

1. Barads Verständnis der Philosophie-Physik Bohrs

As I noted from the outset, my aim is not so much to provide a faithful representation of Bohr's philosophy-physics as to propose a consistent framework for thinking about important epistemological and ontological issues. In addressing these issues, it would be just as dishonest to attribute the full development of this framework to Bohr as it would be to deny that my thinking about Bohr's philosophy-physics is everywhere present in my formulation.¹

Dieser erste Abschnitt der Arbeit soll die Zusammenhänge und Begriffe der Philosophie-Physik² Bohrs in Barads Verständnis herausarbeiten, wie sie den in Kapitel 3.1 zu adressierenden agentiellen Realismus Barads vorzeichnen. Die in der Einleitung bereits umrissene Hürde für eine solche Auseinandersetzung mit der Philosophie-Physik ist, dass Barads Darstellungen dieser Überlegungen Bohrs insofern nicht einheitlich sind, als dass die zu Bohr gesponnenen Verflechtungen in Charakter und Inhalt changieren und der Philosophie-Physik in einigen Passagen Merkmale und Implikationen zugesprochen werden, wie sie an anderen Stellen dann doch wieder allein dem agentiellen Realismus zugehörig sein sollen.

So changieren Barads Ausführungen bereits dort, wo sie die Bedeutung der Philosophie-Physik für den agentiellen Realismus kennzeichnen wollen: Zuweilen wird deren Relevanz sehr stark gemacht, beispielsweise wenn Barad den agentiellen Realismus als »explication and further elaboration of Bohr's philosophy-physics«³ oder als »rigorous examination and elaboration of the implications of Bohr's philosophy-

1 Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 123. Lucy Suchman spricht gar von einem *close-reading* der Arbeiten Niels Bohrs durch Barad (vgl. Suchman (2007): *Human-Machine Reconfigurations*, S. 267).

2 Barads Begriff der Philosophie-Physik soll kennzeichnen, dass Philosophie und Physik für Bohr nicht als getrennte Praktiken zu begreifen sein konnten (vgl. beispielsweise Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 24 oder auch S. 97). Vgl. hierzu auch die als Motto des Kapitels 1.3 gegebene Passage aus den Arbeiten Barads und die Ausführungen in Kapitel 1.3.2.2 zu Bohrs semantischem Verständnis des Komplementaritätsprinzips.

3 Ebd., S. 332.

physics«⁴ markiert.⁵ Ebenso aber finden sich auch Passagen in *Meeting the Universe Halfway*, die die Verbindung zu Bohrs Philosophie-Physik etwas zurückhaltender formulieren – so zum Beispiel, wenn es heißt: »The agential realist elaboration of Bohr's philosophy-physics that I offer takes many of Bohr's insights seriously«⁶ oder wenn die Philosophie-Physik als »important inspiration«⁷ oder eben auch einfach nur als »inspiration«⁸ firmiert. An anderer Stelle dezentriert Barad die Bedeutung der Erkenntnisse Bohrs gar weitestgehend, wenn sie suggeriert, diese seien bereits durch den agentiellen Realismus gelesen worden – so schreibt sie: »My account of Bohr's philosophy-physics in this paper, as elsewhere, is not faithful to Bohr (as if it could be), but rather is always already diffracted through my agential realist understanding of Bohr's insights.«⁹

