = 0$ kann also der Hamiltonsche Fluss durch eine Orthogonalität von zwei Geschwindigkeits-Vektoren charakterisiert werden, d.h. einerseits die herkömmliche Geschwindigkeit $\mathbf{v} = \nabla S/m$ (wobei m die Masse des Teilchens symbolisiert), und andererseits eine (bis auf eine noch zu bestimmende Konstante festgelegte) Geschwindigkeit

$$\frac{\nabla P}{P} = \text{const} \cdot \mathbf{u} = \text{const} \cdot \frac{\nabla(\delta S)}{m}. \quad (1.11)$$

Abb. 3 zeigt eine einfache Erklärung für die Existenz dieses neuen Geschwindigkeits-Vektors, die sich auf die physische (und nicht nur mathematische) Existenz von Huygens-Wellen bezieht: Gemäß dem *Huygensschen Prinzip* werden vom Teilchen permanent sphärische Oberflächen konstanter Wirkungsfunktion emittiert,

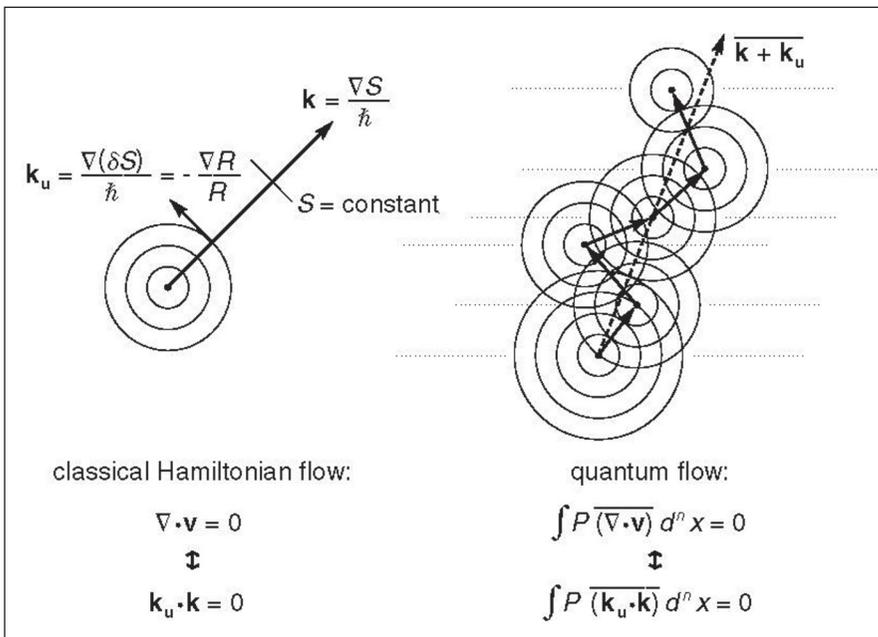


Abb. 3: Schematische Unterscheidung zwischen klassischem Hamiltonischen Fluss (links) und jenem von Quantensystemen (rechts), wobei die Kreise die Ausbreitung von sphärischen Huygens-Wellen symbolisieren. Die punktierten Linien der rechten Abbildung sind eine symbolische Andeutung des Umstands, dass die abgebildeten Wellen hier nur die lokale Umgebung erfassen, während generell von der Wirksamkeit eines nichtlokalen Wahrscheinlichkeitsfelds auszugehen ist, sodass die hier gezeigten Fluktuationen im Kontext der gesamten einbettenden Umgebung (üblicherweise bestimmt durch die Messapparatur) betrachtet werden müssen.

sodass ihre Bewegung als Schockwellen im »Medium« des »Vakuums« bzw. als propagierende Wellenfronten betrachtet werden können. Im klassischen Beispiel des Hamiltonschen Flusses ergibt sich dabei aufgrund der Orthogonalitätsrelation (1.10) keine Änderung, da die Wellen in sphärisch symmetrischer Weise emittiert werden und daher den Teilchen-Impuls bzw. seine Geschwindigkeit nicht beeinflussen. Wenn aber diese Huygens-Wellen Fluktuationen unterliegen oder durch benachbarte Wellen beeinflusst werden, wird auch der Teilchen-Impuls kleine Fluktuationen erfahren. Diese wären also zu ermitteln und dann in einer Formulierung der sonst gewöhnlich klassischen Bewegungsgesetze hinzuzufügen. Tatsächlich ist dies auch alles, was man zur Herleitung der Quantentheorie aus der (durch die Annahme physikalischer Huygens-Wellen erweiterten) klassischen Physik benötigt!

