Möglichkeit und Form

Der Begriff des Phänomens bei Aristoteles und bei Bohr

Beim Versuch, einen begrifflichen Rahmen für Quantenphänomene und ihre Theorie zu erarbeiten, wurden im 20. Jahrhundert einige Gedanken der Altgriechischen Naturphilosophie und Erkenntnistheorie wiederbelebt, die bis dahin in der neuzeitlichen Naturwissenschaft nur wenig Beachtung gefunden hatten. Darauf haben Heisenberg[1] und Bohr[2] vielfach hingewiesen. Der für Bohr so zentrale Begriff des *Unteilbaren Quantenphänomens* hat *auch* Wurzeln in der Ursachenlehre des Aristoteles[3]. Wir betonen das Wort „auch“, denn wir werden sehen, dass Bohrs Auffassung keineswegs nahtlos an Aristoteles anschließt.

Die Vielfalt der Ideen, die von den Altgriechischen Naturphilosophen über Wesen und Urgrund der Welt und ihrer Erscheinungen entwickelt wurde, ist bemerkenswert, aber nicht überraschend. Denn erstens formulierten diese Forscher ihre Theorien nicht mathematisch (was manche Inkonsistenzen schnell aufgedeckt und den Elan der Philosophen gedämpft hätte), sondern in normaler Alltagssprache mit ihren mehr oder weniger dehnbaren Begriffen. Und zweitens war das Beobachtungsmaterial, mit dem natürlich jede ernstzunehmende Theorie im Einklang stehen muss[4], ziemlich dürftig und ungenau. Daraus ergab sich ein Freiraum, der mit Spe-

[1] Werner Karl Heisenberg, 1901 - 1976, Physiker
[2] Niels Henrik David Bohr, 1885 - 1962, Physiker
[3] Aristoteles, 384 - 322, Philosoph und Naturforscher
[4] Die Anerkennung experimenteller Tatsachen ist zwar unter Naturwissenschaftlern selbstverständlicher Konsens, keineswegs jedoch unter Philosophen. Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770 - 1831) war genau gegenteiliger Ansicht. Wenn es Widersprüche zwischen seinen Ideen und der von der beobachtenden Naturforschung entdeckten Realität gebe (und die gab es in überreichem Maße!), dann sei das „um so schlimmer für die Realität“.

kulationen von erstaunlichem Einfallsreichtum und eindrucksvoller Schönheit gefüllt wurde. In einem Zeitraum von etwa drei Jahrhunderten entstand eine wilde Vielzahl von Gedankengebäuden. Auf eines davon, nämlich die Vorstellungswelt der Atomisten, wollen wir kurz eingehen, bevor wir uns Aristoteles zuwenden. Denn die Weltanschauung des Aristoteles entstand nicht zuletzt in bewusster Abgrenzung gegen die Atomisten.

Die Atomisten vermuteten, dass alle Dinge aus kleinsten, unteilbaren Bestandteilen, die sie Atome[5] nannten, zusammengesetzt seien. Die wichtigsten Vertreter dieser Denkrichtung waren Leukipp und Demokrit[6]. Ihre Vorstellung von den Atomen lässt sich in genau vier Punkten zusammenfassen:

1. Atome sind offenbar so klein, dass man sie nicht sehen kann. Sie sind aber keineswegs unendlich klein.

2. Obwohl die Atome eine endliche Größe haben, ist es unmöglich, sie zu teilen.

3. Es gibt Atome in den vielfältigsten Formen: rund, eckig, hakenförmig, glatt, rauh, ... Die Form ist das einzige Merkmal, durch das sich Atome voneinander unterscheiden.

4. Es ist keine äußere Kraft erforderlich, um die Atome in

[5] Das griechische Wort „atom“ bedeutet „unteilbar“.

[6] Leukipp war vermutlich wenig älter als Demokrit (etwa 460 - etwa 370). Beide lebten in der Stadt Abdera in Thrakien. Demokrit war Schüler des Leukipp. Schon im Altertum wurden die Schriften beider Philosophen gemeinsam unter Demokrits Namen verbreitet. Das war damals nicht ungewöhnlich, macht es aber schwierig bis unmöglich herauszufinden, welche Ideen von wem stammen. Offenbar hielten Leukipp und Demokrit das auch für unwichtig, die Verbreitung ihrer Gedanken erschien ihnen wichtiger als der persönliche Nachruhm. Informationen zum Leben der beiden Philosophen, und vor allem eine lesenswerte Auswahl der überlieferten Fragmente ihrer Schriften, findet man in [1, Kapitel 9 und 12]

> Bewegung zu versetzen. Vielmehr liegt es in der Natur der Atome selbst, sich zu bewegen, wenn sie nicht zeitweilig durch Verhakung mit anderen Atomen an der Bewegung gehindert oder im Inneren eines Klumpens von Atomen eingeklemmt sind.

Durch Aneinanderlagerung und Verhakung der Atome entstanden die makroskopischen Substanzen. Deren Eigenschaften, wie Farbe, Geschmack, Härte und so weiter, wurden durch die Formen der konstituierenden Atome, die relative Anordnung von Atomen unterschiedlicher Form, und durch die Porosität der makroskopischen Gebilde bestimmt.

