

# Möglichkeit, Wirklichkeit und Quantenmechanik

---

**Kožnjak, Boris**

*Source / Izvornik:* **Prolegomena : Časopis za filozofiju, 2007, 6, 223 - 252**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:261:995299>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Institute of Philosophy](#)

# Möglichkeit, Wirklichkeit und Quantenmechanik\*

BORIS KOŽNJAK

University of Zagreb – Faculty of Science, Physics Department  
History, Philosophy and Sociology of Science Division  
Bijenička c. 32, HR-10000 Zagreb  
bkoznjak@phy.hr

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLE / RECEIVED: 23–02–07 ACCEPTED: 26–10–07

---

ZUSAMMENFASSUNG: Dieser Artikel setzt sich mit der interpretativen Relevanz der ontologischen Theorie Aristoteles' über die Möglichkeit (δύναμις) und die Wirklichkeit (ἐνέργεια) für die Quantenmechanik auseinander, also für die auf der empirischen Ebene erfolgreichste Theorie innerhalb der modernen Physik, die jedoch noch immer kontrovers interpretiert wird. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf das Verständnis der Natur der Atomwelt, deren Phänomene sie erfolgreich beschreibt. Die Wesen der Atomwelt werden als reale Möglichkeitswesen begriffen (δυνάμει ὄντα), die in der experimentellen Situation aktualisiert werden, während das Problem der Wirklichkeitswesen der Atomwelt (ἐνεργεία ὄντα) (bekannter als das Messproblem in der Quantenmechanik) im Kontext des von Aristoteles dreifach begründeten Vorrangs der Wirklichkeit vor der Möglichkeit betrachtet wird – nämlich auf der Ebene der Zeit (χρόνος), auf der Ebene des Begriffs (λόγος) und auf der Ebene des Seins (οὐσία).

STICHWORTE: Aristoteles, Messproblem, Möglichkeit, Möglichkeitswesen, Quantenmechanik, Ursprünglichkeit der Wirklichkeit, Wirklichkeit, Wirklichkeitswesen.

---

## Einleitung

Auf der Suche nach einer angemessenen Ontologie der Atomwelt hat Werner Heisenberg, einer der Begründer der Quantenmechanik und neben Niels Bohr einer der Hauptvertreter der sog. "Standardinterpretation" oder

---

\* Die dargestellten Resultate haben sich aus dem wissenschaftlichen Projekt *Die Entwicklung und die Rolle der Physik in der kroatischen Gesellschaft im 20. Jahrhundert* ergeben, das mit Unterstützung des Ministeriums für Wissenschaft, Bildung und Sport der Republik Kroatien durchgeführt wurde.

“Kopenhagener Interpretation”, in den späten 50-er Jahren das aristotelische ontologische Konzept der Möglichkeit ( $\delta\upsilon\nu\alpha\mu\iota\varsigma$ ) als Grundlage zur Formulierung einer Ontologie vorgeschlagen. Diese “feine und radikale metaphysische These”, so die treffende Formulierung bei Shimony (1983: 214),<sup>1</sup> ist eine Art Kompromiss zwischen den beiden damaligen Hauptinterpretationen, die sich auf eines der Grundelemente des mathematischen Formalismus der Quantenmechanik bezogen, die sog. Zustandsfunktion  $\Psi$ . Es handelt sich dabei einerseits um die Interpretation Schrödingers, in der  $\Psi$  eine klassische physikalische Welle darstellt, und andererseits um die Interpretation Borns, in der (wenn eine Teilchenontologie vorausgesetzt wird)  $\Psi$  bloß das Maß unseres (Un-)Wissens über das Atomsystem darstellt. Beide Interpretationen haben jeweils mit zahlreichen Schwierigkeiten zu kämpfen.<sup>2</sup> Nach Heisenberg soll die Zustandsfunktion  $\Psi$  als Repräsentant von etwas begriffen werden, “das zwischen der Idee des Ereignisses und dem wirklichen Ereignis steht, eine merkwürdige Art von physischer Realität genau in der Mitte zwischen der Möglichkeit und der Wirklichkeit” (1958: 41). Heisenberg glaubte nicht nur, dass diese ‘merkwürdige Art’ von Realität dem aristotelischen Konzept  $\delta\upsilon\nu\alpha\mu\iota\varsigma$  ähnlich sei, vielmehr verstand er die Zustandsfunktion  $\Psi$  als die “*quantitative Formulierung* des Konzeptes  $\delta\upsilon\nu\alpha\mu\iota\varsigma$  bzw. der in der aristotelischen Philosophie beschriebenen ‘potentia’, der latinisierten Begriffsvariante” (1961: 9; Kursiv B. K.).

Heisenberg hat seinen Vorschlag nicht weiterentwickelt, so dass dieser auf einer sehr allgemeinen Ebene stehen geblieben ist. Dies belegen auch die angeführten Behauptungen. Bei Heisenberg ist folglich eine systematische und konsequente aristotelische Ontologie der Quantenmechanik eigentlich nicht vorhanden. Dafür gibt es offensichtlich zwei Hauptgründe. Erstens hält Heisenberg seine eigenen Studien zu Aristoteles und zur scholastischen Philosophie für, wie er dies selber in einem wenig bekannten Brief aus dem Jahr 1965 zugegeben hat, “nicht gründlich genug, um die Ausformulierung einer gut fundierten Position zum Konzept der ‘Potenz’ zu ermöglichen”. Dies führte dazu, dass er seine eigenen philosophischen Überlegungen zur modernen Physik “im Sinne der Fragestellung” ver-

---

<sup>1</sup> An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass vor Heisenberg eine ähnliche ontologische Position im Kontext der Quantenmechanik bereits von Bohm (1951, § 6.9) und Margenau (1949, § 3; 1950, §§ 8.2 und 17.3; 1954, 9–10) vorgeschlagen wurde, jedoch ohne die direkte Bezugnahme auf Aristoteles und die philosophische Tradition. Bohm spricht von “Quanteneigenschaften der Dinge als Potentialität”, während Margenau von “latenten Observablen” (*latent observables*) in der Quantenmechanik redet.

<sup>2</sup> Zu diesen Interpretationen, die ursprünglich 1924 formuliert wurden, sollen ihre späteren nicht-technischen Ausführungen bei Schrödinger (1952) und Born (1956) verglichen werden. Zu der Kritik an diesen Interpretationen vergleiche z.B. Jammer (1974), Kapitel 2.1.–2.4.

stand.<sup>3</sup> Der andere, und wie es scheint, wichtigere Grund liegt in der Tatsache, dass Heisenberg niemals von seinem immer wieder bezugten Platonismus, der den Ausgangspunkt seiner philosophischen Überlegungen zur modernen Physik bildete, abbrückte. Dies kommt in dem erwähnten Brief gleichfalls zum Ausdruck, zumal er hier seine Überzeugung entwickelt, dass die "Orientierung der modernen Physik eher platonisch als aristotelisch ist, unter der Bedingung, dass das Wort 'Orientierung' hier wieder im Sinne der Fragestellung verstanden wird."<sup>4</sup>

In dem vorliegenden Artikel soll eine detailliertere Interpretation der quantenmechanischen Sicht des Seins der Atomwesen ausgehend von der aristotelischen Ontologie versucht werden. In diesem Sinne wird eine ontologische Beschreibung der Atomwelt nicht nur anhand des ursprünglichen aristotelischen Begriff der Möglichkeit/des Vermögens versucht, sondern auch auf der Grundlage des aus diesem Kontext nicht weg zu denkenden Begriffs der Wirklichkeit (ἐνέργεια),<sup>5</sup> was sowohl bei Heisenberg als auch in den späteren (eher seltenen) Reflexionen über die ursprüngliche Idee Heisenbergs fast ausnahmslos entfällt.<sup>6</sup>

### Widersprüchliche Dualität des Seins der Atomwesen

Eine der ersten systematischen Theorien der Atomwelt ist der Atomismus von Leukipp und Demokrit. Es handelt sich dabei einerseits um eine Welt der Fülle (τὸ πλήρες), des Ursprünglichen, das das wahre Sein ist (τὸ κενόν) und das sich in *Atomen*, den einfachen und qualitativ unveränder-

<sup>3</sup> Es handelt sich um den Brief Heisenbergs an Edwin K. Gora, übersetzt und veröffentlicht in Cohen & Wartofsky (1967: 259).

<sup>4</sup> Ibid. Der kroatische Akademiker Ivan Supek, Heisenbergs ehemaliger Leipziger Assistent, berichtete von Heisenbergs offensichtlich endgültiger Zuneigung zum Platonismus, die er 1974, d.h. zwei Jahre vor seinem Tod, bei der Eröffnung eines internationalen Kurses aus dem Bereich der Wissenschaftsphilosophie in Dubrovnik zum Ausdruck gebracht hat (private Kommunikation).

<sup>5</sup> In diesem Artikel werden die Aristotelischen Grundbegriffe δύναμις und ἐνέργεια in ihrer strengen ontologischen Bedeutung mit 'Möglichkeit' und 'Wirklichkeit' übersetzt, obwohl der Begriff δύναμις ursprünglich 'Macht', 'Möglichkeit' oder 'Vermögen' sowie 'Fähigkeit' bedeutet, während ἐνέργεια mit 'Tätigkeit', 'Wirksamkeit' oder aber 'Akt' übersetzt werden kann. Zum Unterschied zwischen der primären Bedeutung dieser Begriffe, die mit der Bewegung (κίνησις) und Veränderung (μεταβολή) verbunden sind, und ihrer "weiterreichenden" (ἐπιπλέον; *Metaph.* 1045b35–1046a2), d.h. modalen Bedeutung siehe insbesondere Heidegger (1981) und Stallmach (1959). Von den modernen Autoren siehe Witt (2003). Der modale Gebrauch des Begriffs ἐνέργεια in diesem Artikel rechtfertigt den Gebrauch des Terminus ἐντελέχεια als Synonym. Zu diesem Begriff siehe Chen (1958) und Blair (1967).

<sup>6</sup> Siehe: Suppes (1974), Schlossberger (1979), Bitsakis (1982, 1990), Sfondoni-Mentzou (1993, 2000), Lukoschik (1999).

baren, unteilbaren Körpern (σώματα ἀδιαίρετα; *GC* 316b16–17),<sup>7</sup> bzw. den unzertrennbaren Körpern verwirklicht (ἄτομα σώματα; *Phys.* 265b 29), und andererseits der Leere (τὸ κενόν), die zwar in gewisser Hinsicht als das Nichtexistierende – das Nichtseiende (μὴ ὄν; *GC* 325a28; *Metaph.* 985b6–7) – angesehen werden kann, jedoch etwas Reales an sich hat (*GC* 325a31–32). In diesem Sinne teilen die Atome, als singuläre, existierende und sich im leeren Raum bewegende *In-dividuen* trotz ihrer eigenen Unsichtbarkeit alle Eigenschaften der sichtbaren *Wirklichkeitswesen* (ἐνεργεῖα ὄντα) aus unserer alltäglichen Erfahrung. Insofern sind sie *dieses Eins* (τὸ ἐν; *Metaph.* 1001a5) und *dieses Seiende* (τὸδε τι; *Metaph.* 1028a10–13) an einem bestimmten Ort, d.h. ausschließlich am Eigenort (τὸπος ἴδιος; vergl. *Phys.* 209a31–35). Diese Eigenschaften der antiken Atome werden in Newtons (klassischer) Mechanik vollständig widergespiegelt, insofern hier trotz der ihr innewohnenden Abstraktheit unter dem Grundbegriff ‘Materiepunkt’ gerade etwas Individuelles, diskret Existierendes und sich in einem absolut leeren Zeit-Raum Bewegendes verstanden wird, d.h. ein ontologisch reales, jedoch ‘leeres Wesen’. Kant, der die “kategoriale Struktur und den transzendentalen Horizont dieser Wissenschaft [der klassischen Physik] mit kristalliner Klarheit formuliert hat” (Pejović 1960: 102), fasste dieses ontologische Spezifikum der klassischen Physik im *Prinzip der durchgängigen Bestimmung* zusammen, nach dem “alles Existierende ist durchgängig bestimmt”, bzw. gemäß dem jedem existierenden Ding “von allen möglichen Prädikaten, sofern sie mit ihren Gegenteilen verglichen werden, eines zukommen muß” (Kant A571–572/B599–600).

Zum selben Zeitpunkt, als der Atomismus zum grundlegenden Bestandteil der modernen Wissenschaft wurde, begann der Prozess seiner Zerlegung, der seinen Höhepunkt in der Quantenmechanik und der Physik der Elementarteilchen im zwanzigsten Jahrhundert erreichte. Die Spannung, die die empirisch bewiesene duale Natur des Lichts mit sich bringt – die der Teilchen<sup>8</sup> und die der Wellen<sup>9</sup> – sowie die ganz allgemeine Dualität

<sup>7</sup> Bei der Anführung der Werke von Aristoteles bediene ich mich folgender Abkürzungen: *Phys.* (*Physica* = *Physik*), *Metaph.* (*Metaphysica* = *Metaphysik*), *GC* (*De generatione et corruptione*), *De int.* (*De interpretatione*) und *Cat.* (*Categoriae* = *Die Kategorien*).