Kehren wir nun zu Gleichung (1.7) zurück. Multiplikation mit dt und Division durch P ergibt

$$\frac{\partial}{\partial t} \ln P dt = - \left(\frac{\nabla P}{P} \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{v} \right) dt. \quad (1.12)$$

Da wir aber auch generell für jeden Freiheitsgrad i des letzten Terms von (1.12) unserer diskretisierten Zeiteinheit einsetzen können, sodass also der Betrag $|\nabla_i \cdot \mathbf{v}_i| \equiv \frac{1}{\delta t} = \omega$, und da wir weiter oben bereits die nützliche Relation (1.6) hergeleitet haben, können wir nun letztere zu einer Umformulierung der Gleichung (1.12) verwenden. Wir erhalten:

$$\mathbf{u} = \frac{\nabla(\delta S)}{m} = - \frac{\hbar \nabla P}{2m P}. \quad (1.13)$$

Dabei haben wir auf der rechten Seite zwei Größen verwendet, die die *fluktuierenden Beiträge des Impulses und der Energie* beschreiben – was zugleich als das wichtigste *physikalische* Resultat der hier präsentierten Überlegungen betrachtet werden mag:

$$\delta \mathbf{p} = \nabla(\delta S) = - \frac{\hbar \nabla P}{2 P}, \quad \delta E = \frac{\hbar}{2} (\nabla \cdot \mathbf{v}). \quad (1.14)$$

Aus Gleichung (1.14) folgt, dass unsere neue, den Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik akzentuierende Geschwindigkeit exakt theoretisch *hergeleitet* werden kann (während sie z. B. bei Nelson in dieser Form nur *postuliert* wird):

$$\mathbf{u} = \frac{\nabla(\delta S)}{m} = - \frac{\hbar \nabla P}{2m P}. \quad (1.15)$$

Verwendet man (1.14) zur Definition der *durchschnittlichen Größen* (charakterisiert durch Balken) von Impuls und Energie, so erhält man zum Beispiel für den durch-

schnittlichen Impuls: $\overline{\mathbf{p}} = \overline{\nabla S + \delta \mathbf{p}}$. Bildet man nun weiters den integrierten Durchschnitt von Gleichung über die Fluktuationen und Positionen der Teilchen, so erhält man die Relationen (siehe Abb. 3 zur Illustration):

$$\int d^n x P (\overline{\nabla \cdot \mathbf{v}}) = 0 = - \int d^n x P \left(\frac{\overline{\nabla P}}{P} \cdot \mathbf{v} \right). \quad (1.16)$$

Gleichung (1.16) besagt, dass jetzt (nur) im statistischen Mittel die Geschwindigkeiten \mathbf{u} und \mathbf{v} zueinander orthogonal sind. (Abb. 3) Während die hinzukommende Energie-Fluktuation von (1.14) nach Durchschnitts-Bildung wegfällt, trifft dies auf die Anwendung der Impuls-Fluktuation nicht zu (da sie über die Definition der kinetischen Energie in einem quadratischen Term auftritt und sich somit positive und negative Beiträge nicht im Mittel gegenseitig aufheben).

Nun können wir die Herleitung der Schrödinger-Gleichung in einfachen Schritten demonstrieren. Da gemäß klassischem Wellenverhalten die Wahrscheinlichkeitsdichte P durch das Quadrat der Wellenamplitude R gegeben ist, $P = R^2$, können wir von folgendem Szenario ausgehen: Ein »Teilchen« sei in einem »flüssigen Medium«, dem »nicht leeren Vakuum«, suspendiert und emittiere durch seine oszillierende Bewegung permanent Huygens-Wellen in seine Umgebung. Der Gesamt-Impuls des Teilchens $\mathbf{p}_{\text{tot}} = \hbar \mathbf{k}_{\text{tot}} = \mathbf{p} + \mathbf{p}_u$ ist dann durch die Gestalt der Welle bestimmt, d.h.