Mit dem Stichwort Porosität haben wir bereits angedeutet, was neben den Atomen das zweite Standbein des atomistischen Weltbildes war: Der leere Raum. Wenn man eine Dose randvoll mit Kieselsteinen füllt und den Deckel zuklemmt, dann kann man sie schütteln und drehen wie man will: Die Kiesel werden sich nicht bewegen und immer ihre Lage beibehalten. Dagegen sollten Entstehen und Vergehen aller makroskopischen Erscheinungen durch die Aneinanderlagerung und Trennung von Atomen bewirkt werden, und das war nur vorstellbar wenn die Atome hinreichende Bewegungsfreiheit hatten. Die Vorstellungswelt der Atomisten steht und fällt also mit dem Leeren Raum. Das war ihnen auch bewusst. Sie lehrten, dass die wirklich realen Bestandteile der Welt der Leere Raum und die Atome seien, alles andere sei nur menschliche Einbildung. Wenn die Atomisten „alles“ sagten, dann war das ernst gemeint. Nicht nur Steine, Salatköpfe, und Weingläser, sondern auch Menschen, und auch die Gedanken der Menschen, und – wenn es denn so etwas geben sollte – die Seelen der Menschen, entstanden durch Aneinanderlagerungen von Atomen, und sie verschwanden unwiderruflich aus der Welt, sobald die Atome auseinander drifteten, und durch ihre erneute Aneinanderlagerung wieder andere

Dinge entstanden.

Wir sind heutzutage durch die Chemie daran gewöhnt, uns die Entstehung und Veränderung von Substanzen als unterschiedliche Kombinationen der immer gleichen Atome vorzustellen (wobei sich unser Atombegriff freilich fundamental von den Kieselstein-Atomen der Alten Griechen unterscheidet). Deshalb sind wir leicht bereit, neben manchen Absonderlichkeiten doch auch plausible und sogar bemerkenswert hellsichtige Gedanken in den Vorstellungen der Atomisten zu entdecken. Aber aus Sicht des Altertums, also auch aus Sicht des Aristoteles, sah der Sachverhalt wesentlich anders aus. Für die Existenz der Atome, die am Anfang des atomistischen Weltbildes standen, gab es nicht den Hauch eines Beweises. Darüber hinaus hatten die Atome ziemlich unglaubwürdige Eigenschaften. Insbesondere die Lehre von ihrem eingebauten Bewegungsdrang wurde von Aristoteles heftig kritisiert. Aus der sorgfältigen Beobachtung der Natur wusste man zu seiner Zeit, dass jede Bewegung über kurz oder lang zum Stillstand kam, falls sie nicht von einer äußeren Kraft unterstützt wurde.[7] Und schließlich der Leere Raum: Ebenfalls noch niemals beobachtet, hatten ihn die Atomisten wie ein Kaninchen aus dem Ärmel gezogen, um ihre Lehre von den Atomen vor inneren Widersprüchen zu retten.

Aus Sicht des Aristoteles stellte sich der Atomismus als eine Kombination hochgradig spekulativer Gedanken dar, denen durchwegs die Verankerung in der Beobachtung fehlte. Es störte Aristoteles nicht so sehr, dass da phantasievoll spekuliert wurde. Das war zu seiner Zeit unter Naturforschern völlig normal. Sondern es störte ihn, dass die Spekulation bei den Atomisten gleich am Anfang aller Überlegungen stand, dass sie sich nicht lange mit dem aufhielten, was offen zutage lag, sondern sofort hochgradig abstrakte Theorien aufstellten, und allenfalls im zweiten Schritt, sozusagen durch

[7] Die Bewegung der Planeten als ein Gegenbeispiel heranzuziehen, konnte zu jener Zeit wohl niemandem in den Sinn kommen.

die Brille ihrer Theorie, einen voreingenommenen und mehr oder weniger flüchtigen Blick auf die Welt warfen. Aristoteles hielt es für unabdingbar, dass ganz am Anfang der Naturforschung die sorgfältige Beobachtung dessen stehen musste, was beobachtbar war, also dessen, was man sehen oder anfassen oder sonstwie sinnlich erfahren konnte. Ausgangspunkt jeder Untersuchung sollten die *Phänomene*[8] sein. Nur die genaue Kenntnis und umfassende Beschreibung der Phänomene konnte die solide Basis für Verallgemeinerungen und die Analyse größerer Zusammenhänge bilden, die dann schließlich in umfassende Theorien münden konnten.

Aristoteles beließ es nicht dabei, eine Vielzahl von Phänomenen zu erforschen und zu beschreiben. Sondern er versuchte auch, auf einem abstrakteren Niveau herauszufinden, was denn eigentlich das Wesen der Phänomene ausmacht. Dieser Teil seiner Untersuchungen wird als seine Ursachenlehre[9] bezeichnet. Das Wort Phänomen ist hierbei in einem sehr weiten Sinn gemeint. Ein Phänomen kann ein Gegenstand sein, aber auch ein Ereignis, oder eine Tätigkeit. Wir versuchen eine allgemeine Definition: Phänomene sind die kleinsten Bereiche der Welt, die sich in sinnvoller Weise von der Gesamtheit allen übrigen Seins und allen übrigen Geschehens in der Welt abgetrennt vorstellen lassen. Diese Definition ist nicht nur ziemlich geschraubt, sondern offenbar auch recht vage, insbesondere im Hinblick auf die Worte „in sinnvoller Weise“. Wir werden aber sehen, dass eine schärfere Abgrenzung garnicht möglich ist, wenn wir die Intention des Aristoteles nicht verfehlen wollen. Er meinte, dass für ein vollständiges Verständnis jedes Phänomens vier Aspekte

[8] Das griechische Wort „Phänomen“ bedeutet das „Erscheinende“ oder das „Sichtbare“.