<sup>8</sup> In diese Gruppe von Experimenten gehören die klassischen Experimente mit dem fotoelektrischen (Millikan) und dem Compton-Effekt. Bestimmte Erscheinungen, die mit dem Licht verbunden sind, wurden bereits in der Antike interpretiert, wobei man davon ausging, dass das Licht ein in gradliniger Bewegung sich befindender Teilchenstrom sei (z.B. bei Euklid, Ptolemäus).

<sup>9</sup> Zu dieser Experimentengruppe gehören die klassischen Young-Fresnels Experimente der Diffraktion und der Interferenz. Über die Wellennatur des Lichts hat Grimaldi in seinem Werk *Physico-mathesis de lumine coloribus et iride* bereits im Jahr 1665 Vermutungen angestellt.

der Materie, die sich durch die Existenz zweier Klassen von Experimenten nachweisen lässt,<sup>10</sup> stellte die Betrachtung der Wesen der Atomwelt als vollständig bestimmte Wirklichkeiten in Frage. Die Kontinuität  $P$ , die als das Hauptmerkmal der Welligkeit angesehen werden kann, und die Diskontinuität  $Q$ , die sich als das Hauptmerkmal der Teilchenhaftigkeit bezeichnen lässt, sind logisch betrachtet zwei Merkmale, die sich gegenseitig ausschließen; ein Teilchen ist etwas, was einen *idealen* materiellen Punkt im Raum darstellt, während die Welle *ideell* eine uneingeschränkte räumliche Ausdehnung hat. In der klassischen Logik braucht der Ausdruck  $P \vee Q$  nicht im Sinne eines ausschließlichen *Entweder – Oder*s gedeutet zu werden; bei der sog. inklusiven Disjunktion kann der Ausdruck  $P \vee Q$  bedeuten, dass *entweder P oder Q* möglich ist, aber auch, dass *sowohl P als auch Q* möglich sind, so dass in Bezug auf ein und dieselbe Entität  $x$  Folgendes gilt:  $\diamond(\exists x) (P_x \wedge Q_x)$ . So ist es beispielsweise möglich, dass eine Person *entweder* Philosoph *oder* Physiker ist, aber diese Person kann gleichzeitig auch *sowohl* Philosoph *als auch* Physiker sein.<sup>11</sup> Wenn jedoch die Eigenschaften  $P$  und  $Q$  sich gegenseitig ausschließen ( $Q = \neg P$ ), wie dies bei der Teilchenhaftigkeit und der Welligkeit der Fall ist, dann gilt  $\neg \diamond(\exists x) (P_x \wedge Q_x)$ , was bedeutet, dass die Kombination  $P \wedge Q$  in Bezug auf ein und dieselbe Entität nicht möglich ist (z.B. in Bezug auf ein Elektron). Beispielsweise ist es nicht möglich, dass die Person  $x$  gleichzeitig sowohl ein Mann als auch eine Frau ist. Wenn dies möglich wäre, dann würde  $P \wedge \neg P$  gelten. Dies aber ist offensichtlich eine Form der Verletzung des Gesetzes der Widerspruchsfreiheit  $\neg(P \wedge \neg P)$ , ‘dem beständigsten aller Prinzipien’, nach dem “kontradiktorische Aussagen [...] nicht zugleich wahr sein” können, beziehungsweise gemäß dem “unmöglich der Widerspruch von demselben Gegenstand mit Wahrheit ausgesagt werden” und folglich “das Konträre [...] nicht demselben Gegenstande zugleich zukommen” (*Metaph.* 1011b15–18) kann, wie dies Aristoteles ausdrückte.

Ein möglicher Ausweg aus dieser problematischen Situation der Anerkennung einer widersprüchlichen Dualität des Seins der Atomwesen wäre die Reduktion der Eigenschaft  $P$  auf die Eigenschaft  $Q$  ( $P \Rightarrow Q$ ) oder umgekehrt, die Reduktion der Eigenschaft  $Q$  auf die Eigenschaft  $P$  ( $Q \Rightarrow P$ ),

<sup>10</sup> Die erste Gruppe von Experimenten bezieht sich auf die Teilchenmerkmale der Materie, wie z.B. auf die Beobachtung der Spuren elektrisch geladener Teilchen in der sog. Blasenkammer oder auf die fotografische Emulsion. Die zweite Klasse von Experimenten bezieht sich auf die Diffraktions- und Interferenzexperimente von ‘materiellen Teilchen’ wie den Elektronen. Die klassischen Experimente der zuletzt genannten Art wurden von Davisson und Germer 1927 durchgeführt.

<sup>11</sup> Natürlich zumindest, was die Logik angeht. *Sowohl* viele Physiker *als auch* viele Philosophen würden in dem angeführten Beispiel die Anwendung der exklusiven Disjunktion präferieren.

d.h. die ontologische Reduktion des Seins der Atomwesen auf ausschließlich eine der klassischen Ontologien – *entweder* die der Teilchen, *oder* die der Wellen. Durch eine solche Reduktion würde wieder Folgendes gelten:  $P \subseteq Q$  (die Realisierung der Kontinuität innerhalb der  $Q$ -Ontologie) oder aber  $Q \subseteq P$  (die Realisierung der Diskontinuität innerhalb der  $P$ -Ontologie). Gerade diese ontologische Reduktion ist typisch für die beiden wichtigsten Interpretationen eines der mathematischen Grundelemente der Quantenmechanik, der sog. Zustandsfunktion  $\Psi$  – und zwar für die Interpretationen von Schrödinger und Born.<sup>12</sup> Allerdings zeigt die an beiden Interpretationen geübte Kritik,<sup>13</sup> dass offensichtlich keine der beiden klassischen *Entweder-oder*-Ontologien der Atomwelt in der Lage ist, der Fülle ihrer Erscheinungsformen zu folgen; die Annahme der Notwendig-

<sup>12</sup> In Schrödingers Interpretation basiert die Durchführung der Reduktion  $Q \Rightarrow P$  auf dem Gedanken de Broglies über das ‘Teilchen’, das durch das sog. Wellenpaket dargestellt wird. Die Gruppengeschwindigkeit des Wellenpakets bleibt der Geschwindigkeit des ‘Teilchens’ selbst gleich. Dementsprechend wird die Zustandsfunktion oder die *Wellenfunktion*  $\Psi$ , die das einzelne ‘Teilchen’ beschreibt, als Vertreter der klassischen Welle im dreidimensionalen euklidischen Zeit-Raum gedeutet, wobei das ‘Teilchen’ als eine Art diskreter ‘Wolke’, die ein bestimmtes Volumen einnimmt, gedacht wird. In diesem Sinne lässt sich behaupten, dass in Schrödingers Interpretation die Quantenmechanik als klassische Wellentheorie funktioniert (weshalb sie oft auch als *Wellenmechanik* bezeichnet wird), die trotz der Erscheinung abgeleiteter Singularitäten die einzige physische Realität der Atomwesen darstellt. In Borns Ansatz behalten demgegenüber in der Reduktion  $P \Rightarrow Q$  die Wesen der Atomenwelt alle Eigenschaften der klassischen Atome Demokrits bei. Borns Interpretation basiert auf dem Formalismus der Wellenmechanik Schrödingers (der noch heute als Standardformalismus der Quantenmechanik gilt). Er wird von Born als “die subtilste Formulierung der Quantengesetze” (Born, 1926: 864) bezeichnet, während er der ‘Wellenfunktion’  $\Psi$  keine direkte physikalische Bedeutung mehr zuerkennt, schon gar nicht im Sinne einer klassischen Welle, vielmehr schreibt er die physikalische Bedeutung dem Quadrat des absoluten Werts der Wellenfunktion  $|\Psi|^2$  zu, der sog. *Dichte der Wahrscheinlichkeit*, beziehungsweise dem Ausdruck  $|\Psi|^2 dV$ , der die Wahrscheinlichkeit, ein *Teilchen* im Volumen  $dV$  zu finden, angibt.

<sup>13</sup> Grundlegende Probleme der Interpretation Schrödingers zeigen sich im Zusammenhang mit der Streuung des Wellenpakets, durch das das ‘Teilchen’ dargestellt wird, die Multidimensionalität des notwendigen Konfigurationsraums zur Darstellung der Zustandsfunktion sowie die kausale Anomalie beim diskontinuierlichen Zusammenbruch (dem sog. Kollaps) der Wellenfunktion (siehe Born, 1956). Obwohl diese Probleme durch die Interpretation Borns leicht gelöst werden können, insofern einerseits  $\Psi$  kein direktes physikalisches System mehr darstellt bzw. erst das Quadrat des absoluten Wertes der Wellenfunktion – das immer durch eine positive reale Zahl ausgedrückt wird – über einen direkten physikalischen Sinn verfügt, und insofern andererseits die Reduktion des Wellenpakets – als Veränderung von  $\Psi$ , die beim Messen auftritt – kein, wie dies bei Schrödinger der Fall ist, plötzlicher Zusammenbruch der gestreuten Welle ist, sondern die Veränderung unserer Kenntnisse über das System, die auftritt, wenn wir uns der Messergebnisse bewusst werden, gelingt es Born nicht, die wirklichen Wirkungen der Diffraktion und der Interferenz zu erklären, da, wie dies Sklar plastisch behauptete, “normale Wahrscheinlichkeiten miteinander einfach nicht ‘interferieren’” (1992: 165).

keit einer  $P$ -Ontologie führt nicht zum gewünschten  $Q \subseteq P$  genauso wenig wie die Annahme der Notwendigkeit einer  $Q$ -Ontologie zum gewünschten  $P \subseteq Q$  führt. Durch den ‘Untergang der unitaristischen Lösungen’, so die Formulierung von Lelas (1973: 72), entfällt offensichtlich die Möglichkeit, die Verletzung des Gesetzes von der Widerspruchsfreiheit  $P \wedge \neg P$  in der Atomwelt zu umgehen, was übrigens einer der Motivationsfaktoren für die ontologische Reduktion des Seins der Atomwesen auf ausschließlich eine der klassischen Ontologien war. Auf eine bestimmte Art und Weise sind sowohl die Welligkeit  $P$  als auch die Teilchenhaftigkeit  $Q = \neg P$ , die durch zwei Gruppen von Experimenten festgestellt wurden, Eigenschaften der Atomwesen, mit denen zu rechnen ist, wenn man ihr Sein verstehen möchte. Wie soll also die anscheinend nicht aufzuhebende Dualität des Seins der Atomwesen akzeptiert und dabei gleichzeitig eine Verletzung des Prinzips der Widerspruchsfreiheit und damit auch des Prinzips der durchgängigen Bestimmung vermieden werden?

Laut der sog. Standard- oder Kopenhagener Interpretation wird dieses Dilemma aufgrund der Tatsache gelöst, dass ein und dasselbe atomare Objekt in einer singulären experimentellen Situation niemals *gleichzeitig* Welligkeit und Teilchenhaftigkeit aufweisen kann. Vielmehr geschieht dies in *unterschiedlichen experimentellen Situationen*, in denen das Objekt an sich *entweder* Welligkeit *oder* Teilchenhaftigkeit aufweist, da die experimentellen Aufstellungen selbst, in denen ein und dasselbe atomare Objekt die beiden – klassisch betrachtet – konträren Eigenschaften aufweist, sich gegenseitig ausschließen.<sup>14</sup> Laut Bohr sind Welligkeit und Teilchenhaftigkeit keine widersprüchlichen, sondern *komplementäre* Eigenschaften, die beide notwendig sind für die vollständige Beschreibung der atomaren Erscheinungen, oder mit Bohrs Worten: “die Unmöglichkeit einer Vereinigung von Erscheinungen, die in unterschiedlichen experimentellen Aufstellungen nachgewiesen wurden, in ein gemeinsames klassisches Bild, impliziert, dass diese scheinbar kontradiktorischen Erscheinungen als komplementär betrachtet werden müssen” (Bohr, 1963: 25). Mit dieser Lösung umgeht Bohr zweifelsohne die Problematik des logischen Widerspruchs, also die gleichzeitige Zuordnung zweier sich gegenseitig ausschließender Eigenschaften zu ein und demselben atomaren Objekt. Diese Lösung hat allerdings ganz spezifische Folgen für die Möglichkeit des ontologischen Denkens im Kontext der Quantenmechanik. Bohr behauptet, dass scheinbar kontradiktorische Erscheinungen als komplementär anzusehen seien, weil sie “zusammengenommen *das gesamte Wissen über die*

<sup>14</sup> Diese Einstellung pflegte Bohr durch unterschiedliche ‘pseudorealistische’ Analysen des bekannten Doppelspaltenexperiments zu illustrieren. Siehe z.B. Bohr (1958: 40f).