- durch den Gradienten der *Phase* Φ , $\mathbf{p} = \hbar \nabla \Phi$ und/oder
- durch den Gradienten der *Amplitude* R , $\mathbf{p}_u \propto \nabla R$, wobei $P = R^2$.

Aus (1.15) ergibt sich, dass $\mathbf{p}_u = -\hbar \nabla R/R$. Somit ist der Gesamtimpuls

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{\text{tot}} &= \hbar \mathbf{k}_{\text{tot}} = \mathbf{p} + \mathbf{p}_u, \\ \text{wobei } \mathbf{p} &= \hbar \mathbf{k} = \nabla S = \hbar \nabla \Phi \\ \text{und } \mathbf{p}_u &= \hbar \mathbf{k}_u = -\hbar \nabla R/R. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Da bei Durchschnittsbildung der Ausdruck $\overline{\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}_u}$ gemäß Gleichung (1.16) verschwindet, können wir als klassisches Wirkungs-Integral, dem Ausgangspunkt der Ermittlung von Bewegungsgleichungen, (mit externem Potential V) formulieren:

$$A = \int P \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\hbar^2 \overline{k_{\text{tot}}^2}}{2m} + V \right\} d^n x dt, \quad (1.18)$$

wobei

$$\overline{\hbar \mathbf{k}_{\text{tot}}} = \overline{\nabla (S + \delta S)} = \nabla S - \hbar \frac{\nabla R}{R} = \overline{\hbar \mathbf{k} + \hbar \mathbf{k}_u}. \quad (1.19)$$

Wir führen nun eine einfache mathematische »Um-Schreibung« ein, die sogenannte »Madelung-Transformation« (wobei der Stern für komplexe Konjugation steht),

$$\psi^{(*)} = R e^{(-) \frac{i}{\hbar} S}. \quad (1.20)$$

Somit ergibt sich

$$\frac{\nabla \psi}{\psi} = \frac{\nabla R}{R} + \frac{i}{\hbar} \nabla S, \text{ und } \left| \frac{\nabla \psi}{\psi} \right|^2 = \left(\frac{\nabla R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\nabla S}{\hbar} \right)^2, \quad (1.21)$$

und man erhält eine *neue Transformation zwischen den Formulierungen von klassischer Physik und orthodoxer Quantentheorie*: Das Quadrat des durchschnittlichen Gesamt-Impulses ist gegeben durch

$$\overline{p_{\text{tot}}^2} = \hbar^2 \left[\left(\frac{\nabla R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\nabla S}{\hbar} \right)^2 \right] = \hbar^2 \left| \frac{\nabla \psi}{\psi} \right|^2. \quad (1.22)$$

Daraus ergibt sich, mit $P = R^2 = |\psi|^2$ aus (1.20), dass (1.18) geschrieben werden kann als

$$A = \int L dt = \int d^n x dt \left[|\psi|^2 \left(\frac{\partial S}{\partial t} + V \right) + \frac{\hbar^2}{2m} |\nabla \psi|^2 \right]. \quad (1.23)$$

Mit der Identität

$$|\psi|^2 \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{i\hbar}{2} (\psi^* \dot{\psi} - \dot{\psi}^* \psi)$$

erhält man schließlich die wohlbekannte »Lagrange-Dichte«

$$L = -\frac{i\hbar}{2} (\psi^* \dot{\psi} - \dot{\psi}^* \psi) + \frac{\hbar^2}{2m} \nabla \psi \cdot \nabla \psi^* + V \psi^* \psi. \quad (1.24)$$

Wie durch den mathematischen Standard-Apparat der klassischen Physik vorgegeben, folgt daraus (über die so genannten Euler-Lagrange-Gleichungen) die *Schrödinger-Gleichung*:⁵⁸

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi \quad (1.25)$$

Die Ψ -Funktion scheint hier nicht als operationale physikalische Größe auf, sondern als bloße *kompakte Notation*, die – gemäß (1.21) – die Impuls-Komponenten von Wellen und Teilchen in *einer* komplex-wertigen Größe zusammenfasst. Die Schrödinger-Gleichung selbst beschreibt die zeitliche Dynamik dieses in einen speziellen formalen Rahmen kompaktifizierten »Wellen-Teilchen-Systems«.