[9] Das Wort „Ursache“ hat sich seit Jahrhunderten in deutschsprachigen Aristoteles-Übersetzungen eingebürgert. Unglücklicherweise, denn wir verwenden heutzutage das Wort „Ursache“ etwas anders. Wir werden bevorzugt von „Aspekten“, oder allenfalls noch von „Voraussetzungen“ sprechen, weil diese Worte die Aristotelische Verwendung des Begriffs besser treffen.

beachtet werden müssen. Warum gerade vier? Tiefenpsychologen werden uns antworten, dass Menschen seit jeher die Vier als die Zahl der Vollständigkeit und Harmonie empfinden. Es gibt vier Himmelsrichtungen, nicht drei oder fünf. Es gibt vier Tageszeiten, ebenso vier Jahreszeiten[10], und man unterschied im Altertum vier Elemente, nämlich Wasser, Erde, Luft, und Feuer. Welches sind nun nach Aristoteles die vier Aspekte der Phänomene?

Für den Aspekt, unter dem das Phänomen als sichtbarer und anfassbarer Gegenstand oder hartes Faktum erscheint, verwendet er die Bezeichnung *Form*[11]. Der zweite Aspekt ist die *Möglichkeit*[12], die er nicht als einen abstrakten Begriff betrachtet, sondern als etwas zwar nicht sicht- oder spürbares, aber doch durchaus physisch Vorhandenes, als Unterbau unserer realen Alltagswelt, ohne den die Form ein leeres Gespenst bliebe. Den dritten Aspekt nennen wir *Auswahl*[13]. Dieser Faktor wählt aus der Menge der Möglichkeiten eine zur Realisierung aus. Und schließlich muss ein vierter und letzter Faktor die ausgewählte Möglichkeit dann tatsächlich zu einem handfesten Faktum formen, diesen Faktor nennen wir *Realisierung*[14].

Leser, die nicht zum ersten mal von diesen Begriffen des Aristoteles hören, werden vielleicht überrascht sein, dass wir sie recht abstrakt interpretieren. Bei vielen Kommentatoren, und stellenweise sogar bei Aristoteles selbst, findet man viel handfestere Beispiele zur Erläuterung. Etwa einen Weinkrug: In diesem Fall bildet der ungeformte Ton die Möglichkeit, dass der Krug überhaupt entstehen kann. Die Auswahl ist der Wunsch und Entschluss des Töpfers,

[10] Karnevalisten kennen fünf. Dass ihnen diese Jahreseinteilung närrisch erscheint bestätigt abermals, dass Menschen vier Jahreszeiten als angemessen und vernünftig betrachten.

[11] in lateinischen Aristoteles-Übersetzungen als „causa formalis“ bezeichnet.

[12] in lateinischen Aristoteles-Übersetzungen als „causa materialis“ bezeichnet.

[13] in lateinischen Aristoteles-Übersetzungen als „causa finalis“ bezeichnet.

[14] in lateinischen Aristoteles-Übersetzungen als „causa efficiens“ bezeichnet.

aus dem Ton einen Krug herzustellen und nicht etwas anderes oder überhaupt nichts. Die Realisierung ist die geschickte Tätigkeit des Töpfers. Und die Form ist genau das, nämlich die Gefäß-Form des fertigen Kruges. Wenn diese Primitiv-Version den Gedanken des Aristoteles angemessen darstellte, dann wäre er offensichtlich für die Naturforschung des Neuzeit belanglos. Wenn der Phänomen-Begriff des Aristoteles in der modernen Physik irgendwie ernst genommen werden soll, dann ist das nur auf der abstrakteren Ebene möglich, auf der wir ihn vorgestellt haben und im Folgenden weiter betrachten werden. Ob dieses abstraktere Verständnis der Intention des Aristoteles selbst entspricht (wir vermuten es), oder ob dies eher eine neuzeitliche Uminterpretation seiner Worte ist, das ist für unseren Zweck eine nachrangige Frage. Denn wir wollen ja nicht Aristoteles-Forschung betreiben, sondern wir wollen herausfinden, ob seine Begriffsbildung (so wir wir sie verstehen) uns zu einem besseren Verständnis von Quantenphänomenen verhelfen kann. Und wir wollen sehen, inwieweit Bohr's Begriff des Quantenphänomens einen Rückgriff auf Aristoteles darstellt.

Die vier Aspekte der Aristotelischen Phänomene, die wir jetzt mit M = Möglichkeit, A = Auswahl, R = Realisierung, und F = Form abkürzen, bedingen sich gegenseitig, und können niemals allein auftreten. Man kann sie als zeitliche Abfolge M → A → R → F betrachten, aber das trifft den Sachverhalt noch nicht ganz. Denn die Form wirkt auch wieder auf die Möglichkeit zurück, aus der sie entstand, und sie eröffnet zugleich neue Möglichkeiten für weitere

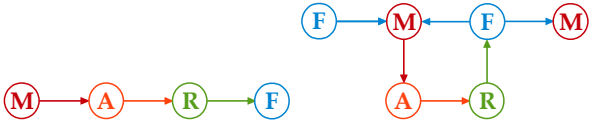

Abb. 1 : Aristotelische Phänomene

Phänomene. Das in Abbildung 1 links symbolisch dargestellte Phänomen hängt isoliert in der Luft. Man kommt der Intention des Aristoteles wohl mit dem rechts daneben abgebildeten Phänomen näher. Hier wird angedeutet, dass dieses Phänomen von der Form eines Nachbarphänomens beeinflusst wird, und auf die Möglichkeit eines anderen Nachbarphänomens einwirkt. Wenn wir diesen Gedanken konsequent weiter verfolgen, dann führt er uns zur Vision eines dicht gewebten Phänomen-Netzwerks, das Raum und Zeit erfüllt. Abbildung 2 ist ein Versuch, dies anzudeuten.