*atomaren Objekte enthalten*” (ibid.; kursiv B. K.). In diesem Sinne spricht Bohr von der komplementären Beschreibung als der “einzig möglichen objektiven Beschreibung” der Erfahrung von der Atomwelt (vergleiche Vukelja, 2004: 53). Wenn man insbesondere die Tatsache in Betracht zieht, dass diese Beschreibungen immer mit einer experimentellen Aufstellung zusammenhängen, dann soll alles, was einem atomaren Objekt zugeschrieben wird, stets im Hinblick auf diese Situation geschehen. Dies ist für Bohr zureichend, um zu der allgemeinen Schlussfolgerung zu gelangen, dass ein direkter Zugang zum atomaren Objekt *per se* (ähnlich wie bei Kants *Ding an sich*) nicht möglich ist. Letztendlich meint Bohr, dass das “einzige Ziel des Formalismus der Quantenmechanik die Beschreibung der beobachtungsfähigen Ereignisse ist, die unter experimentellen Bedingungen definiert und durch einfache physikalische Konzepte beschrieben werden ... d.h. sein Ziel ist es, eine unmittelbare Relation zwischen den beobachtungsfähigen Daten herzustellen” (1958: 71).

Doch darf man so leicht auf die Möglichkeit einer Ontologie der Atomwelt verzichten? Denn die experimentell belegte Fähigkeit zur Transformation der Eigenschaften der Atomwesen in Abhängigkeit von der experimentellen Situation verhindert nicht die Frage nach dem Atomwesen an sich, also die Frage nach dem Atomwesen unabhängig von der Verwirklichung einer seiner sich gegenseitig ausschließenden Eigenschaften. Vielmehr stellt sich diese Frage auf eine bestimmte Art und Weise, und zwar als Frage nach der Art der Realität, die dieser Fähigkeit zur Transformation zugrunde liegt. Trotz der Aufforderung, alle bekannten Kenntnisse über die *Erscheinungen* der atomaren Objekte auszuschöpfen, wobei ein solches Ausschöpfen nur im Hinblick auf die konkrete experimentelle Aufstellung stattfinden kann, scheint die Frage immer noch legitim zu sein, ob zwei komplementäre Bilder (und damit auch zwei – in ihrem Wesen klassische – Ontologien) das gesamte Wissen über die Atomwesen *als* Wesen umfassen, d.h. über das Atomwesen als das, was (ὅν ἢ ὄν) ist? Hierbei ist insbesondere an diejenige Klasse der physikalischen Ereignisse zu denken, die Reichenbach als unsichtbare Interphänomene bezeichnet hat, bzw. an “all das, was zwischen den Koinzidenzen passiert wie die Elektronenbewegung oder die Bewegung des Lichtstrahls von der Quelle bis zu seinem Zusammenstoß mit der Materie”, die in “Form der Interpolation innerhalb der Welt der Erscheinungen konstruiert wird”, im Gegensatz zu den sichtbaren *Phänomenen*, die “mit den makroskopischen Ereignissen der kurzen Kausalketten verbunden sind” und die direkt mit Geräten wie etwa dem Geigerzähler, dem fotografischen Film, der Wilsonschen Nebelkammer (Reichenbach, 1998 [1944]: 21) bestätigt werden können. Wie ist also die Natur der Atomwesen als Wesen von Interphänomenen zu fassen?

## Die Wesen der Atomwelt als $\delta\nu\acute{\alpha}\mu\epsilon\iota\ \acute{\omicron}\nu\tau\alpha$

Auf der Suche nach einer Antwort auf die Frage nach dem Substantziellen der atomaren Erscheinungen haben wir uns bislang nur auf den Formalismus der Quantenmechanik verlassen, insbesondere auf sein Grundelement – die Zustandsfunktion  $\Psi$ . Dies ist eigentlich das einzige seiner Elemente, mittels dessen wir *über* ein einzelnes Atomwesen sprechen können. Natürlich wird laut Standardinterpretation die direkte physikalische Bedeutung nicht nur der Funktion  $\Psi$  zugeschrieben, sondern dem Quadrat ihres absoluten Wertes. Eine ausführlichere mathematische Reflexion dieser Tatsache basiert darauf, dass die Zustandsfunktion  $\Psi$  nicht eindeutig ihre eigene Interpretation bestimmt. Bevor das atomare Objekt mit der Messapparatur in Wechselwirkung tritt, definiert laut Bohm (1951: 133) die dazugehörige Zustandsfunktion  $\Psi$  zwei grundlegende Wahrscheinlichkeiten: Die Wahrscheinlichkeit der entsprechenden Position des atomaren Objekts  $|\Psi(x)|^2 dx$ , bzw. die Wahrscheinlichkeit, dass in einem bestimmten räumlichen Intervall ein Objekt gefunden wird, und die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Impulses des atomaren Objekts  $|\varphi(k)|^2 dk$ , wobei  $\varphi(k)$  die Zustandsfunktion  $\Psi(x)$  darstellt, wie sie in einem sog. Impulsraum gegeben ist. Welche der beiden angeführten Wahrscheinlichkeiten in einer bestimmten Situation vorhanden ist, wird nicht allein durch die Zustandsfunktion  $\Psi$  festgelegt, sondern auch dadurch, mit welcher Messapparatur das atomare Objekt in Wechselwirkung steht: Ob dies also eine Apparatur ist, mit dem die Position gemessen wird, oder eine Apparatur, mit dem der Impuls gemessen wird. Wenn das atomare Objekt eine Wechselwirkung mit dem den Impuls messenden Messapparaten aufweist, dann wird seine Welligkeit auf Kosten seiner Teilchenhaftigkeit zum Vorschein kommen, und wenn das atomare Objekt eine Wechselwirkung mit einem die Position messenden Messapparaten aufweist, dann wird seine Teilchenhaftigkeit (die definitive Position) auf Kosten seiner Welligkeit (der definitiven Wellenlänge) akzentuiert. So sind diese beiden Formen der Wahrscheinlichkeit mit der Realisierung, d.h. mit der Verwirklichung einer der klassischen Eigenschaften des atomaren Objekts in einer konkreten experimentellen Aufstellung verbunden, d.h. mit den Wesen der Atomwelt als  $\acute{\epsilon}\nu\epsilon\rho\gamma\epsilon\acute{\iota}\alpha\ \acute{\omicron}\nu\tau\alpha$ . Aber was wird dann von der Zustandsfunktion  $\Psi$  dargestellt?

Die Überlegungen zu dieser Frage erweisen sich in vielerlei Hinsicht als problematisch und dies nicht nur wegen der Tatsache, dass die Standardinterpretation die Möglichkeit einer direkten Zuschreibung der physikalischen Bedeutung der Zustandsfunktion  $\Psi$  – als dem Repräsentanten des einzelnen Atomwesens – verbietet, sodass diese von der Standardinterpretation nur als ein passendes rechnerisches Mittel zur Voraussage der konkreten experimentellen Ergebnisse angesehen wird. Zudem begegnet man

einer viel subtileren Schwierigkeit auch dann, wenn man, wie dies Jammer (1974: 44) getan hat, für einen Moment die Standardinterpretation in der Annahme verlässt, dass  $\Psi$  doch “etwas physisch *Reales*, und nicht nur das Maß unseres (Un)Wissens darstellt” (1974: 44). Wenn man nämlich die Ergebnisse der vorherigen Analyse in Betracht zieht, d.h. die Tatsache, dass die Atomwesen eine Fähigkeit zur Transformation ihrer Erscheinung nach Maßgabe der experimentellen Situation besitzen, die eine ausschließende ontologische *Reduktion* des atomaren Interphänomens auf eine seiner phänomenalen Eigenschaften unmöglich macht, dann scheint es, dass auch  $\Psi$  weder ein klassisches Teilchen, noch eine klassische Welle darstellt, sondern auf eine unbestimmte Art und Weise diese beiden Eigenschaften beinhaltet, da diese im Kontext einer bestimmten experimentellen Aufstellung jeweils realisiert werden können. Anders ausgedrückt: Es scheint, dass das Wesen der Atomwelt als Interphänomen “ein unbestimmtes und flexibles Wesen [ist], das seine unterschiedlichen Eigenschaften je nach Umgebung zum Vorschein bringt” (1973: 83), wie dies Lelas beschreibt, bzw. dass als ein Wesen in Erscheinung tritt, welches “weder Teilchen, noch Welle ist, sondern statt dessen, eine dritte Objektart zu sein scheint”, so Bohm (1951: 117–118). An dieser Stelle stellt sich die Frage, wie man die Annahme, dass das Atomwesen auf der einen Seite als unsichtbares Interphänomen (also als ein Wesen *an sich*) kein bestimmtes τὸ ἐν ἰ τὸδε τι darstellt, ein ἐνεργεῖα ὄν also, mit der Annahme, dass es auf der anderen Seite etwas *physisch Reales* sein soll, in Einklang bringen kann?

Die Antwort auf diese letzte Frage hängt grundsätzlich davon ab, wie wir die ‘Realität’ wahrnehmen. Wenn wir nämlich das Realitätskonzept voraussetzen, auf dem die moderne Wissenschaft beruht und das besagt, dass das Reale immer auch das Wirkliche sei (was eigentlich eine Affirmation der grundlegenden These der Megariker darstellt; siehe dazu *Metaph.* 1046b29–1047a29), dann besteht eine sehr schwache Möglichkeit, das oben genannte Dilemma zu lösen. Jedoch im Unterschied zu dieser eindimensionalen Wahrnehmung der Realität als Wirklichkeit, wird die Realität in einer klassischen Theorie der allgemeinen Metaphysik – in der Lehre von den Modalitäten des Seins – auf eine doppelte Weise begriffen, die ausgehend von den Begriffen δύναμις und ἐνέργεια in ihrer “weitreichenden” (ἐπὶ πλεόν), d.h. modalen Bedeutung als zwei einander entgegengesetzte, jedoch miteinander verbundene Modalitäten der Seinsanwesenheit anzusehen ist.<sup>15</sup> Wie dies Aristoteles selbst klar formuliert hat: “das Seiende wird in zwei Bedeutungen gebraucht” (*Metaph.* 1009a32), bzw. “das Seiende” wird “einmal als ein Was oder ein Qualitatives oder ein Quantitatives bezeichnet, andererseits nach Vermögen und Wirklich-

<sup>15</sup> Siehe Fußnote 5.

keit [...] unterschieden” (*Metaph.* 1045b32–34), d.h. “Sein (τὸ εἶναι) und Seiendes (τὸ ὄν)” bezeichnet “in diesen angeführten Fällen teils das Vermögen, teils die Wirklichkeit” (*Metaph.* 1017a35–1017b2). Hier wird also behauptet, dass außer den Realitätswesen auch die realen Möglichkeitswesen existieren (δυναμει ὄντα), wobei nicht die bloß eine logische Möglichkeit gemeint ist (δυνατόν, ἐνδεχόμενον; siehe *De int.* 21a35–36), sondern eine ontologisch gemeinte Möglichkeit im Sinne der Wesen, die ihrer Möglichkeit nach *bereits-jetzt sind*, so wie man beispielsweise sagt: “denn ‘es ist sehend’, sagen wir sowohl von dem dem Vermögen, als von dem der Wirklichkeit nach Sehenden” (*Metaph.* 1017b2–b3). Konkreter gesagt lässt sich behaupten, dass die Eichel der Möglichkeit nach *bereits – eine Eiche ist* oder dass eine amorphe Tonmasse der Möglichkeit nach *bereits – jetzt die Skulptur von Aristoteles ist*.<sup>16</sup> Es geht also um die reale Modalität der Anwesenheit dieser Wesen, aber nicht um eine modale Art der Wirklichkeit, sondern um eine modale Art der Möglichkeit. Hier stellt sich die Frage nach den Eigenschaften der Möglichkeitswesen, die uns beim Verstehen des Seins der Atomwesen helfen können.

An dieser Stelle soll zunächst festgestellt werden, dass die Begriffe δύναμις und ἐνέργεια mit den Begriffen der Materie (ὕλη) und der Form

<sup>16</sup> Die Bedingungen, unter denen man feststellen kann X ist ‘X der Möglichkeit nach F’ sind strenger als die bloße Annahme, dass eine Möglichkeit existiert, aufgrund derer X nach einer unbestimmten Reihe möglicher Veränderungen in F verwandelt wird. Die Gültigkeit der Aussage, dass ‘X ist der Möglichkeit nach F’ setzt vor allem die passive Fähigkeit der Substanz X voraus, einer Veränderung unterzogen werden zu können, aus der die Verwirklichung von F resultiert, (dies ist eine Fähigkeit, über die nicht alle Dinge verfügen, so wie z.B. eine Eichel nicht in eine Skulptur Aristoteles verwandelt werden kann, oder der Ton, der sich nicht zu einem lebendigen Eichenbaum entwickeln kann). Es wird aber auch eine bestimmte aktive Fähigkeit zum Hervorrufen dieser Veränderungen vorausgesetzt, egal ob es sich dabei um eine äußere Ursache handelt, die die Fähigkeit hat diese Veränderungen in der Substanz X herbeizuführen, oder aber um ein inneres Prinzip der Substanz X das ‘von innen’ (unter den entsprechenden äußeren Bedingungen) die Veränderung der Substanz X durch etwas, was dem Vermögen nach F ist in etwas was F in Wirklichkeit ist. In diesem Sinne können wir für die amorphe Tonmasse sagen, dass sie der Möglichkeit nach die Skulptur Aristoteles ist, und zwar nicht nur dann, wenn wir feststellen, dass eine passive Fähigkeit des Tons existiert, durch die dieser in die Skulptur Aristoteles verwandelt werden kann, sondern auch dann, wenn wir den einzigartigen Prozess der Ausarbeitung der Skulptur spezifizieren, der letztendlich vom Können des die (wirkliche) Form in die relativ amorphe Substanz aktiv einprägenden Bildhauers abhängig ist. Analog dazu können wir für die Eichel sagen, dass sie der Möglichkeit nach eine Eiche sei, da eine passive Fähigkeit der Eichel als Eichel existiert, im Laufe ihrer natürlichen Entwicklung unter den entsprechenden äußeren Bedingungen (fruchtbarer Boden, ausreichende Feuchtigkeit u.ä.) zu einem reifen Eichenbaum heranzuwachsen, aber auch weil eine aktive (doch diesmal eine innere) Ursache für diese Veränderung existiert. Über die Bedingungen, unter denen es möglich ist, zu behaupten, dass ‘X der Möglichkeit nach F’, diskutiert ausführlich Frede (1994).