Um die durch solche Passagen lediglich angedeuteten Differenzen in Inhalt und Charakter der von Barad zu Bohr gesponnenen Verflechtungen herausarbeiten zu können, setzt dieser erste Abschnitt an einem Strang an, wie er sich für Bohr und Barad gleichermaßen als zentral herausstellen wird, nämlich an den von Barad nicht nur in *Meeting the Universe Halfway* als Anknüpfungspunkte ihrer Theoriebildung und Theorie herangezogenen physikalischen Experimentalapparaten und an der Adressierung der aus diesen zu ziehenden quantenphysikalischen Schlussfolgerungen. Entsprechend wird sich dieser erste Abschnitt an den von Barad unter Berufung auf Bohr angeführten Apparaten des *Doppelspaltexperiments* (Kapitel 1.1), des *time-of-flight measurement* (Kapitel 1.2) und Werner Heisenbergs *Gammastrahlenmikroskop* (Kapitel 1.3) entlang entwickeln, um die Begriffe und Zusammenhänge der Philosophie-Physik Bohrs in Barads Verständnis herauszuarbeiten.¹⁰ Auf diese Weise lassen sich in diesem ersten Abschnitt Barads agentieller Realismus und ihr Verständnis der bohrschen Philosophie-Physik ein Stück weit konkretisieren (Kapitel 1.4 und 1.5)¹¹ und Anknüpfungspunkte für die in

4 Ebd., S. 24.

5 Dazu passend kennzeichnet Barad generell die Verwobenheit des agentiellen Realismus mit den von quantenphysikalischen Erkenntnissen aufgeworfenen Fragestellungen, unter anderem wenn sie auf ebd., S. 248 schreibt: »Having started with quantum physics, I come back around again to the problem of how to understand what it means, but this time with more refined tools in hand for doing science and science studies as a single entangled endeavor. That is, having begun the development of agential realism with the profound philosophical challenges raised by quantum physics, I return to this subject matter and ask if agential realism provides any useful insights that might help solve some of the unresolved foundational problems.«

6 Ebd., S. 352.

7 Ebd., S. 66.

8 Ebd., S. 69.

9 Barad (2014): »Diffracting Diffraction«, S. 186 Fn. 27.

10 Ich folge bei der Darstellung der physikalischen Experimente, die Barad für die Entfaltung des agentiellen Realismus heranzieht, eng den Ausführungen Barads im dritten Kapitel »Niels Bohr's Philosophy-Physics: Quantum Physics and the Nature of Knowledge and Reality« aus Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 98-131. Die Darstellung vermittelt daher nicht zwischen verschiedenen Interpretationen und Deutungsmöglichkeiten in Bezug auf die herangezogenen quantenphysikalischen Experimente.

11 Das Kapitel 3.1.6.2 wird diese Differenzen erneut aufnehmen und weiter entfalten.

späteren Abschnitten folgende tiefergehende Auseinandersetzung mit den Zusammenhängen und Begriffen des baradschen Programms etablieren.

1.1 Das Doppelspaltexperiment – Komplementarität von Welle und Teilchen

In this chapter we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the *only* mystery.¹²

Wie die Einleitung dieser Arbeit zum Ausdruck brachte, ist Ziel und Zweck der folgenden Argumentation nicht eine historisch umfassende Aufarbeitung der Geschichte des Doppelspaltexperiments und des damit verknüpften Welle-Teilchen-Dualismus. Stattdessen sollen diese Ausführungen die grundsätzliche Problematik kenntlich machen, auf die Bohrs Philosophie-Physik in Barads Verständnis – und eben auch der agentielle Realismus – eine Antwort darstellt. Aufgabe dieses Kapitels ist es, auf Basis der Darstellungen Barads zum Doppelspaltexperiment – und Barads Wiedergabe der diesbezüglichen Ausführungen Einsteins und Bohrs – einige Überlegungen von lediglich vorläufigem Charakter zu unternehmen, welche gewohnte Annahmen in Frage stellen und die weiteren, in den Kapiteln 1.2 bis 1.5 folgenden und tiefer in die Materie leitenden Ausführungen zu Barads Verständnis der Philosophie-Physik Bohrs vorbereiten sollen.