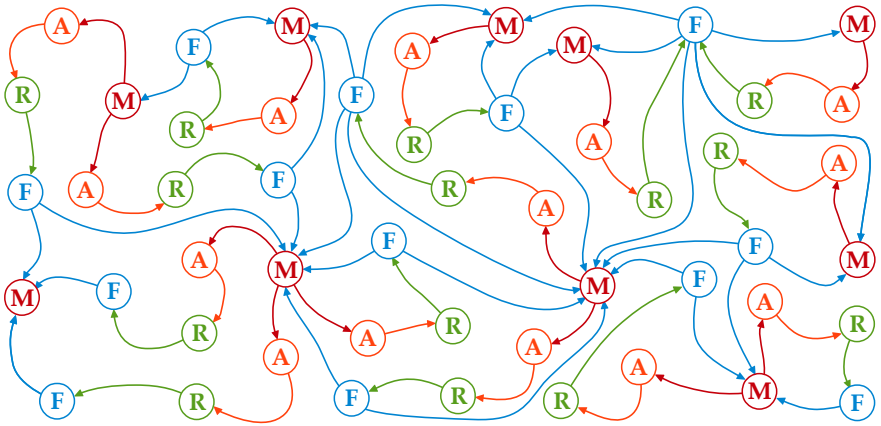

Abb. 2: Ein Netzwerk aus Aristotelischen Phänomenen

Die Vernetzung und wechselseitige Abhängigkeit der Phänomene erscheint Aristoteles nicht weniger wichtig als seine Lehre von den vier Aspekten jedes einzelnen Phänomens, und auch in dieser Hinsicht distanziert er sich nachdrücklich von den Atomisten. Denn wenn beispielsweise aus Atomen der Sorten T, S, und U einmal eine Gruppe TUUTST, und ein anderes mal die Gruppe USTTTU gebildet wird, dann mögen die makroskopisch daraus entstehenden Gebilde durchaus unterschiedliche Eigenschaften haben. Das ein-

zelne U oder S oder T-Atom bleibt aber in jedem Verbund völlig unverändert.

Das ist bei den Phänomenen des Aristoteles ganz anders: Die Möglichkeit eines jeden Phänomens ist von den Formen der Nachbarphänomene mehr oder weniger stark geprägt. Wenn man ein Phänomen aus dem Zusammenhang heraustrennt, dann wird sich die Möglichkeit dieses Phänomens dementsprechend verändern, und in der Folge auch seine anderen Aspekte. Im Hinblick darauf haben wir beim Versuch, den Begriff „Phänomen“ zu definieren, oben auf Seite 5 die Formulierung „in sinnvoller Weise ... abgetrennt“ verwendet. Denn natürlich kann niemand die ganze Welt auf einmal beschreiben und verstehen. Man muss unvermeidlicherweise irgendwo Trennlinien zwischen den Phänomenen ziehen und die Welt in fassbare Teile zerlegen, damit eine naturwissenschaftliche Untersuchung überhaupt möglich wird. Aber bei dieser Zerlegung in Einzelphänomene ist Fingerspitzengefühl und allergrößte Behutsamkeit erforderlich, wenn das Phänomen, das untersucht wird, nicht völlig entstellt werden soll. Und selbst wenn der Naturforscher mit angemessener Sorgfalt einzelne Phänomene oder Phänomen-Gruppen zwecks detaillierter Untersuchung aus dem Gesamtzusammenhang herauspräpariert, muss er sich im Klaren darüber sein, dass sein Untersuchungsobjekt jetzt nicht mehr vollständig identisch sein kann mit dem Phänomen, das urprünglich in den Gesamtzusammenhang eingewoben war.

Wenn die Atomisten, statt die Phänomene erst einmal in ihrer natürlichen Umgebung aufmerksam zu betrachten, sich sofort (wenn auch nur sinnbildlich) mit dem Seziermesser auf ihre Objekte stürzten und diese bis auf atomare Dimensionen zerstückelten, dann konnten sie nach Ansicht des Aristoteles selbstverständlich nicht erwarten, irgendwelche sinnvollen Erkenntnisse über die Natur zu gewinnen. Sie zerstörten ja schon im Ansatz ihrer Analyse die Zusammenhänge, die doch eigentlich das Wesen der Phänomene

ausmachten.

Was kann die moderne Physik nun von Aristoteles lernen, und was hat Bohr von ihm gelernt?

Die Kopenhagener Quantenphysiker kannten die Ursachenlehre des Aristoteles. Besonders Heisenberg hat vielfach darauf hingewiesen, dass zwischen der *δύναμις* [15] des Aristoteles und dem, was in der Quantentheorie durch den rätselhaften Zustandsvektor beschrieben wird, eine bemerkenswerte Ähnlichkeit feststellbar ist[16].