(εἶδος, μορφή) nicht nur eng verbunden sind,<sup>17</sup> sondern dass das Verhältnis zwischen Möglichkeit und Wirklichkeit ganz allgemein als Verhältnis zwischen Materie und Form angesehen werden kann, insofern Folgendes laut Aristoteles gilt: “Ferner ist der Stoff dem Vermögen nach, weil er zur Form gelangen kann; sobald er aber in Wirklichkeit ist, dann ist er in der Form” (*Metaph.* 1050a15–16). An sich jedoch ist die Materie als Möglichkeit bei Aristoteles nichts Bestimmtes, sie ist weder ein ‘Was’, noch ein ‘Quantitatives’, es wird auch nicht gesagt, dass sie etwas prinzipiell anderes sei als dasjenige, dessen Wesen bestimmt ist (*Metaph.* 1029a 20–21), da Aristoteles behauptet: “denn was nur dem Vermögen, nicht der Wirklichkeit nach ist, das ist das Unbestimmte (ἀόριστον)” (*Metaph.* 1007b28–29; siehe dazu auch *Metaph.* 1010a3–4). Ein reales Möglichkeitswesen ist somit weder *das Eine* (τὸ ἓν) noch *das Etwas* (τὸδε τι), wie dies die Wirklichkeitswesen sind, noch ist es auf der anderen Seite das Nichtexistierende (μὴ ὄν); es ist an sich eine relativ unbestimmte, jedoch *reale Substanz* (ὑποκείμενον), die für die Annahme einer Form empfänglich ist. Jedoch ist das an sich unbestimmte Möglichkeitswesen auch deshalb spezifisch, weil es das, was in der Wirklichkeit widersprüchlich ist, in sich vereinen kann: “Denn dem Vermögen nach kann dasselbe zugleich Entgegengesetztes sein, der Wirklichkeit nach aber nicht.” (*Metaph.* 1009a34–36). So kann die amorphe Tonmasse der Möglichkeit nach ebenso eine Skulptur von Aristoteles wie eine Skulptur von Plato sein, ein Stück Holz *sowohl Stuhl als auch Tisch* und der Samen *sowohl Mann als auch Frau* sein. Als Wirklichkeit aber existiert nur *entweder* eine Skulptur Aristoteles *oder* eine Platos, *entweder* ein Tisch *oder* ein Stuhl, *entweder* ein Mann *oder* eine Frau. Gerade die Ausschließung des Prinzips der Widerspruchsfreiheit im Hinblick auf das potentielle Sein, bzw. die Eingrenzung seines Geltungsbereichs ausschließlich auf Wirklichkeitswesen, für die dieses Prinzip etwas darstellt, was ohne Beweis als Wahrheit anzusehen ist (τὸ ἀξίωμα),<sup>18</sup> ist ein Umstand, der sich als wichtig bei der

<sup>17</sup> Laut Ross (1996: 76) wird μορφή bei Aristoteles als sinnliche Form eines Wesens wahrgenommen, während εἶδος seine intelligible Struktur darstellt, was das Hauptelement von Aristoteles Formenkonzept darstellt.

<sup>18</sup> Es geht hier um einige prinzipielle Anmerkungen zu der möglicherweise problematischen Behauptung über die Ausschließung des Prinzips der Widerspruchsfreiheit in Bezug auf die Möglichkeitswesen, wobei sich noch nicht einmal Aristoteles getraut hat, wie dies Lukasiewicz (1910) bemerkte, dies offen trotz der klaren Andeutung im obigen Satz zu thematisieren (siehe dazu den breiteren Kontext des Satzes in *Metaph.* 1009a22–36 und den damit verbundenen Abschnitt in *Metaph.* 1010a1–5), was die späteren Analytiker (mit Ausnahme von angeführtem Werk Lukasiewicz) verschweigen. Hier handelt es sich erstens nicht um die Nicht-Anwendbarkeit des Prinzips der Widerspruchsfreiheit in einem rein formal-logischen (tautologischen) Sinne, und zweitens geht es hier auch nicht um widersprüchliche Behauptungen, die sich auf nicht-verwirklichte Tatsachen im Sinne

Verständigung über das Sein der atomaren Wesen selbst entpuppt, vor allem bei ihrer Wahrnehmung (hier sei noch einmal betont – im Sinne der *Interphänomene*) als realer Möglichkeitswesen, was, wie es scheint, auch Heisenberg für relevant hielt, als er vorschlug, den ‘Zustandsbegriff’ in der Quantenmechanik so zu verstehen, als ob “er eher die Möglichkeit, als die Wirklichkeit bezeichnet” (1958: 185).

Diese vorausgesetzte Wahrnehmung der Wesen der Atomwelt als reale Möglichkeitswesen wird besonders klar im Kontext des “grundlegendsten und radikalsten” (Dirac 1962: 4) Prinzips der Quantenmechanik – des Prinzips der Superposition des Zustands – für welches gilt, dass man es “auf keine denkbare klassische Art und Weise vergleichen” kann (Dirac 1962: 12). Vorausgesetzt (und hierbei handelt es sich nicht um eine bloße gedankliche, sondern um eine unter Laborbedingungen real verwirklichte Möglichkeit), dass irgend ein Atomobjekt  $\mathcal{O}$  in einen Zustand versetzt wird, wie dies durch die linearen Zustandskombinationen  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  beschrieben wird, bzw. durch die Superposition des Zustands  $\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$ , wobei für die Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$   $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  gilt. Wenn das Objekt  $\mathcal{O}$  durch ein angemessen vorbereitetes Messgerät  $\mathcal{M}$  einer Messung unterzogen wird, dann wird das Objekt  $\mathcal{O}$  ausschließlich entweder mit der Wahrscheinlichkeit  $|\alpha|^2$  im Zustand  $\Psi_1$ , oder mit der Wahrscheinlichkeit

---

einzelner kontingenter Ereignisse in der Zukunft beziehen, für die man weder behaupten kann, dass sie definitiv wahr sind, noch dass sie definitiv unwahr sind (*De int.* 19a27–19b4). Solch eine Behauptung wäre z.B. die Aussage “Dieses Stück Holz wird *entweder* Tisch *oder* Stuhl” (zu diesem Dilemma – d.h. zu der Frage, ob Aristoteles wirklich gemeint hat, es gebe Ausdrücke, die weder wahr noch unwahr seien, siehe z.B. Kneale & Kneale, 1962: 45–54). Hier geht es um die Ausschließung des Prinzips der Widerspruchsfreiheit in der Beziehung zwischen Behauptung (*homioiosis*) und Tatsache (*pragma*), und zwar im Einklang mit dem allgemeinen Wahrheitskriterium bei Aristoteles (*Metaph.* 1011b25; *Cat.* 12b11, 14b14; *De int.* 16a3). Dadurch wird ein Kontext gebildet, innerhalb dessen das Dilemma um den Wahrheitsgehalt des Ausdruckstypus “Dieses Stück Holz ist *sowohl* Tisch *als auch* Stuhl” thematisiert werden kann. Obwohl in diesem Artikel nicht ausführlicher über die moderne Revision der traditionellen Logik debattiert werden soll, insbesondere über das Prinzip der Widerspruchsfreiheit, das zum Satz vom ausgeschlossenen Dritten führt (angefangen bei Łukasiewicz selbst und seiner dreiwertigen Logik), obwohl sich zudem hier keine Diskussion darüber führen lässt, ob Aristoteles zum Begründer einer solchen Revision erklärt werden kann, soll dennoch wenigstens erwähnt werden, dass unterschiedliche Varianten der mehrwertigen und modalen logischen Systeme gerade im Bereich der Quantenmechanik auf sehr fruchtbaren Boden gefallen sind. So wurde z.B. in die Reichenbachsche dreiwertige Logik (Reichenbach, 1998 [1944]) neben den Wahrheitswerten ‘Wahrheit’ und ‘Lüge’ mit der Kategorie ‘Unbestimmt’ noch ein dritter Wahrheitswert eingeführt und zwar mit dem Ziel, die Interphänomene zu beschreiben, wobei gilt, dass dieses dreiwertige System, solange die Rede von der Welt der Phänomene ist, eine gewöhnliche zweiwertige Beschreibung sichert, da die dreiwertige Logik die zweiwertige als einen besonderen Fall beinhaltet, genauso wie die einwertige Logik ein besonderer Fall der zweiwertigen Logik (siehe Reichenbach, 1951).

$|\beta|^2$  im Zustand  $\Psi_2$  vorgefunden.<sup>19</sup> Dies bedeutet laut Standardinterpretation allerdings nicht, dass sich das Atomobjekt  $\mathcal{O}$  bereits vor der Messung in einem gut definierten, uns jedoch unbekanntem Zustand befunden hat (entweder im Zustand  $\Psi_1$  oder im Zustand  $\Psi_2$ ) und dass die Messung dementsprechend aus der bloßen Feststellung eines der beiden bereits zuvor gegebenen Zustände besteht. Der Zustand  $\Psi$  ist eine objektive Beschreibung des Objektes  $\mathcal{O}$ , wie dies auch die Zustände  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  sind, und das (Un-)Wissen über den Zustand  $\Psi$  ist nicht mehr oder weniger präzise oder vollständig als das (Un-)Wissen über die Zustände  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$ . Technisch ausgedrückt soll die Superposition  $\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$  nicht als eine sog. statistische Mischung verstanden werden, sondern als der sog. reine Zustand, als ein gesonderter Zustand *per se*. Da aber die Zustände  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  auch als sog. orthogonale, d.h. logisch sich gegenseitig ausschließenden Zustände betrachtet werden können (beispielsweise ‘Spin auf’ und ‘Spin ab’) und zugleich die Zustände  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  vor der Messung als Wirklichkeitszustände in der Superposition zusammen existieren, so käme es zu einer deutlichen Missachtung des Prinzips der Widerspruchsfreiheit. Es ist trotzdem legitim, vorauszusetzen, dass diese Zustände in einer bestimmten Superposition existieren, da sie sich durch ein angemessenes experimentelles Messgerät veranschaulichen lassen, allerdings offensichtlich nicht als Wirklichkeit, sondern nur als Möglichkeit, wie dies Aristoteles für reale Möglichkeitswesen annimmt.

Eine zusätzliche und etwas explizitere Deutung der Wahrnehmung der Wesen der Atomwelt als reale Möglichkeitswesen finden wir im aristotelischen Konzept der Vermischung ( $\mu\acute{\iota}\xi\iota\varsigma$ ), das die Grundlage seiner Theorie über die Zusammensetzung der Elemente darstellt ( $\sigma\tau\omicron\iota\chi\epsilon\iota\alpha$ ).<sup>20</sup> Hier lautet die grundlegende Frage, was mit den Elementen im gemischten Zustand passiert, für den Folgendes gilt: (1) Vollständige qualitative Veränderung ( $\acute{\alpha}\lambda\lambda\omicron\iota\omega\sigma\iota\varsigma$ ), d.h. die Eigenschaften des gemischten Zustands unterscheiden sich von den Eigenschaften der betrachteten Elemente, (2) vollständige Homogenität, d.h. jeder Teil des gemischten Zustands ist identisch mit dem Ganzen (GC 328a9–11) und (3) die Möglichkeit, die konstitutiven Elemente aus dem gemischten Zustand zu extrahieren (GC 327b23–30). Wenn man beispielsweise annimmt, dass der gemischte Zustand durch die Mischung der Elemente A und B entstanden ist, dann

<sup>19</sup> Die Diskussion über die Prinzipien der Superposition in der Quantenmechanik sowie die Diskussion über die nicht klassischen Eigenschaften der Quanten-Superpositionen, gehört zu den Hauptmomenten in fast jeder Darstellung der Quantenmechanik. Wir werden deshalb darüber nicht weiter diskutieren, sondern verweisen auf z.B. Schlegel (1980).