Somit ist ersichtlich, dass die Quantentheorie durchaus einem rationalen und nicht-subjektivistischen Verständnis zugänglich gemacht werden kann.

Dank:

Mein besonderer Dank gilt Albert Müller, ohne dessen unermüdliche und freundliche Zurufe dieser Aufsatz nicht zustande gekommen wäre.

Anmerkungen

- 1 Fernand Braudel, *Histoire et Sciences Sociales. La Longue Durée*, in: *Annales* 13 (1958), 725-753.
- 2 Marc Bloch, *Apologie der Geschichte oder der Beruf des Historikers*, 2. Auflage, Stuttgart 1980, 47.
- 3 Ebd., 59 (Hervorhebung durch den Verfasser).
- 4 Vgl. Hayden White, *The modernist Event*, in: ders., *Figural Realism. Studies in the Mimesis Effect*, Baltimore 1999, 66-86.
- 5 Richard P. Feynman, *Simulating Physics with Computers*, in: *International Journal of Theoretical Physics* 21, (1982), 6/7, 467-488.
- 6 Siehe zum Beispiel Stephen Wolfram, *A New Kind of Science*, Champaign 2002.
- 7 Claus Pias, Hg., *Cybernetics – Kybernetik. The Macy Conferences 1946-1953*, Bd. 1, Zürich u. Berlin 2003, 346.
- 8 Ebd., 158 f.
- 9 Ebd., 31.
- 10 Ebd., 187.
- 11 Ebd., 186.
- 12 Zur Komplexität des Themenbereiches, der auch Übergangsformen zwischen den »reinen« Formen von digital und analog inkludiert, siehe Jens Schröter u. Alexander Böhnke, Hg., *Analog/Digital – Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung*, Bielefeld 2004.
- 13 Siehe zum Beispiel Hans-Christian von Bayer, *In the Beginning was the Bit*, in: *New Scientist* 2278 (17.2.2001) 15, oder Anton Zeilinger, *A Foundational Principle for Quantum Mechanics*, in: *Foundations of Physics* 29 (1999), 631.
- 14 Ein anderes Beispiel kann durch das auf Grund von Kälteeinwirkung zu einem Festkörper kondensierte Wasser illustriert werden, das wir dann Eis nennen. Wie in jedem kristallinen Festkörper ordnen sich auch im Wasser-Eis die Atome in regelmäßigen Reihen aneinander. Dadurch erreichen sie die Starrheit, die wir üblicherweise mit Festkörpern assoziieren. Auch hierbei handelt es sich um eine emergente Eigenschaft. Ein Atom kann nicht starr sein, und auch nicht einige tausend, sondern nur eine thermodynamisch gesehen große Anzahl von Atomen.
- 15 Robert B. Laughlin, *Nobel Lecture: Fractional Quantization*, in: *Reviews of Modern Physics* 71 (1999) 863-874; siehe auch <http://nobelprize.org/physics/laureates/1998/laughlin-lecture.html>.
- 16 Ebd.
- 17 Ebd.