Jos Verhulst hat in seinem sehr schönen und lesenswerten Buch [3, besonders Teil III, Kapitel 4] versucht, die gesamte Quantenphysik in das Begriffsschema der Aristotelischen Ursachenlehre zu zwängen.[17] Es interessiert uns, wieweit man damit kommt, und ob

[15] sprich „Dünnamiss“, Betonung auf der ersten Silbe. Dies ist der griechische Begriff, den wir als „Möglichkeit“ übersetzt haben.

[16] Beispielsweise schreibt Heisenberg in [2], Seite 140: ... Damit war ein entscheidender Schritt von der klassischen Physik weg vollzogen, und im Grund war damit auf eine Begriffsbildung zurückgegriffen, die schon in der Philosophie des Aristoteles eine wichtige Rolle gespielt hatte. Man kann die Wahrscheinlichkeitswellen der Bohr-Kramers-Slaterschen Deutung als eine quantitative Fassung des Begriffs der *δύναμις*, der Möglichkeit, oder in der späteren lateinischen Fassung der „potentia“ in der Philosophie des Aristoteles interpretieren. Der Gedanke, daß das Geschehen selbst nicht zwangsläufig bestimmt sein, sondern daß die Möglichkeit oder „Tendenz“ zu einem Geschehen selbst eine Art von Wirklichkeit besitze, – eine gewisse Zwischenschicht von Wirklichkeit, die in der Mitte steht zwischen der massiven Wirklichkeit der Materie und der geistigen Wirklichkeit der Idee oder des Bildes –, dieser Gedanke spielt in der Philosophie des Aristoteles eine entscheidende Rolle. In der modernen Quantentheorie gewinnt er eine neue Gestalt, indem man eben diesen Begriff der Möglichkeit quantitativ als Wahrscheinlichkeit formuliert und ihn mathematisch faßbaren Naturgesetzen unterwirft. Die in der Sprache der Mathematik formulierten Naturgesetze bestimmen hier nicht mehr das Geschehen selbst, sondern die Möglichkeit zum Geschehen, die Wahrscheinlichkeit dafür, daß etwas geschieht.

[17] In seinem Überschwang will er dabei auch gleich Bohr und die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie für Aristoteles und die Anthroposophische

sich darin Bohrs Denken wiedererkennen lässt.

Zunächst nehmen wir also an, dass die Aristotelische Möglichkeit in der mathematisch formulierten Quantentheorie durch den Zustandsvektor repräsentiert wird. Dann liegt es nahe, denjenigen Aspekt der Welt, der mit den Methoden der Klassischen Physik angemessen beschrieben werden kann, als Form zu betrachten. Die Auswahl lässt sich problemlos mit dem Zufall identifizieren, der in der Quantentheorie darüber entscheidet, welches aus der Menge der möglichen Ergebnisse bei einer Messung tatsächlich auftritt.

Problematisch wird es bei der Realisierung. Aristoteles meint, sie könne zwar in den Bereich der Form hineinwirken (dadurch unterscheidet sie sich von der Auswahl), sei jedoch ebenso wie die Auswahl nicht rational erfassbar (dadurch unterscheidet sie sich von Form und Möglichkeit). Kann man die Messung, die den Übergang von Quantentheorie zur Klassischen Theorie vermittelt, als Aristotelische Realisierung deuten? Bei flüchtigem Hinhören scheint Jordans[18] bündiger Satz „Realität entsteht durch Messung“ in diese Richtung zu deuten. Tatsächlich hätte wohl aber weder Bohr noch irgend ein anderer der Begründer der Kopenhagener Deutung der Quantentheorie (noch Jordan) dieser Identifikation zugestimmt.

Die Bedeutung des Messprozesses in der Kopenhagener Deutung wird klarer, wenn wir zunächst zwei andere – von der Kopenhagener Sicht abweichende – Betrachtungsweisen des Messprozesses erwähnen: Der seit 1970 lebhaft diskutierte Vorgang der Dekohärenz [4] von Quantenzuständen kann den Messprozess nicht ersetzen. Denn wenn man das Messgerät quantentheoretisch beschreibt, dann entsteht aus dem interferenzfähigen verschränkten Zustand von Quantenobjekt und Messgerät durch Dekohärenz eine nicht mehr interferenzfähige Mischung von Zuständen des Quantenobjekts und

Weltanschauung vereinnahmen. Darin folgen wir ihm nicht, aus Gründen die im folgenden Text erläutert werden.

[18] Pascual Jordan (1902 - 1980), Physiker

des Messgeräts, jedoch kein eindeutiger Messwert. Schrödinger erfand seine berühmt-berüchtigte Katze, um auf diese von niemandem bestrittene Tatsache hinzuweisen. Solange man an der quantentheoretischen Beschreibung festhält, befindet sich in Schrödingers Höllenmaschine eine Katze, die mit endlicher Wahrscheinlichkeit tot ist und mit endlicher Wahrscheinlichkeit lebt. Der Mechanismus der Dekohärenz kann daran nichts ändern, wohl aber der Kollaps der Wellenfunktion, den v. Neumann[19] 1932 erfand [5]. Allerdings konnte er keinerlei Begründung dafür angeben, wann und warum ein derartiger Kollaps in manchen Situationen stattfinden sollte, in anderen aber nicht.