<sup>20</sup> Über Aristoteles Theorie der Vermischung siehe Sharvy (1983), Needham (2002) und Wood & Weisberg (2004).

können folgende drei Existenzmöglichkeiten dieser Elemente in Bezug auf den endgültigen gemischten Zustand angenommen werden: (a) sowohl A als auch B bestehen im gemischten Zustand, (b) weder A noch B bestehen im gemischten Zustand und (c) entweder A oder B besteht im gemischten Zustand, während das jeweils andere Element verschwunden ist. Jedoch, so der Einwand von Aristoteles, ist der gemischte Zustand in allen drei Fällen unmöglich, da: (a') das Vorhandensein von A und B im endgültigen gemischten Zustand die Aufforderung nach Homogenität zerstört, (b') das Nichtvorhandensein der Elemente A und B im endgültigen gemischten Zustand bedeutet, dass diese Elemente im Prozess der Mischung verschwunden sind, dass aber das Nichtexistierende sich nicht vermischen kann, und (c') wenn eins der Elemente A und B im gemischten Zustand dominiert, während das andere vernichtet ist, dann kann der endgültige gemischte Zustand keine wirkliche Vermischung der Elemente A und B sein. Aristoteles sieht einen Ausweg aus dieser Schwierigkeit darin, dass die Elemente in der Vermischung der Möglichkeit nach und nicht der Wirklichkeit nach existieren (*GC* 327b23–27, 327b29–32). Natürlich entspricht die aristotelische 'Vermischung' eigentlich dem, was in der Quantenmechanik als 'reiner Zustand' bezeichnet wird, während das, was in der Quantenmechanik 'gemischter Zustand' genannt wird, eher dem entsprechen würde, was bei Aristoteles σύνθεσις und κράσις genannt wird. Diese terminologische Inversion verändert jedoch keinesfalls den Sinn unseres Vergleichs.<sup>21</sup>

### **Das Problem der verwirklichten Wesen (ἐνεργεία ὄντα) der Atomwelt**

Indem man die Wesen der Atomwelt als real wahrnimmt δυνάμει ὄντα, wie dies im letzten Abschnitt geschehen ist, ist die Absicht, eine aristotelische Interpretation der Quantenmechanik zu präsentieren, nicht vollständig erfüllt. Bereits bei Aristoteles wird die Materie als Möglichkeit "derjenigen Dinge, die 'nach Etwas' sind (πρός τι)" (*Phys.* 149b9) angesehen, wodurch auf das im Hinblick auf die Wirklichkeit grundlegende Relationsmerkmal der Möglichkeit hingewiesen wird. Deshalb muss man bei der Suche nach einer aristotelischen Interpretation der quantenmechanischen Formulierung des Seins der Atomwesen auch dieses ganz

---

<sup>21</sup> Heisenberg benutzt in diesem Zusammenhang den Begriff 'koexistierende Zustände', wobei er davon ausgeht, dass dieser Begriff nicht als widersprüchlich betrachtet werden soll, weil hier keine Rede von einer Koexistenz der sich gegenseitig ausschließenden aktuellen Zuständen ist, sondern von den sog. 'koexistierenden Möglichkeiten', bei denen "eine Möglichkeit die andere einschließt oder mit anderen Möglichkeiten sich überlappen kann" (1958: 185).



spezifische Relationsmerkmal in Betracht ziehen. Insbesondere aber soll folgende Frage gestellt werden: Wie werden  $\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\epsilon\iota \acute{\omicron}\nu\tau\alpha$  der Atomwelt zu  $\acute{\epsilon}\nu\epsilon\rho\gamma\epsilon\acute{\iota}\alpha \acute{\omicron}\nu\tau\alpha$ , d.h. wie kommt es zur Verwirklichung des realen Möglichkeitswesens der Atomwelt? Natürlich existiert in diesem Zusammenhang eine intuitive Annahme, die uns suggeriert, dass die Realisierung eines Möglichkeitswesens der Atomwelt mit den Messgeräten verbunden ist, beziehungsweise mit der experimentellen Aufstellung ganz allgemein. Dies ist verständlich, da – im Unterschied zur klassischen Physik, die die in ihrem Erfahrungsbereich sich befindenden Körper aus unserem Alltag als Wirklichkeitswesen ansieht – für die Quantenmechanik die experimentelle Aufstellung und nicht der absolute Raum und die absolute Zeit die zentrale Dimension darstellt, in der sich die atomaren Erscheinungen ereignen. Die experimentellen Geräte sind hier nicht nur als bloße Instrumente, als unaufdringliche Vermittler zwischen dem Menschen und der Atomwelt anzusehen, von denen zumindest prinzipiell abstrahiert werden kann, sie sind vielmehr als irreversible makroskopische Deutung der atomaren Sache in einer angemessenen experimentellen Aufstellung ein unteilbarer Teil jeder atomaren Erscheinung. Heisenberg behauptete, dass “der Übergang vom ‘Potentiellen’ zum ‘Aktuellen’ während der Beobachtung stattfindet”, beziehungsweise “sobald es zu einem Zusammenwirken zwischen Objekt und Messapparat kommt”, wobei “die Beobachtung selbst die Wahrscheinlichkeitsfunktion diskontinuierlich verändert (...), indem unter allen möglichen Ereignissen das ausgewählt wird, das sich wirklich ereignet hat” (1958: 54). Diese angenommene Realisierung der Möglichkeitswesens der Atomwelt stellt nicht nur eine der großen interpretativen Schwierigkeiten der Quantenmechanik dar, sondern sie ist auch eine wichtige Herausforderung für ihre aristotelische Interpretation.

Um uns diese Schwierigkeit bewusst zu machen, soll die Frage gestellt werden, was eigentlich passiert, wenn sich das atomare Wesen  $\mathcal{O}$ , das durch die Superposition  $\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$  dargestellt wird, in Wechselwirkung mit dem Messapparat  $\mathcal{M}$  sich befindet, der angemessen vorbereitet ist, um den Zustand des Objekts  $\mathcal{O}$  entweder als  $\Psi_1$  oder als  $\Psi_2$  aufzudecken? Wie werden diese Zustände verwirklicht? Um diesen Prozess zu verstehen, ist es angebracht, von der unwiderlegbaren Tatsache auszugehen, dass  $\mathcal{M}$ , obwohl es ein Wesen aus unserer alltäglichen Erfahrung darstellt, aus einer Art Materie atomaren Ursprungs besteht (Elektron, Proton, Neutron usw.), d.h. wir müssen von der Annahme ausgehen, dass es mittels (quantenmechanischer) Gesetze zu beschreiben ist, wie dies bei den Wesen der Atomwelt der Fall ist. Wenn wir aber das Messgerät selbst als ein quantenmechanisches Objekt auffassen, dem eine Zustandsfunktion  $\Phi$  zugeschrieben wird (wenn wir also das Gerät als ein bestimmtes  $\delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\epsilon\iota \acute{\omicron}\nu$  behandeln), dann ist der Endzustand des vereinten Systems

$\mathcal{O}+\mathcal{M}$  – in Übereinstimmung mit dem Gesetz der sog. unitären Revolution – die Superposition  $\Psi(\mathcal{O}+\mathcal{M}) = \alpha\Phi_1\Psi_1 + \beta\Phi_2\Psi_2$  und nicht der Zustand des Messgerätes  $\mathcal{M}$  in der Korrelation mit dem Zustand des Objektes  $\mathcal{O}$  oder in der Form  $\Phi_1\Psi_1$  (wobei der Zustand des Objektes als  $\Psi_1$  enthüllt wird) bzw. in der Form  $\Phi_2\Psi_2$  (wobei der Zustand des Objektes als  $\Psi_2$  enthüllt wird). Folglich gilt nicht nur, dass das Messgerät  $\mathcal{M}$  das Objekt  $\mathcal{O}$  nicht in einen definitiven Zustand überführt hat, vielmehr ist auch das Gerät selbst von der Möglichkeit ‘infiziert’. Mit anderen Worten: Nicht nur, dass  $\mathcal{O}$  sich in keinem definitiven Zustand befindet, vielmehr befindet sich auch das Messgerät  $\mathcal{M}$  nicht in einem solchen.<sup>22</sup> Natürlich ließe sich ein neues Messgerät  $\mathcal{M}'$  einführen, der das vereinte System  $\mathcal{O}+\mathcal{M}$  mit der Absicht ‘beobachten’ würde, das, was  $\mathcal{M}$  über  $\mathcal{O}$  entdeckt hat, in Erfahrung zu bringen. Wenn wir aber auch dieses neue Gerät quantenmechanisch behandeln, wird sich diese problematische Situation notwendigerweise wiederholen, da  $\mathcal{M}'$  selbst zum Teil des komplexen quantenmechanischen Systems  $\mathcal{O}+\mathcal{M}+\mathcal{M}'$  wird. Dasselbe würde auch mit einem dritten Messgerät passieren, mit einem vierten und so weiter *ad infinitum* mit allen neuen Messgeräten. Was dadurch entsteht ist eine endlose ontische Kette der Möglichkeitswesen  $\mathcal{O}+\mathcal{M}+\mathcal{M}'+\mathcal{M}''+\dots$  (in der Quantenmechanik bekannter als Neumannsche Kette), bei der keines der Wesen das vorgehende Wesen verwirklichen kann. Im Gegensatz zu diesem streng formal ausgeführten Beschluss zeigt uns unsere Erfahrung, dass die Realisierung der Wesen der Atomwelt mit definitiven Eigenschaften durchaus möglich ist. Dieser Konflikt zwischen dem Formalen und dem auf Erfahrung Beruhenden steht im Mittelpunkt des bekannten Messproblems in der Quantenmechanik, das je nach Kontext mit Recht als Wirklichkeitsproblem in der Quantenmechanik bezeichnet werden kann.

Wir werden uns allerdings nicht umfassend mit diesem Problem beschäftigen, das nicht nur den zentralen Punkt jeder Interpretation der Quantenmechanik darstellt, sondern auch den zentralen Punkt zur Unterscheidung der heutzutage zahlreichen, unterschiedlichen Interpretationen der Quantenmechanik bildet, die nach Zahl und Unterschiedlichkeit ihrer epistemologischen Ausgangspositionen in vielerlei Hinsicht alle Interpretationen der Vorquantentheorien übersteigen. Uns interessiert vor

---

<sup>22</sup> Auf diesen zweifelhaften Beschluss sollte auf eine amüsante Art und Weise das bekannte Katzenparadoxon Schrödingers aus dem Jahr 1935 aufmerksam machen. Es handelt sich dabei darum, dass in Übereinstimmung mit dem Formalismus der Quantenmechanik die sog. makroskopischen Körper aus unserer alltäglichen Erfahrung, wozu auch die Messgeräte gehören (Schrödinger vergleicht sie mit Katzen), in bestimmten Situationen zwei – logisch betrachtet – sich ausschließende Positionen einnehmen sollten, beispielsweise würde der Zeiger eines Messgeräts gleichzeitig auf zwei unterschiedliche Seiten zeigen (und die Katze wäre gleichzeitig lebendig und tot).

allem die Problemlösung innerhalb der Kopenhagener Interpretation und schließlich die Möglichkeit, diese Deutung der Wirklichkeitsproblematik in der Quantenmechanik mit der Thematisierung der Wirklichkeit bei Aristoteles zu vergleichen. Das letztere wird deutlich erleichtert durch die Tatsache, dass Aristoteles sich ausführlich der Wirklichkeitsproblematik und der Relation dieses Begriffes zur Möglichkeit widmet, vor allem indem er dieses Verhältnis im Kontext der Bewegung (κίνησις) und der Veränderung (μεταβολή) ganz allgemein betrachtet, was als “Verwirklichung eines Möglichkeitsmomentes an einem Gegenstande” (*Phys.* 201a 10–11, *Phys.* 201b6–7) definiert wird. Dieses Verhältnis fasst Aristoteles in seiner ganz allgemeinen Forderung hinsichtlich des dreifachen Vorrangs der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit – und hinsichtlich der Zeit (χρόνος), des Begriffs oder der Erkenntnis (λόγος) sowie hinsichtlich des Seins (οὐσία). Dies gilt sowohl für die natürlichen (*phusei onta*) als auch für die künstliche Wesen (*technei onta*), also für die, die das Bewegungsprinzip (ἀρχή κινήσεως) beinhalten (*Phys.* 192b13–15), ebenso wie für die, die dieses Prinzip außerhalb ihrer selbst in den anderen Wesen haben (*Phys.* 192b30–31).<sup>23</sup>