- 18 ... zu denen irrtümlicher Weise anfangs auch die fraktionellen Quantenzahlen gerechnet wurden, d.h., bevor sie in einer Theorie der Selbstorganisation erklärt wurden.
- 19 Ebd.
- 20 Richard P. Feynman, Q. E. D.: The Strange Theory of Light and Matter, New York 1990.
- 21 Ebd.
- 22 Wiss-Verständnis: Eine Wortprägung von David Müller, im Alter von vier oder fünf Jahren (hier: 1992/93), einem Alter also, in dem Kinder noch spontan dazu in der Lage sind, mit Sprache kreativ umzugehen. Diese terminologische Schöpfung war polysemisch angelegt: Subsumiert waren Miss-Verständnisse sowohl aus mangelndem Wissen als auch (Schein-)Miss-Verständnisse trotz besserem Wissen.
- 23 Albert Einstein, Boris Podolsky u. Nathan Rosen, Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, in: Physical Review 47 (1935) 777-780.
- 24 David Bohm, A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ›Hidden‹ Variables, in: Physical Review 85 (1952), 166-179 und 180-193. Einen aktuelleren Überblick bietet Peter Holland, The Quantum Theory of Motion, Cambridge 1995.
- 25 Vgl. Gerhard Grössing, Quantenphysik und Irrationalität, in »Der Standard« vom 19.3.1999, im Internet unter <http://www.mip.at/de/werke/329.html>, oder etwa einen Aufsatz von Mara Beller, The Sokal Hoax: At whom are we laughing?, in: Physics Today 51/9, 1998, 29-34, der ins Deutsche übersetzt in der »Zeit« 14 (1999) als Diskussionsbeitrag zu den »Science Wars« erschien, mit dem Hinweis, dass es oft mystisch/kryptische Aussagen von Quantenphysikern waren/sind, die von »postmodernen« Rezipienten aufgenommen und weiterverbreitet werden; siehe: <http://www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech/BohmHome/sokalhoax.html>.
- 26 Als Dokumentation von Bohms tragischem Forscher-Dasein siehe F. David Peat, Infinite Potential. The Life and Times of David Bohm, New York 1997. Ausführliches historisches Material, das die Hegemonieansprüche der »Kopenhagener« und die Unterdrückung der dBBi dokumentiert, findet sich in Mara Beller, Quantum Dialogue, Chicago 1999, und in James T. Cushing, Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony, Chicago 1994.
- 27 Die weitgehende Ignoranz der »scientific community« gegenüber Bohm und der dBBi bildet sogar das Ausgangsmaterial für einen Roman von Rebecca Goldstein, Properties of Light. A Novel of Love, Betrayal and Quantum Physics, New York 2000 (rezensiert in New York Times Book Review vom 17. 9. 2000).
- 28 Peter Weinzierl, Leserbrief, in: Spektrum der Wissenschaft, Juni 1995.
- 29 Ebd.
- 30 David Deutsch, Artur Ekert u. Rossella Lupacchini, Machines, Logic and Quantum Physics, in: The Bulletin of Symbolic Logic 6 (2000), 265-283, im Internet unter: <http://arxiv.org/abs/math.HO/9911150> (meine Hervorhebung).
- 31 Daniel Kleppner u. Roman Jackiw, One Hundred Years of Quantum Physics, in: Science 298 (2000) 893-898; im Internet unter: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0008092>.
- 32 Der Tagungsband wurde veröffentlicht von Reinhold A. Bertlmann and Anton Zeilinger (editors): Quantum (Un)speakables. From Bell to Quantum Information, New York 2002.
- 33 John Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, Cambridge 1987.
- 34 Max Tegmark u. John A. Wheeler, One Hundred Years of the Quantum, in: Scientific American 248 (2001), 68-75. Die originale (von den Autoren »director's cut« genannte) Version des Artikels findet man im Internet unter <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>. Auch hier ist interessant, dass die aufmerksame Redaktion der deutschsprachigen Ausgabe (»Spektrum der Wissenschaft«) die betreffende Textpassage entfernt hat!
- 35 Dies ist schon einmal eine eklatante Fehldarstellung. Zunächst ist es nicht die Quanten-Zufälligkeit, die im Zentrum des Interesses der dBBi steht. Vor allem aber liegt die Essenz der dBBi in der *Kontextualität* der Prozesse auf Quanten-Niveau, die den gesamten Messapparat inkludiert, sodass ein Suchen »innerhalb von Teilchen« das genaue Gegenteil von dem ist, was den Ansatz der dBBi ausmacht. Diese im Grunde wider besseres Wissen gemachte Unterstellung ist aber nicht neu, sondern schon bei Feynman in seinen berühmten Feynman Lectures of Physics, Bd. III, 1-14, nachzulesen!
- 36 Ebd.
- 37 Amir D. Aczel, Entanglement, New York 2003.