Die Idee vom Kollaps der Wellenfunktion haben die Kopenhagener Quantenphysiker nie übernommen, weil damit nach ihrem Verständnis das Pferd vom Schwanz aufgezäumt wurde. Aufgabe der Physik ist nach Bohr's Überzeugung nicht, herauszufinden wie oder was die Welt „an sich“ ist, sondern was wir über die Welt sagen können. Damit wir über die Welt – oder, bescheidener gesagt, über ein Phänomen – etwas sagen können, muss es zuallererst einmal zu unserer Kenntnis gelangen. Alles was zu unserer Kenntnis gelangt, wird durch die Klassische Physik angemessen und korrekt beschrieben: Die Zeiger von Messgeräten zeigen eindeutige Werte an, Katzen sind entweder tot oder lebendig, befinden sich niemals – wenn man sie beobachtet – in einem Überlagerungszustand von toter und lebendiger Katze. Dies musste nach Bohrs Überzeugung der Ausgangspunkt jeder vernünftigen Überlegung sein, nicht das Ergebnis eines Kollapses der Wellenfunktion oder ähnlich spekulativer Mechanismen. Die klassische Welt ist unmittelbar gegeben, sich braucht nicht erst von der Quantentheorie her gerechtfertigt zu werden.

Jenseits dieses unmittelbar gegebenen, verständlichen, und durch

[19] John von Neumann (1903-1957), Mathematiker und Physiker

die Klassische Physik angemessen beschriebenen Bereichs gibt es einen anderen Bereich, der nur durch die Quantentheorie widerspruchsfrei dargestellt werden kann. Die Grenze zwischen beiden Bereichen bezeichnete Heisenberg als „Schnitt“, um den diskontinuierlichen Charakter dieser Weltbeschreibung zu betonen. Die Diskontinuität besteht in der Kenntnis, die ein menschlicher Beobachter von der Welt diesseits und jenseits des Schnitts haben kann. Insofern ist die Diskontinuität nicht „objektiv“, sondern auf den menschlichen Beobachter bezogen. Alles, was diesseits des Schnitts liegt, kann und muss mit den Mitteln der Klassischen Physik dargestellt werden. Das gilt insbesondere für den Beobachter selbst, und für die von ihm verwendeten Messgeräte. Auch eine Dokumentation, die zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt zur Kenntnis genommen werden kann (aber nicht muss), wie beispielsweise eine Photographie, ist eine Messung. Wie ein Vorgang abläuft wenn er nicht beobachtet oder dokumentiert wird, darüber nachzugrübeln ist nach Kopenhagener Verständnis sinnlose Tagträumerei. Denn über einen unbeobachteten Vorgang wird man niemals sinnvoll (nachprüfbar) sprechen können, also gehört er nicht zum Arbeitsgebiet der Physik.

Der Schnitt zwischen dem klassisch und dem quantentheoretisch zu beschreibenden Gebiet ist verschieblich. Der menschliche Beobachter kann – und muss! – sich entscheiden, wie er die Messgeräte, die das beobachtete Quantenphänomen eingrenzen und zu seiner Kenntnis bringen, konstruiert und anordnet. Wenn mithilfe des Messgeräts die von der Auswahl identifizierte Möglichkeit realisiert wird, dann wird die Realisierung durch den Beobachter von außen bewirkt, oder doch zumindest in ganz erheblichem Maß beeinflusst. Bohr pflegte diesen Zusammenhang in die Worte zu fassen, dass wir (als Beobachter) im Schauspiel des Lebens gleichzeitig immer sowohl Zuschauer als auch Mitwirkende sind.

Nach Ansicht des Aristoteles ist dagegen die Realisierung ein

integraler Bestandteil des Phänomens, das Phänomen realisiert sich selbst. Der Gedanke, dass ein außenstehender Beobachter bei der Realisierung eine wichtige oder gar entscheidende Rolle zu spielen hätte, ist Aristoteles völlig fremd, und lässt sich auch nicht ohne fundamentale Änderungen in sein Begriffssystem einbauen. Für ein Aristotelisches Phänomen ist es belanglos, ob es beobachtet wird oder nicht. Für ein Bohr'sches Phänomen ist die Beobachtung, beziehungsweise die klassisch beschreibbare Dokumentation, konstitutiv. Die Diskussion eines „unbeobachteten Phänomens" wäre nach Bohr's Verständnis widersinnig, und ein Missbrauch der Sprache. Der Aristotelische Begriff des Phänomens ist ein ontologischer, der Bohr'sche Begriff des Phänomens ist ein erkenntnistheoretischer.

Einschub: *Michelangelo*[20] *steht vor einem Marmorblock, er hat Hammer und Meißel in der Hand. Er kann sich jetzt frei entscheiden, ob er aus diesem Marmorblock seine Pieta freilegen will, oder den Moses. Aber er kann nicht beides aus diesem einen Block erschaffen. Mit der Entscheidung für die eine Möglichkeit verbaut er sich die andere.*

Dem Physiker, der die Einteilchen-Interferenz untersucht, geht es nicht anders. Er kann sein Experiment so aufbauen, dass die Interferenz auftritt. Dann wird er nichts darüber erfahren, welche(n) Weg(e) das Teilchen in der Apparatur benutzt hat. Genauer gesagt: Er wird sich nicht einmal vorstellen können, dass sich da etwas durch das Interferometer bewegt hat, das den Namen „Teilchen" verdient, denn wenn sich ein Teilchen durch das Interferometer bewegt hätte, dann wäre ein Auftreten von Interferenzen

[20] Michelangelo Buonaroti, 1475 - 1564, Maler, Bildhauer, Architekt. Zu seinen bedeutendsten Werken gehören neben den im Text erwähnten Plastiken die Fresken der Sixtinischen Kapelle im Vatikan, und die Kuppel des Petersdoms in Rom. Übrigens: Der Name wird nicht wie der Deutsche Michel gesprochen, sondern „Mikelandschelo", mit hartem „k" und stimmhaftem „dsch".

völlig ausgeschlossen. Oder er kann den Aufbau so abändern, dass er eine Information über den Weg erhält. Dann passt die Teilchenvorstellung sehr gut zu seinen Beobachtungen, aber die Interferenz ist verschwunden.