Der Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit im Hinblick auf die Zeit drückt den ganz allgemeinen ontischen Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit aus. Das einzelne Möglichkeitswesen in der Zeit ist ursprünglicher als das entsprechende Wesen, das seine Verwirklichung darstellt, so wie z.B. die Eichel (ihrer Möglichkeit nach eine Eiche) vor der Eiche selbst existiert, zu der sie heranwächst, oder wie die amorphe Tonmasse (ihrer Möglichkeit nach die Skulptur von Aristoteles) vor der angefertigten Skulptur Aristoteles bereits besteht. Unter dem Begriff ‘Vorrang’ wird hier nicht die einfache Tatsache gemeint, dass immer aus einem Wesen, das der Möglichkeit nach ist, ein Wesen entsteht, das Wirklichkeit ist, sondern der Vorrang wird im Verhältnis zum Bewegungsursprung des Möglichkeitswesens, d.h. im Verhältnis zur Ursache seiner Verwirklichung konzipiert. Diese Ursache, so Aristoteles, kann einzig gebildet werden “aus dem Vermögen nach Seienden durch etwas, das in Wirklichkeit ist [...], indem jedesmal etwas als erstes bewegt; das Bewegende aber ist schon in Wirklichkeit” (*Metaph.* 1049b24–26). So existiert eine Eichel (als Möglichkeitswesen) auch vor der Eiche, zu der sie heranwachsen wird (Wirklichkeitswesen), aber im Hinblick auf die Bewegungsursache der Eichel selbst, d.h. im Hinblick auf die Ursache der Verwirklichung des reifen Eichenbaums, existiert die Eichel selbst erst nach einem anderen reifen Eichenbaums, der nicht nur diese Eichel pro-

<sup>23</sup> Zum dreifachen Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit siehe z.B. Witt (2003), und Cleary (1988), insbesondere die Seiten 57–61.

duziert hat, sondern auch den Grund ihres (inneren) Bewegungsprinzips darstellt, auch nachdem die Eichel sich von der Eiche, von der sie hervorgebracht wurde, getrennt hat. Dementsprechend besteht die amorphe Tonmasse (Möglichkeitswesen) bereits vor der Anfertigung der Skulptur von Aristoteles (als eines verwirklichten Wesens), zudem ist die (äußere) Ursache der Verwirklichung der Tonmasse als fertiger Skulptur der Bildhauer, der über die aktive Fähigkeit verfügt, diese Veränderung zu vollbringen.<sup>24</sup> Der Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit kommt dadurch zum Ausdruck, dass sich das Möglichkeitswesen (δυνάμει ὄν) immer durch ein anderes Wesen, das bereits als Wirklichkeitswesen (ἐνεργεία ὄν) existiert, verwirklicht, d.h. dass der Übergang von “ $\emptyset$  ist durch Möglichkeit  $F$ ” zu “ $\emptyset$  ist durch Wirklichkeit  $F$ ” nur mittels Wesen, die bereits Wirklichkeit sind, vollzogen werden kann.

Gemäß der Forderung nach dem Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit im Hinblick auf den Begriff oder die Erkenntnis (“der Begriff und die Erkenntnis der Wirklichkeit [geht] dem Begriff und der Erkenntnis des Vermögens voraus”; *Metaph.* 1049b16–17), besteht die Erkenntnis des Wirklichen deshalb vor der Erkenntnis des Möglichen, weil wir uns auf die dazugehörige Wirklichkeit berufen müssen, wenn wir über die Möglichkeit selbst sprechen. So ist beispielsweise die Eichel als mögliche Eiche nur aufgrund der Ähnlichkeit zwischen Eichel und Eiche erkennbar, die wiederum ihre Verwirklichung darstellt, und die Möglichkeit der amorphen Tonmasse, zur Skulptur des Aristoteles zu werden, lässt sich nur durch die Ähnlichkeit mit der fertigen Skulptur des Aristoteles begreifen. Oder wie dies Aristoteles selbst sagt: “Also wird offenbar das dem Vermögen nach Seiende durch Erhebung zu wirklicher Tätigkeit gefunden” (*Metaph.* 1051a29–30), beziehungsweise “die zugrunde liegende Wesenheit aber wird erkennbar aus einer Verhältnisgleichung” (κατ’ ἀναλογίαν; *Phys.* 191a7). Der im Hinblick auf Begriff und Erkenntnis gegebene Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit artikuliert somit die Unumgänglichkeit und die Notwendigkeit von Wirklichkeitsbegriffen bei der Beschreibung des Möglichen, welches sich, bevor es eine bestimmte Form annimmt, in einem Zustand der Negation beziehungsweise der Nichtvorhandenheit (στέρησις) der Merkmale der Wirklichkeitswesen befindet, außer jener negativen wie der (relativen) Formlosigkeit, Unbestimmtheit, Unerkennbarkeit usw.

Schließlich ist die Wirklichkeit aufgrund der Forderung nach einem Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit auf der Ebene des Seins dem Vermögen vorgängig: “Aber auch der Wesenheit (*ousia*) nach ist sie es. Erstens weil das, was der Entstehung nach später ist, der Form

<sup>24</sup> Siehe Fußnote 16.

(*eidos*) und der Wesenheit nach früher ist, z.B. der Mann früher als das Kind, der Mensch früher als der Same, denn das eine hat schon die Form, das andere aber nicht" (*Metaph.* 1050a4–7). Außerdem besteht die Wirklichkeit dem Sein nach vor der Möglichkeit, da "alles, was entsteht, auf ein Prinzip (*arché*) und ein Ziel (*télos*) hingeht. Prinzip nämlich ist das Weswegen, und um des Zieles willen ist das Werden. Ziel aber ist die Wirklichkeit, und um ihretwillen erhält man das Vermögen." (*Metaph.* 1050a7–10). Die Vorgängigkeit der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit in der Sphäre des Seins wird von Aristoteles auf zweifache Weise hergestellt. Zum einen wird dadurch das zweite wichtige Merkmal des eigenen ontologischen Systems artikuliert, dass nämlich die Form als aktives Prinzip gegenüber dem passiven Prinzip der Materie anzusehen ist, da *τέλος* dasjenige ist, was jede Verwirklichung anstrebt ("Ferner ist der Stoff dem Vermögen nach, weil er zur Form gelangen kann; sobald er aber in Wirklichkeit ist, dann ist er in der Form." *Metaph.* 1050a 15–16), zum anderen wird die Tatsache hervorgehoben, dass bei der Realisierung des Möglichkeitswesens (*causa materialis*) die Wirklichkeit die Ursache (*αἴτιον*; *Phys.* 194b23ff.) dieser Verwirklichung ist, nicht nur im Sinne der aktiven Ursache (*causa efficiens*), derjenigen also, aus der sich "die Ursache des Bewegens und des Ruhens" ergibt. Wenn wir beispielsweise annehmen, dass die Eichel ihre Möglichkeit, zu einem reifen Eichenbaum zu werden, realisiert hat, dann ist in diesem Verwirklichungsprozess nicht nur die aktive Ursache am Werk (ein anderer reifer Eichenbaum, der die Eichel produziert hat und folglich bereits vor der Eichel besteht), sondern auch die formale Ursache (*εἶδος* die diese Verwirklichung definiert), und schließlich die finale Ursache als *τέλος*, nach der sich die Eichel entfaltet (der wirkliche reife Eichenbaum). Der Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit im Hinblick auf die Kategorie des Seins beinhaltet schließlich die Tatsache, dass die Wirklichkeit die Ursache ist für die Verwirklichung des Möglichkeitswesens auch im Sinne der formalen Ursache (*causa formalis*), bzw. "der Form und des Vorbilds" und der finalen Ursache (*causa finalis*), also im Sinne desjenigen, "weshalb etwas ist".

Dieser dreifache Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit bei Aristoteles ist mit der dreifachen Forderung der Kopenhagener Interpretation im Kontext des Messproblems, also mit der Beobachtung in der Quantenmechanik vergleichbar. Dabei geht es um die Forderung nach einer klassisch-physikalischen Natur der Messapparate, nach der Unumgänglichkeit des Gebrauchs der sog. klassischen Begriffe (der Begriffe der klassischen Physik), also die Forderung nach dem *a priori* Charakter dieser Begriffe und nach der Einheitlichkeit der Quantenerscheinung. Dies soll im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

## Der dreifache Vorrang der Wirklichkeit und die Quantenmechanik

Im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, dass das sog. Messproblem in der Quantenmechanik deshalb erscheint, weil die Messapparate selbst als quantenmechanische Systeme behandelt werden, beziehungsweise in einer etwas traditionelleren Sprache, als reale Möglichkeitswesen. Jedoch steht das, wie dies gleichfalls hervorgehoben wurde, im Widerspruch zur Erfahrung, weshalb die unendliche ontische Kette der Möglichkeitswesen  $\mathcal{O} + \mathcal{M} + \mathcal{M}' + \mathcal{M}'' + \dots$  irgendwo mit Sicherheit unterbrochen werden muss, was allem Anschein nach bereits beim ersten Messapparat  $\mathcal{M}$  geschieht. Genau dies bildet die Grundlage für die Forderung nach Auflösung des Messparadoxons innerhalb der Quantenmechanik im Rahmen der Kopenhagener Interpretation, in der, wie dies Murdoch zusammenfassend behauptet, “das Messproblem [...] mit der Wurzel ausgerissen” wird, indem sie bereits im Voraus eine “Art der theoretischen Handhabung des Messprozesses, die zum Problem führt”, verbietet (1987: 114).

Die Betrachtung des Messapparats  $\mathcal{M}$  als Objekt schließt nämlich, so Bohr, die Wahrnehmung der Wechselwirkung  $\mathcal{O} + \mathcal{M}$  als *Messprozess* und des Messapparats  $\mathcal{M}$  als *Messapparatur* aus. Wenn man aber ein definitives Messergebnis haben will, dann muss “*ein fundamentaler Unterschied zwischen den Messapparaturen und den Objekten, die man untersucht*”, gemacht werden (1963: 3).<sup>25</sup> Die Messapparate sind also dadurch, dass sie *als* Messapparate dienen, selbst Wesen von einer ausschließlich klassisch-physikalischen Natur, wobei sich ihre ‘klassische’ Natur in der Tatsache ihrer relativ massiven ‘makroskopischen’ Eigenschaften zur Geltung bringt, die sich ihrerseits in der Endgültigkeit ihrer Zustände äußert und schließlich in der Möglichkeit, sie mittels einer Begrifflichkeit aus der alltäglichen Erfahrung zu beschreiben. Das alles sind diejenigen Grundeigenschaften, die, wie bereits oben gezeigt wurde, ein Wesen zu einem Wirklichkeitswesen machen: So wie dies auch Herbert bemerkte, bedeutet die Tatsache, dass den “Messapparaturen ein spezieller Status zugeschrieben wird”, nichts anderes, als die Zuschreibung einer Existenzmodalität im Sinne der “klassischen Wirklichkeitsmodalität (*classical-style actuality*), die die atomaren Entitäten nicht besitzen” (1985: 96). Eine endlose on-

---

<sup>25</sup> Den Hintergrund dieses scheinbar zirkulären Arguments bildet die Annahme einer Unbestimmtheit der Messwechselwirkungen, da die Möglichkeit der Bestimmtheit dieser Wechselwirkungen bedeutete, dass der Messapparat sowohl als Objekt als auch als Messapparat behandelt wird, was dazu führte, dass ein definitives Ergebnis nicht möglich wäre. Die Unbestimmtheit und die prinzipielle Unmöglichkeit die Messwechselwirkung (was den endgültigen Energie- und Impulswechsel zwischen dem Objekt und dem Messapparat beinhaltet) zu vernachlässigen, stellt das Hauptmerkmal der Messung dar, d.h. der Beobachtung ganz allgemein in der Quantenmechanik. Siehe dazu z.B. Bohr (1937).

tische Kette der Möglichkeitswesen  $\mathcal{E} + \mathcal{M} + \mathcal{M}' + \mathcal{M}'' + \dots$  wird somit durch den ersten Messapparat  $\mathcal{M}$  unterbrochen, weil er eben ein *Messapparat*, d.h. ein klassisch-physikalisch beschreibbares Wirklichkeitswesen aus unserer alltäglichen Erfahrung ist, im Unterschied zum Objekt  $\mathcal{E}$ , das *an sich* das Möglichkeitswesen darstellt und sich mit den abstrakten Begriffen der Quantenmechanik beschreiben lässt. Dies wiederum deckt sich vollständig mit der Aufforderung Aristoteles, dass der Übergang von “ $\mathcal{E}$  ist durch Möglichkeit  $F$ ” zu “ $\mathcal{E}$  ist durch Wirklichkeit  $F$ ” nur mittels der bereits bestehenden Wirklichkeitswesen vollzogen werden kann.