1.1.1 Aufbau und Verfahren des Doppelspaltexperiments

Das Doppelspaltexperiment – der grandiose Identitätsfilter, der perfekte Prüfstein über den Charakter des Seins, die größte ontologische Sortiermaschine aller Zeiten.¹³

Aus Sicht der klassischen newtonschen Physik¹⁴ ist ein Doppelspaltexperiment ein Versuchsaufbau, mittels dessen überprüft werden kann, ob es sich bei physikalischen Ob-

12 Feynman/Leighton/Sands (1963): *The Feynman Lectures on Physics. Volume I*, 37-1, 2. Dieses Zitat gibt Barad mehrfach wieder, teils in dem hier gegebenen Umfang, teils in kürzeren Auszügen; so in Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 73, S. 254 und S. 294 sowie in Barad (2012): ›Nature's Queer Performativity‹, S. 41. Die erste hier referenzierte Wiedergabe des Zitats findet sich ins Deutsche übersetzt in Barad (2013): ›Diffractionen‹, S. 30; die letzte hier genannte Anführung des Zitats durch Barad liegt ebenfalls in einer deutschen Übersetzung vor in Barad (2015): ›Die queere Performativität der Natur‹, S. 149. Zudem verweist auch Trevor Pinch in seiner Debatte mit Barad auf dieses Zitat Feynmans, vgl. Pinch (2011): ›Karen Barad‹, S. 436.

13 So Barads ironische Beschreibung des Doppelspaltexperiments im Verständnis der klassischen Physik in Barad (2015): ›Quantenverschränkungen und hantologische Erbschaftsbeziehungen‹, S. 93.

14 Ich verwende im Anschluss an Barad die Bezeichnungen *klassische Physik* und *newtonsche Physik* (oder auch *Physik Newtons*) synonym (vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 52, S. 411 Fn. 26 und S. 436 Fn. 79). Ebenso im Anschluss an Barad verwende ich *klassische Mechanik* synonym zu *newtonsche Mechanik* (vgl. ebd., S. 85). Vgl. auch die Fußnote 31 in Kapitel 2.1.2.

jekten¹⁵ um Teilchen oder um Wellen handelt. Der schematische Aufbau und die Durchführung eines solchen Doppelspaltexperiments sind simpel: In passendem Abstand vor einer Wand wird eine Abschirmung mit zwei Spalten – das namensgebende Doppel-