Manche Bildhauer berichten, dass sie ihre Werke bereits im unbehauenen Stein „sehen". Ihre Aufgabe bestehe dann nur noch darin, das Kunstwerk behutsam freizulegen, so dass es für jeden sichtbar wird. Könnte es sein, dass Michelangelo in diesem Marmorblock beide Kunstwerke gesehen hat? Gleichzeitig, eine Überlagerung der Pieta und des Moses, im gleichen Block? Das wissen wir nicht, es erscheint uns eher unwahrscheinlich. Aber wenn es doch so gewesen sein sollte, dann musste er tatsächlich das eine Kunstwerk zerstören, noch bevor es das Licht der Welt erblickt hatte, damit er das andere freilegen konnte.

Soviel zum Thema Möglichkeiten, Auswahl, und Realisierung, achtzehn Jahrhunderte nach Aristoteles, und vier Jahrhunderte vor Bohr.

Wenn wir feststellen, dass Bohrs Denken sich hinsichtlich der Realisierung wesentlich von den Begriffen des Aristoteles unterscheidet, dann müssen uns auch die zuvor für Form, Möglichkeit und Auswahl getroffenen Identifikationen schief und fragwürdig erscheinen. Denn das Gedankengebäude des Aristoteles ist ja ein sorgfältig durchdachtes und fein aufeinander abgestimmtes System. Wir können nicht hoffen eine konsistente Begriffsbildung zu erreichen, wenn wir einfach ein Viertel davon verändern und den Rest unbefangen weiterverwenden. Zumal es sich gerade bei der Realisierung nicht um ein unbedeutendes Randthema handelt, das wir leichthin beiseite schieben dürften. Ganz im Gegenteil. Der Wirkungsbereich der Aristotelischen Realisierung (wenn wir seine Ursachenlehre der Quantentheorie aufzwingen) ist genau die Schnittstelle zwischen Quantenphänomen und Klassischer Welt. Hier tauchen aus Möglichkeiten, die von Zustandsvektoren beschrie-

ben werden, auf einmal Fakten auf, die nur(!) mit den Mitteln der Klassischen Physik darstellbar sind. Es ist ja genau dieser Vorgang, über den seit Jahrzehnten eine Diskussion unter den Physikern geführt wird, die bis heute nicht zu einem allgemein akzeptierten Ergebnis gelangen konnte.

Gerade an diesem Dreh- und Angelpunkt der Deutungsdebatte folgt Bohr *nicht* dem Denken des Aristoteles. Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie ist kein Neuaufguss Aristotelischer Philosophie. Aber zweifellos hat Bohr einige wichtige Gedanken von Aristoteles übernommen.

Hierzu ist vor allem die Lehre von der Unteilbarkeit der Phänomene zu rechnen. Aristotelische Phänomene bestehen immer aus Möglichkeit, Auswahl, Realisierung, und Form. Niemals kann einer dieser Aspekte allein auftreten. Die Vorstellung einer Form ohne Möglichkeit, oder einer Möglichkeit ohne Form, erscheint Aristoteles genauso absurd wie die Vorstellung einer Medaille, die nur eine Vorderseite hat, aber keine Rückseite. Diesen Gedanken greift Bohr auf. Er besteht nachdrücklich darauf, dass zu einem Quantenphänomen neben einem Quantenobjekt, etwa einem Atom, oder Elektron, oder Photon, immer auch eine Form gehört, die durch die klassisch zu beschreibenden Messgeräte definiert wird. Nur über das Quantenphänomen in seiner Gesamtheit kann man sinnvoll sprechen. Genau dies ist der Kern des Arguments, mit dem er den Zweifel von Einstein, Podolski und Rosen an der Vollständigkeit der Quantentheorie zurückwies [6]. Wenn jemand die klassischen Geräte wegnimmt, oder auch nur wegdenkt, und dann versucht über den (in der Phantasie des Menschen, nicht in irgendeiner messbaren Realität) übrig gebliebenen Teil des Phänomens zu sprechen, dann wird er nach Bohrs Überzeugung nur noch Unsinn reden können.

Daraus ergibt sich nach Bohrs Ansicht keine spürbare Einschränkung. Denn die Physik ist ja eine beobachtende, experimentierende

Wissenschaft. Wenn ein Quantenphänomen beobachtet wird, dann werden automatisch immer Messgeräte[21] vorhanden sein. Sollten bei irgendeinem nur phantasierten Quantengeschehen keine Messgeräte anwesend sein, dann findet auch keine Beobachtung statt, und dann hat der Physiker auch keinen Anlass, über dies Phantasiegebilde zu sprechen.