Bei Realisierung der Möglichkeitswesen der Atomwelt geht es jedoch nicht nur um die Leistung unserer Messgeräte und experimentellen Apparate als einer aktiven Ursache (*causa efficiens*). Sie ist, wie bereits berichtet wurde, von der jeweiligen Situation abhängig, bzw. die Möglichkeitswesen der Atomwelt werden je nach gegebener experimenteller Situation verwirklicht. Dieser Umstand wird gewöhnlich als *Gesamtheit der Quantenerscheinungen* bezeichnet, ganz im Sinne der Bemühungen Bohrs für eine “Anwendung des Wortes ‘Erscheinung’ auf Beobachtungen, die unter ganz bestimmten spezifischen Bedingungen durchgeführt werden, einschließlich des Berichts über den gesamten Messapparat” (1958: 64). Dabei sei es allerdings “unmöglich, eine strenge Trennlinie zwischen dem unabhängigen Verhalten der atomaren Objekte und ihrem Zusammenwirken mit den Messapparaten zu ziehen, die für die Definition der Bedingungen, unter denen eine bestimmte Erscheinung auftreten kann, zuständig sind” (Bohr, 1985: 42). Die Gesamtheit der Quantenerscheinungen, die sich in der Tatsache widerspiegelt, dass die Atomwesen als Erscheinungen je nach gegebener experimenteller Situation transformierbar sind, weist darauf hin, dass der Übergang von “ $\mathcal{E}$  ist durch Möglichkeit  $F$  und  $G$ ” (im Falle eines Möglichkeitswesen, das in sich die unterschiedlichen Möglichkeiten der eigenen Verwirklichung vereint) bis zu “ $\mathcal{E}$  ist durch Wirklichkeit  $F$ ” oder “ $\mathcal{E}$  ist durch Wirklichkeit  $G$ ” nicht nur durch die Natur des Objekts  $\mathcal{E}$  als Möglichkeitswesen definiert wird, sondern auch durch den Messapparat  $\mathcal{M}$  (z.B. je nach dem, ob es sich um einen Interferometer oder um einen Detektor handelt).<sup>26</sup> Wie dies

<sup>26</sup> Beispielsweise hängt im bekannten Doppelspaltexperiment das endgültige Ablesen des atomaren Objekts davon ab, ob die Blende mit Schlitzen auf eine massive unbewegliche Unterlage befestigt ist, so dass die relativen Positionen der Schlitze im Hinblick auf die photographische Platte hinter dem Schlitz während des Experiment fix sind, oder ob die Blende an leichten Federn hängt. Im ersten Fall ist es nicht möglich den Impulswechsel zwischen dem atomaren Objekt und der Blende mit Schlitzen zu kontrollieren, weshalb es nicht möglich ist, zu erfahren, durch welchen der beiden Schlitze das atomare Objekt hindurchgegangen ist; folglich ist die sich daraus ergebende Struktur auf der photographischen Platte eine interferente Struktur, wodurch die Welligkeit des atomaren Objekts

Bohm definiert hat, sind die Quanteneigenschaften der Dinge “unvollständig definierte Potentialitäten (*incompletely defined potentialities*), deren Entwicklung von demjenigen System abhängig ist, mit dem das Objekt zusammenwirkt, aber auch von den Objekten selbst” (1951: 132). Der Messapparat  $\mathcal{M}$  oder präziser – die Gesamtheit der (im klassisch-physikalischen Sinne beschreibbaren) experimentellen Situation – vereint also sowohl die *causa finalis* als auch die *causa formalis* der Verwirklichung eines möglichen Atomwesens, also etwa (im Kontext des hinsichtlich der Dualität des Seins der Atomwesen bestehenden Dilemmas) ‘die Wirklichkeitswelle’ oder ‘das Wirklichkeitsteilchen’ (τέλος), beziehungsweise die ‘Teilchenhaftigkeit’ oder die ‘Welligkeit’ (λόγος). In diesem Sinne ist die Wirklichkeit in der Quantenmechanik auch im Hinblick auf das Sein vorrangig. Hier muss jedoch betont werden, dass diese Präsenz der vier traditionellen ‘Ursachen’ im Mess- oder Beobachtungsprozess in der Quantenmechanik keinesfalls die Einführung irgendeiner Zweckmäßigkeit in die natürlichen Prozesse bedeutet. Gerade in diesem Punkt wurde übrigens die aristotelische “Ursachentheorie” oft kritisiert. Für die moderne Wissenschaft ist die Behauptung einer Zweckmäßigkeit natürlicher Prozesse ohnehin etwas, was ihren Definitionen widerspricht. Die vier traditionellen ‘Ursachen’ im Mess- oder Beobachtungsprozess dürfen folglich nicht als “Ursachentheorie” verstanden werden, sondern man muss sie im Sinne einer ‘Erklärungstheorie’, bzw. im Sinne eines vierfachen Warums (*four because*s) begreifen, wobei die Erklärung (als Antwort auf die Frage nach dem ‘Warum?’) durch ein deduktives Argument konstruiert wird (Hoccut, 1974).

Schließlich ist in der Quantenmechanik der Vorrang der Wirklichkeit gegenüber der Möglichkeit auch auf der Ebene des Begriffs bzw. der Erkenntnis gegeben, was sich in der Forderung der Kopenhagener Interpretation nach einem Gebrauch der sog. klassischen Begriffe, bzw. der Begriffe der klassischen Physik und schließlich der Begriffe aus der alltäglichen Erfahrung zur Verständigung über atomare Prozesse widerspiegelt. Nämlich, so Bohr, “unabhängig davon, ob die Quantenleistungen die Reichweite der klassisch-physikalischen Analyse transzendieren, müssen der Bericht über die experimentelle Konstellation und die Ergebnisse der

---

aufgedeckt wird. Im zweiten Falle ist der Impulswechsel zwischen dem atomaren Objekt und der Blende mit Schlitzen auf eine präzise Art und Weise kontrollierbar, die es uns ermöglicht, zu erkennen, durch welche der Schlitze das Objekt hindurchgegangen ist. Allerdings ist in diesem Falle die Unbestimmbarkeit der Position der Blende mit Schlitzen eine Größe aus derselben Reihe wie dies auch die Entfernung zwischen den Interferenzstreifen ist, weshalb folglich auf der photographischen Platte keine Interferenzmuster zu sehen ist, durch die die Teilchenhaftigkeit des atomaren Objekts aufgedeckt werden. Siehe Bohr (1958: 32–66), vergleiche Murdoch (1987: 87–94) und Jammer (1974: 127–129).



Beobachtung stets in einer alltäglichen Sprache, die durch die Terminologie der klassischen Physik angereichert wurde, ausgedrückt werden” (Bohr, 1958: 39). Den Begriffen aus dem Bereich der klassischen Physik wird eine herausragende und unumgängliche Rolle für die Erkenntnis zugeschrieben, und dies nicht nur deshalb, weil die Sprache der klassischen Physik die einzige ist, die eine zweifelsfreie Kommunikation nicht nur unter den Physikern garantiert, insofern man sich mit “dem Wort ‘Experiment’ auf eine Situation bezieht, in der es möglich ist, anderen mitzuteilen, was wir getan und gelernt haben” (Bohr, 1958: 39), sondern auch deshalb, weil die Sprache der klassischen Physik, wie dies zusätzlich Lelas verdeutlicht, “eine verfeinerte Alltagssprache ist, eine Sprache, die sich durch Jahrhunderte im engen Kontakt des Menschen mit seiner unmittelbaren Umwelt entwickelt hat, mit einer Welt also, der er täglich begegnet und der der Mensch im Laufe der Zeit viele seiner Aktivitäten angepasst hat, insbesondere die Sprache selbst”, die letztendlich “die Sprache aller physikalischen Experimente” ist (1977: 131).<sup>27</sup> Dementsprechend, so Bohr, lässt uns das Ziel jedes physikalischen Experiments – das sich als “Erlangung von Wissen unter wiederholbaren Bedingungen, die mitgeteilt werden können” definieren lässt, eigentlich “keine andere Möglichkeit, als dass wir alltägliche Begriffe verwenden, vielleicht gereinigt durch die Terminologie der klassischen Physik, nicht nur in den Berichten über die Konstruktion und die Handhabung der Messinstrumente, sondern auch bei der Beschreibung der erzielten experimentellen Ergebnisse” (1958: 25). Mit anderen Worten, alle Informationen, die wir über die Atomwesen bekommen, ergeben sich aus der Anwendung von Messapparaten, die eine makroskopische Natur aufweisen, wobei bei der Beschreibung ihrer Natur notwendig die Begriffe der klassischen Physik benutzt werden müssen.<sup>28</sup> Deshalb erscheint alles, was wir über die Wesen der Atomwelt als Interphänomene wissen können, bloß in der Form einer Interpolation innerhalb der Welt der klassisch-physikalisch beschreibbaren Erscheinungen, bzw. aufgrund der Ähnlichkeit zwischen den Wesen der Atomwelt und den verwirklichten Wesen. Hierin liegt gleichzeitig der Schlüssel zur ‘Paradoxie’ der Atomwelt als Welt *an sich*.

---

<sup>27</sup> Mehr zum Verhältnis zwischen Sprache, Erfahrung und Wissenschaft siehe bei Lelas (2000).

<sup>28</sup> Die Forderung nach einem *a priori* Charakter der ‘klassischen Begriffe’ bei Bohr wird von vielen Autoren auf einen starken Einfluss durch Kants zurückgeführt. So beispielsweise Murdoch, wenn er Bohrs häufigen Gebrauch der Phrase ‘Formen der Wahrnehmung’ (*forms of perception*) als Äquivalent für die Sinne und die Kategorien der Vernunft versteht, und behauptet, dass der “Kantsche Charakter” (der Bohrschen) Ausgangsposition unverkennbar sei: Die Wahrnehmungsformen bilden die Grundlage für die Möglichkeit unserer Sinneserfahrung und für den Sinn der Begriffe, die wir verwenden um diese Erfahrung zu beschreiben” (Murdoch, 1987: 73–74).

Die gerade erwähnte ‘Paradoxie’ scheint unumgänglich zu sein. Dies wird insbesondere sichtbar, wenn man sich etwas näher die ganz spezifische Genealogie der Physik als Wissenschaft ansieht, vor allem die Tatsache, dass die Physik “mit der Mechanik angefangen hat, von Optik und Thermodynamik fortgesetzt wurde, um über die Elektrodynamik zur Relativitätstheorie und zur Quantenmechanik zu gelangen” (Lelas, 1973: 121), wobei dieser Weg weder als zufällig, noch als reversibel angesehen werden darf. “Diese Genealogie lässt sich” laut Supek “nicht auf den Kopf stellen, noch kann ihre Abfolge wesentlich verändert werden, obwohl sich manche Bereiche überschneiden” oder anders ausgedrückt: “Keines der neueren Wissenschaftsgebiete lässt sich als ein System, das unabhängig von bereits existierenden wissenschaftlichen Gebieten ist, konstruieren, vielmehr knüpfen sie organisch an die alten Systeme an, die sich den neuen Erkenntnissen zwar anpassen, aber dadurch doch nicht grundsätzlich verändert werden” (1991: 234). Dabei ist die “Atomphysik [als die Erkenntnis des Möglichen, B. K.] auf ihrem klassischen Baum fest aufgepropft [als Verkörperung der Wirklichkeitserkenntnis, B. K.]”, da “der ganze minutiöse Formalismus der Quantenmechanik eine physikalische Bedeutung erst im Verhältnis zu den makroskopischen Rahmen und Gesetzen annimmt” (Supek, 1991: 236),<sup>29</sup> und zwar auf dieselbe Art und Weise, wie – so Aristoteles – “das dem Vermögen nach Seiende durch Erhebung zu wirklicher Tätigkeit gefunden” (*Metaph.* 1051a29–30) wird. Zweifelsohne hatte genau das auch von Weizsäcker im Sinne, als er behauptete: “Die Natur ist älter als der Mensch, aber der Mensch ist älter als die Naturwissenschaft” (1948: 9). Heisenberg kommentierte dies folgendermaßen: “Ihr erster Teil rechtfertigt die klassische Physik, und der zweite Teil begründet, warum wir dem Paradox der Quantenmechanik nicht entweichen können, nämlich aufgrund der Notwendigkeit des Gebrauchs klassischer Konzepte” (1958: 55–56).

### Schlussfolgerung

Die Hauptintention dieses Artikels war, sich mit dem möglichen interpretativen Wert der aristotelischen Lehre von der Möglichkeit (δύναμις) und der Wirklichkeit (ἐνέργεια) im Kontext der Quantenmechanik auseinanderzusetzen, die trotz des eigenen tatsächlichen deskriptiven und prädiktiven Erfolgs immer noch Gegenstand von heftigen interpretatorischen Auseinandersetzungen ist, insbesondere wenn vom Verstehen der Natur der Welt die Rede ist, deren Erscheinungen sie so erfolgreich beschreibt. In diesem Sinne wurde behauptet, dass im Gegensatz zu den

<sup>29</sup> Vergleiche auch Supek (1983: 281–282).