- 38 In »weak measurements« wird der Detektor so schwach an das Experiment gekoppelt, dass jede Messung den »Zeiger« des Detektors weniger bewegt als durch die Unschärferelation maximal erlaubt wäre. Umgekehrt hat der Detektor wiederum einen nicht wahrnehmbaren Einfluss auf das Experiment. Laut nunmehr bestätigter Theorie bleiben durch diesen gesamten Vorgang alle bestehenden Superpositionen von Zuständen erhalten. Siehe z. B. Michael Brooks, Curiouser and curiouser, in: *New Scientist* 178, 2394 (2003) 28, im Internet unter: <http://artilect.org/altman/measurement.html>.
- 39 JM. Geremia, John K. Stockton und Hideo Mabuchi, Real-Time Quantum Feedback Control of Atomic Spin-Squeezing, in: *Science* 304 (9.4.2004) 270-274.
- 40 Zitat aus der »populären« Darstellung des Experiments bei Eric J. Lerner, Quantum Measurement, in: *The Industrial Physicist*, August/September 2004, 10-11, identisch mit der Version im Internet auf der vom American Institute of Physics (AIP) herausgegebenen Webpage <http://www.tipmagazine.com/tip/INPHFA/vol-10/iss-4/p8.pdf>.
- 41 Anton Zeilinger, Jenseits jeder Gewißheit. Das Rätsel der Quantenwelt, in: Peter Weibel, Hg., *Jenseits von Kunst*, Wien 1997, 257-262.
- 42 Ebd.
- 43 Anton Zeilinger, »On the interpretation and philosophical foundation of quantum mechanics«, in: U. Ketvel et al., Hg., *Vastakohtien todellisuus*, Festschrift for K.V. Laurikainen, Helsinki 1996. Im Internet unter <http://www.quantum.univie.ac.at/zeilinger/philosop.html>.
- 44 Anton Zeilinger, Von Einstein zum Quantencomputer, in: *Neue Züricher Zeitung* (30.6.1999) 72.
- 45 Ronald D. Laing, *Die Stimme der Erfahrung*, Köln 1982.
- 46 Eines der zahlreichen Beispiele ist Richard Feynman, Q.E.D., wie Anm. 20.
- 47 Bell, *Speakable*, wie Anm. 33, 191.
- 48 Siehe Anm. 38.
- 49 Ebd.
- 50 Edward Nelson, Derivation of the Schrödinger Equation from Newtonian Mechanics, *Physical Review* 150 (1966) 1079; ders., *Quantum Fluctuations*, New Jersey 1985.
- 51 Siehe jedoch die neuere Arbeit von Lothar Fritsche u. Martin Haugk, A new look at the derivation of the Schrödinger equation from Newtonian mechanics, *Annalen der Physik* 12, 6 (2003) 371-403.
- 52 Gerhard Grössing, From classical Hamiltonian flow to quantum theory: derivation of the Schrödinger equation, in: *Foundations of Physics Letters* 17 (2004) 343-362, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0311109>; ders., Observing Quantum Systems, in: *Kybernetes* 34 (2005) 1/2, 222-240, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0404030>; ders., Classical Physics Revisited: Derivation and Explanation of the Quantum Mechanical Superposition Principle and Born's Rule (preprint, 2005) <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0410236>.
- 53 Eine entsprechende Zweiteilung wie auch weitere überraschende Übereinstimmungen fand ich erst jüngst bei James Baker-Jarvis u. Pavel Kabos, Modified de Broglie approach applied to the Schrödinger and Klein-Gordon equations, in: *Physical Review A* 68 (2003) 042110.
- 54 Albert Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, in: *Annalen der Physik* 17 (1905), 891-921.
- 55 In anderen Worten: Man kann zwar von einem hypothetischen, kontinuierlichen Vorgang ausgehen, der sich auf die Propagation des Photons bezieht, doch die operational relevante Größe entspricht einer Diskretisierung der Zeit in nicht weiter auflösbare, minimale Zeitschritte der Länge Δt .
- 56 Albert Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, in: *Annalen der Physik* 17 (1905), 132-148.
- 57 Robert S. Mulliken, The band spectrum of boron monoxide, in: *Nature* 114 (1924), 349-350.
- 58 Man beachte, dass hier die Schrödinger-Gleichung direkt aus einer klassischen Lagrange-Funktion hergeleitet wurde und nicht über den »Umweg« einer modifizierten Hamilton-Jacobi-Gleichung, wie in der Theorie von de Broglie und Bohm.