Der zweite, wesentliche Gedanke, den Bohr von Aristoteles übernimmt, ist der Begriff der Auswahl, die aus einer Menge von Möglichkeiten genau eine herausgreift. Das Wort Zufall ist vielleicht etwas zu zaghaft, um das Gemeinte zu erfassen. Der von Schopenhauer[22] beschriebene „Wille“ trifft wohl besser, was Aristoteles – und auch Bohr – vorschwebt, weil dieser Begriff die aktiv wirkende Rolle der Auswahl hervorhebt.

Damit es etwas auszuwählen gibt, muss es mehrere Möglichkeiten geben. Und die Möglichkeiten müssen echte Möglichkeit sein, mit von Null verschiedener Wahrscheinlichkeit, ausgewählt zu werden. Es kann nicht einer der Möglichkeiten schon vorab irgendwie vorbestimmt sein, realisiert zu werden. Denn dann wären die anderen keine echten Möglichkeiten, sondern nur scheinbare. Und wenn keiner Möglichkeit die Realisierung mit Sicherheit vorbestimmt ist, dann kann man das Ergebnis der Auswahl mit keiner noch so ausgefeilten physikalischen Theorie vorab ausrechnen. Die Auswahl ist ein irrationales Geschehen, das grundsätzlich und für immer jeder wissenschaftlichen Analyse entzogen ist.

Irrationale Inseln mitten in der Physik? Das musste Widerspruch hervorrufen. Es ist den Physikern seit langem bewusst, dass ihre Wissenschaft einen begrenzten Anwendungsbereich hat, und nicht zu sämtlichen Fragen, die die Menschheit bewegen, eine Antwort beisteuern kann. So erklären sie etwa bei religiösen Fragen, ob es

[21] Dabei kann es sich um sehr komplizierte technische Messgeräte handeln, aber auch um so (nur vordergründig) einfache wie die Augen des Beobachters.

[22] Arthur Schopenhauer, 1788 - 1860, Philosoph

einen Gott gibt, oder ein Leben nach dem Tod, leichten Herzens ihre Unzuständigkeit. Aber hier geht es um den Messprozess, den Kern der Physik als empirischer Wissenschaft. Drei Jahrhunderte lang hatte die Physik versucht, die Vorgänge in der Welt rational zu beschreiben, und war dabei von Erfolg zu Erfolg geeilt. Sollte man jetzt auf einmal das Handtuch werfen, und der Irrationalität Einlass gewähren? Einstein leistete zeitlebens hartnäckigen Widerstand. „Gott würfelt nicht“ war sein bekanntes Dictum[23]. „Es kommt nicht darauf an, ob Gott würfelt oder nicht, sondern ob wir wissen was wir meinen, wenn wir sagen, Gott würfele oder würfele nicht“ soll Bohr dazu angemerkt haben[24].

Man konnte den Einbruch des Irrationalen in die Physik aber auch positiv sehen. Weizsäcker[25] berichtet (zitiert nach [8]), dass er als junger Wissenschaftler die Quantentheorie als Befreiung empfunden habe. Denn die lückenlose rationale Weltbeschreibung der Klassischen Physik hatte zu einem strikten Determinismus geführt. Wenn die Klassische Physik uneingeschränkt richtig war, dann war jedes Ereignis, jede menschliche Handlung, jeder Gedanke, von jeher aufs genaueste festgelegt und vorherbestimmt. Gedanken- und Entscheidungsfreiheit war dann pure Illusion[26]. Wenn nicht

[23] In einem Brief (Einstein-Archiv 8-180) an Max Born schreibt Einstein am 4. Dezember 1926 über die Quantentheorie: „Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns doch nicht näher. Jedenfalls bin ich überzeugt davon, daß der nicht würfelt.“

[24] so berichtet es v. Weizsäcker in [7, Seite 509]

[25] Carl Friedrich von Weizsäcker, 1912 - 2007, Physiker und Philosoph

[26] Schon 1814 formulierte Laplace diese Schlussfolgerung, die sich aus der Klassischen Physik zwingend ergibt, folgendermaßen: „Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiss sein, und

jeder Physiker das Ende des Determinismus genauso positiv empfand, dann könnte das auch daran gelegen haben, dass nicht jeder Physiker seine Wissenschaft wirklich ernst nahm.

Literatur

[1] Wilhelm Capelle: *Die Vorsokratiker* (Alfred Kröner Verlag, Stuttgart, 1968)

[2] Werner Heisenberg: *Die Plancksche Entdeckung und die philosophischen Probleme der Atomphysik* Universitas **14**, 135-148 (1959)

[3] Jos Verhulst: *Der Glanz von Kopenhagen* (Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart, 1994)

[4] H. D. Zeh: *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Found. Phys. **1**, 69-76 (1970)

[5] John v. Neumann: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, Berlin, 1932)

[6] N. Bohr: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, Phys. Rev. **48**, 696-702 (1935) http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.696

[7] Carl Friedrich von Weizsäcker: *Aufbau der Physik* (Carl Hanser Verlag, München 1985; dtv, München, 4. Auflage 2002)

Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen. [...] Die Regelmäßigkeit, welche uns die Astronomie in der Bewegung der Kometen zeigt, ist ohne Zweifel bei allen Erscheinungen vorhanden. Die von einem einfachen Luft- oder Gasmolekül beschriebene Kurve ist in eben so sicherer Weise geregelt wie die Planetenbahnen.“ [9]

[8] Thomas Görnitz: *Quanten sind anders* (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999)

[9] Pierre Simon Laplace: *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), enthalten in Samburski: *Der Weg der Physik* (Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1978)