Wesen der klassischen Physik – die immer *das Eins* (τὸ ἓν) und *das Seiende* (τὸδε τι) sind und sich ausschließlich an einem bestimmten, nämlich am eigenen Ort befinden (τόπος ἴδιος) und die alle Eigenschaften der sichtbaren Wirklichkeitswesen aus unserer alltäglichen Erfahrung besitzen (ἐνέργεια ὄντα) – die Wesen der Atomwelt als relativ unbestimmte, aber reale Substanz, deren klassische Eigenschaften je nach gegebener experimenteller Situation durch unsere (klassisch-physikalischen) Messgeräten aufgedeckt werden, alle Eigenschaften der realen Möglichkeitswesen aufweisen (δυνάμει ὄντα). Außerdem war die Absicht des Textes zu zeigen, wie im Prozess der Verwirklichung der Möglichkeitswesen der Atomwelt innerhalb der jeweils gegebenen experimentellen Situation die Wirklichkeit einen Vorrang gegenüber der Möglichkeit besitzt und zwar sowohl im Hinblick auf die Zeit (χρόνος) als auch im Hinblick auf den Begriff oder die Erkenntnis (λόγος) ebenso wie im Hinblick auf das Sein (οὐσία). Worüber in diesem Artikel nicht diskutiert wurde, ist der mögliche interpretative Nutzen einer zusätzlichen und wichtigen Bedeutung der aristotelischen Lehre von der Möglichkeit und der Wirklichkeit für die moderne Physik, insbesondere der Physik der Elementarteilchen. Wenn in diesem Artikel die Wesen der Atomwelt als δυνάμει ὄντα und ihre Verwirklichungen unter unterschiedlichen experimentellen Bedingungen diskutiert wurden, dann war in diesem Kontext in der Regel die Rede von den Veränderungen einiger der Charakteristiken des Seins (οὐσία) der Atomwesen, während das Sein selbst (beispielsweis ein ‘Elektron’) in der Zeit gleich bleibt und seine Identität trotz den Veränderungen behält, die nach der Akzidenz (κατὰ συμβεβηκός) der experimentellen Situation (beispielsweise bei der Verwirklichung des Elektrons als Teilchen oder als Welle) stattfinden.

Wenn sich etwas verändert, so Aristoteles, dann verändert es sich auch seinem Sein nach (κατ’ οὐσίαν), wobei diese Form der Veränderung klar getrennt werden muss von der einfachen Umformung (ἀλλοίωσις). Diese Veränderungsform (GC 319b10–17) ist das Verschwinden (φθορά) des vorhandenen und die Entstehung eines neuen Seins (γένεσις). Aus der Auseinandersetzung mit dieser Veränderungsform lässt sich das herleiten, was von Aristoteles als *Urmaterie* (πρώτη ὕλη), *Endmaterie* (ἡ ἐσχάτη ὕλη) oder *das erste Substrat* (τὸ πρῶτον ὑποκείμενον) dieser Veränderung innerhalb des Seins bezeichnet wird, das in der Zeit bestehen bleibt und zugleich im Verhältnis zu den wirklichen Merkmalen des Seins auch als Möglichkeit anzusehen ist. Die Grundeigenschaft des Substrats ist, dass es “keinem Wesen nach zugrunde geht, sondern ist es im Gegenteil notwendig dem Vergehen (ἄφθαρτον) und Entstehen (ἀγέννητον) entzogen” (Phys. 192a28). Denn wenn die Materie einmal entstanden ist, dann “müsste dazu ein erstes, ihr immanentes, Ausgangsmaterial für sein Werden vorgelegen haben” (Phys. 192a29–30). Man musste folglich die

Existenz einer Substanz annehmen, die vor der Materie selbst existiert und aus der sie entstanden ist. Dies wäre allerdings ein Widerspruch, denn dann würde die Materie “schon bestehen müsste, bevor sie entstehen könnte” (*Phys.* 192a30–31). Auf der anderen Seite wenn die Materie verschwindet “so wäre gerade sie selbst das, was am Ende des Prozesses stehen bliebe, so daß sie also vergangen sein müsste, bevor sie vergangen sein kann” (*Phys.* 192a32–34). Mit anderen Worten, die Urmaterie bei Aristoteles stellt die universelle Invariante aller Veränderungen dem Sein gegenüber ( $\gamma\acute{\epsilon}\nu\epsilon\sigma\iota\varsigma$  καὶ φθορά) dar, die genauso wie eins der wichtigsten Konzepte der modernen Physik – die Energie – trotz der unterschiedlichen Wirklichkeitsbestimmungen des Seins als der geformten Urmaterie weder vernichtet werden, noch *ex nihilo* entstehen kann. Die Auseinandersetzung mit diesem Vergleich jedoch würde den Rahmen dieses Artikels überschreiten.<sup>30</sup>

### Bibliographie

Aristoteles, 1966. *Aristoteles Metaphysik*. Übersetzt von H. Bonitz (Reinbek bei Hamburg: Rowohlt).

— 1983. *Aristoteles Physik Vorlesung*. Übersetzt von H. Wagner (Berlin: Akademie-Verlag).

Bitsakis, E. 1982. “Potentiality and Actuality in Microphysics”. *Scientia* 117, 561–571.

— 1990. “The Physical Meaning of the Superposition Principle”. In: J. Mizerski *et al* (Hrsg.), *Problems in quantum physics: recent and future experiments and interpretations 2* (Singapore: World Scientific), 25–54.

Blair, G. A. 1967. “The Meaning of ‘Energeia’ and ‘Entelecheia’ in Aristotle”. *International Philosophical Quarterly* 7, 102–107.

Bohm, D. 1951. *Quantum Theory* (New York: Dover Publications).

Bohr, N. 1937. “Causality and Complementarity”. *Philosophy of Science* 4, 289–298.

---

<sup>30</sup> Heisenberg hat diesen Vergleich an unterschiedlichen Stellen erwähnt (1952: 103; 1958: 61). Über Heisenbergs Gleichsetzung des aristotelischen Konzepts der ursprünglichen Materie mit dem modernen Konzept der Energie diskutiert Sfendoni-Mentzou (1993; 2000), wobei er sich überwiegend mit der Darstellung der Heisenbergschen Gedanken befasst. Schlossberger (1979) setzt Heisenbergs Theorie fort, insbesondere indem er sich mit den Ähnlichkeiten zwischen dem Konzept der ursprünglichen Materie von Aristoteles und dem Quark-Modell auseinandersetzt. Suppes (1974; 1985) diskutiert allgemein das Konzept der ursprünglichen Materie als Möglichkeit im Kontext der Wahrscheinlichkeitstheorie. Wallace (1967) setzt sich mit der modernen Konzeption der Materie aus scholastischer Perspektive auseinander. Eine kritische Herangehensweise an die Gleichstellung von Energie und ursprünglicher Materie wird von Heelan entwickelt (Heelan (1965), S. 163–166).

- 1958. *Atomic Physics and Human Knowledge* (New York: John Wiley).
- 1963. *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge* (Interscience: New York).
- Born, M. 1926. “Zur Quantenmechanik der Strossvorgänge”. *Zeitschrift für Physik* 37, 863–867; 38, 803–827.
- 1956. “The Interpretation of Quantum Mechanics”. In: *Physics in my Generation* (London & New York: Pergamon Press), 140–150. Erste Ausgabe 1953.
- Chen, C.-H. 1958. “The Relation between the Terms *Energeia* and *Entelecheia* in the Philosophy of Aristotle”. *Classical Quarterly* 8, 12–17.
- Cleary, J. J. 1988. *Aristotle on the Many Senses of Priority* (Carbondale: Illinois University Press).
- Cohen, R. S. & Wartofsky, M. W. (Hrsg.) 1967. *Boston Studies in the Philosophy of Science Vol. III* (Dordrecht: D. Reidel).
- Dirac, P. A. M. 1962. *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford: Oxford University Press).
- Frede, M. 1994. “Aristotle’s Notion of Potentiality in *Metaphysics* Θ”. In: T. Scaltsas, D. Charles, M. L. Gill (Hrsg.), *Unity, Identity and Explanation in Aristotle’s Metaphysics* (Oxford), 173–193.
- Heelan, P. 1965. *Quantum Mechanics and Objectivity: A Study of the Physical Philosophy of Werner Heisenberg* (Martinus Nijhoff: The Hague).
- Heidegger, M. 1981. *Aristoteles. Metaphysik Θ1–3. Von Wesen und Wirklichkeit der Kraft (Sommersemester 1931)*. Gesamtausgabe, Band 33 (Frankfurt am Main: Vittorio Klostermann).
- Heisenberg, W. 1952. *Philosophic Problems of Nuclear Science* (Pantheon Books: New York).
- 1958. *Physics and Philosophy* (New York: Harper).
- 1961. “Planck’s Discovery and the Philosophical Problems of Atomic Physics”. In: *On Modern Physics* (Orion Press, London), 9–10.
- Herbert, N. 1985. *Quantum Reality: Beyond the New Physics* (London: Rider).
- Hocutt, M. 1974. “Aristotle’s four because”. *Philosophy* 49, 385–399.
- Jammer, M. 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley: New York).
- Kant, I. 1787. *Kritik der reinen Vernunft*, 1781(=A), 1787(=B).
- Kneale, W. & Kneale, M. 1962. *The Development of Logic* (Oxford: Oxford University Press).
- Lelas, S. 1973. *Kopenhaška interpretacija kvantne mehanike i posljedice na problem odnosa subjekta i objekta*. Doktorarbeit (Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet).

— 1977. “Filozofija temeljnih pojmova kvantne mehanike”. *Rad JAZU* 374, 93–151.

— 2000. *Science and Modernity* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

Łukasiewicz, J. 1910. “Über den Satz des Widerspruchs bei Aristoteles”. *Bulletin International de l'Academie de Cracovie*, St. 15–38, Classe d'histoire et de philosophie.

Lukoschik, B. 1999. “Aristoteles, Heisenberg und der Begriff der Potentialität”. *Archiv für Begriffsgeschichte* 41, 263–279.

Margenau, H. 1949. “Reality in Quantum Mechanics”, *Philosophy of Science* 16, 287–302.

— 1950. *The Nature of Physical Reality* (New York: McGraw-Hill).

— 1954. “Advantages and Disadvantages of Various Interpretations of the Quantum Theory”. *Physics Today* 7, 6–13.

Needham, P. 2002. “Duhem’s Theory of Mixture in the Light of the Stoic Challenge to the Aristotelian Conception”. *Studies in History and Philosophy of Science* 33, 685–708.

Murdoch, D. 1987. *Niels Bohr’s Philosophy of Physics* (Cambridge: Cambridge University Press).

Pejović, D. 1960. *Realni svijet* (Nolit: Beograd).

Reichenbach, H. 1998 (1944). *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics* (New York: Dover).

— 1951. “Über die erkenntnistheoretische Problemlage und den Gebrauch einer dreiwertigen Logik in der Quantenmechanik”. *Zeitschrift für Naturforschung* 6a, 569–575.

Ross, D. 1996. *Aristotle* (London & New York: Routledge).

Schlegel, R. 1980. *Superposition and interaction* (Chicago: University of Chicago Press).

Schlossberger, E. 1979. “Aristotelian Matter, Potentiality and Quarks”. *Southern Journal of Philosophy* 17, 507–521.

Schrödinger, E. 1952. “Are There Quantum Jumps?”. *British Journal for the Philosophy of Science* 3, 3–17.

Sfendoni-Mentzou, D. 1993. “The Role of Potentiality in C.S. Peirce’s Tychism and in Contemporary Discussions in Q.M. and Micro-Physics”. In: E. Moore (Hrsg.), *Charles S. Peirce and the Philosophy of Science: Papers from the 1989 Harvard Conference* (Tuscaloosa and London: The University of Alabama Press), 246–261.

— 2000. “What is Matter for Aristotle: ‘A Clothes-Horse’ or a Dynamic Element in Nature?”. In: D. Sfendoni-Mentzou (Hrsg.), *Aristotle and Contemporary Science. Vol. I* (New York: Peter Lang), 237–263.

Shimony, A. 1983. "Reflections on the Philosophy of Bohr, Heisenberg, and Schrödinger". In: R. S. Cohen & L. Laudan (Hrsg.), *Physics, Philosophy and Psychoanalysis* (Dordrecht: D. Riedel Publishing Company), 209–221.

Sharvy, R. 1983. "Aristotle on Mixtures". *The Journal of Philosophy* 80, 439–457.

Sklar, L. 1992. *Philosophy of Physics* (Boulder & San Francisco: Westview Press).

Stallmach, J. 1959. *Dynamis und Energeia. Untersuchungen am Werk des Aristoteles zur Problemgeschichte von Möglichkeit und Wirklichkeit* (Meisenheim am Glan: Verlag Anton Hain KG).

Supek, I. 1983. "Prolegomena for the Philosophy of Science". In: *Epistemology and Philosophy of Science. Proceedings of the 7th International Wittgenstein Symposium* (Wien: Hölder-Pichler-Tempsky), 280–287.

— 1991. *Filozofija znanosti i humanizam* (Zagreb: Sveučilišna naklada Liber).

Suppes, P. 1974. "Aristotle's Concept of Matter and its Relation to Modern Concepts of Matter". *Synthese* 28, 27–50.

Vukelja, T. 2004. *Nesjedinljivo znanje: Bohrov doprinos filozofskoj teoriji spoznaje* (Zagreb: KruZak).

Wallace, W. A. 1967. "Elementarity and Reality in Particle Physics". *Boston Studies in the Philosophy of Science* 3, 236–263.

Weizsäcker, C. F. 1948. *Die Geschichte der Natur* (Stuttgart: Hirzel Verlag).

Witt, C. 2003. *Ways of Being: Potentiality and Actuality in Aristotle's Metaphysics* (Ithaca: Cornell University Press).

Wood, R. & Weisberg, M. 2004. "Interpreting Aristotle on Mixture: Problems about elemental composition from Philoponus to Cooper". *Studies in History and Philosophy of Science* 35, 681–706.

Aus dem Kroatischen von  
Renata Horvat-Dronske