- 15 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 255. Ich wähle hier den Begriff des *Objekts* für physikalische Entitäten im Allgemeinen, wie sie in Doppelspaltexperimenten geprüft werden können – was in diesem Kontext bedeutet, dass mit *Objekt* Teilchen und Wellen gleichermaßen referenziert werden – und ohne an dieser Stelle auf besondere begriffliche Eigenheiten des agentiellen Realismus verweisen zu wollen. Zwar verwendet Barad in den diesbezüglichen Darstellungen auch den Begriff *Phänomen* in nicht agentiell-realistischer Bedeutungsweise – so beispielsweise hier: »Es ist wichtig, im Kopf zu behalten, dass Wellen eine ganz andere Art von Phänomen sind als Teilchen« (Barad (2013): »Diffractionen«, S. 35); im englischen Original ist hier entsprechend von »phenomena« (Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 76) die Rede (vgl. dazu auch Fußnote 20 in diesem Kapitel 1.1.1). Da dem Begriff *Phänomen* jedoch im agentiellen Realismus eine derart zentrale und vom allgemeinen Verständnis dieses Begriffs abweichende Rolle zukommen wird (vgl. vor allem Kapitel 3.1.1, aber auch Kapitel 1.4.2 in diesem ersten Abschnitt), scheint eine solche doppelte Verwendung des Begriffs des Phänomens in einer allgemeinen Bedeutung und in seiner später explizierten agentiell-realistischen Auslegung dem Nachvollzug der Darstellungen in dieser Arbeit eher hinderlich, warum ich Barads Verwendung des nicht agentiell-realistischen Verständnisses von *Phänomen* nicht aufnehme, sondern diesen Begriff für seine agentiell-realistische Verwendungsweise reserviere. Aber auch der Begriff der *Entität* schied an dieser Stelle aus, um die in Doppelspaltexperimenten überprüften Objekte zu bezeichnen, da Barad diesen Begriff an einigen Stellen allein für Teilchen reserviert und es sich bei Wellen eben nicht um Entitäten handeln soll: »Waves [...] are not even properly entities but rather disturbances in some medium or field« (ebd., S. 100); oder, noch deutlicher: »Recall that waves are not entities but disturbances extended in space [...]« (Ebd., S. 255). Ebenfalls im Raum stand die Verwendung des Begriffs *Ding* unter Bezug auf Bruno Latours Verständnis dieses Begriffs als *Versammlung* – althochdeutsch *thing* – (vgl. Latour (2007): *Elend der Kritik*, S. 23-24; vgl. auch die Darstellung in Folkers (2013): »Was ist neu am neuen Materialismus?«, S. 24-25), was auf gewisse Weise mit Barads Begriff des Phänomens als fundamentaler Untrennbarkeit resonieren hätte können. Ein solcher Bezug auf die Akteur-Netzwerk-Theorie würde allerdings Implikationen mit sich bringen, gegen die sich Barad an einigen Stellen auszusprechen scheint (vgl. beispielsweise Barad/Juelskjær/Schwennesen (2012): »Intra-active Entanglements«, S. 12). Für den Begriff *Objekt* wiegen die genannten Bedenken dagegen erheblich leichter. Zwar gilt im agentiellen Realismus auch und gerade für diesen Begriff anders als gewohnt: »Objects are not already there; they emerge through specific practices.« (Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 157). Andererseits aber kommt diesem Begriff keine vergleichbar zentrale Rolle zu wie dem Begriff *Phänomen* und eine doppelte Verwendung scheint weitgehend unproblematisch. Passend scheint der Begriff *Objekt* auch zu sein, da er Barad zufolge gerade im Kontext des Doppelspaltexperiments – anders als *Entität* – Teilchen und Wellen explizit mit einbezieht: »[A]n object is either localized or extended; it can't be both.« (Ebd., S. 100. Vgl. dazu auch Barad (1996): »Meeting the Universe Halfway«, S. 177). Der Begriff *Objekt* wird daher in dieser Arbeit zumindest solange für die bei Messungen gemessenen Objekte in seiner klassischen Bedeutung verwendet, bis der Begriff des *Phänomens* bei Bohr und Barad expliziert wurde, Objekte im Sinne des agentiellen Realismus verstanden werden können und die weitere Verwendung von *Objekt* in der klassischen Bedeutung durch die agentiell-realistische suspendiert werden kann. Diesem Vorgehen entspricht, dass auch Barad selbst diese Verwendung von *Objekt* in späteren Passagen ihres Buchs durchhält (vgl. beispielsweise Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 301-302). Dessen ungeachtet wird der Begriff der *Entität* im späteren Verlauf der Arbeit – nach der Behandlung der Philosophie-Physik – in einer losen Verwendungsweise herangezogen, die sich nicht auf die mit diesem Begriff bei Barad verbundene Trennung von Welle und Teilchen stützt.

spaltgitter – platziert.¹⁶ Für die Durchführung des Experiments werden dann aus einer Quelle die in Frage stehenden Objekte gegen das Doppelspaltgitter gesendet. Abhängig von ihrer Flugbahn prallen diese Objekte dabei teils gegen das Doppelspaltgitter, teils gelangen sie durch die beiden Spalten hindurch und treffen auf der dahinterliegenden Wand auf, wo sie eine spezifische Trefferverteilung bzw. ein spezifisches Treffermuster ausbilden. Hierbei lässt sich Folgendes beobachten:

Handelt es sich bei den aus der Quelle auf die Reise geschickten Objekten um *Teilchen*, so sammeln sich die Treffer vor allem in zwei getrennten Bereichen direkt hinter den beiden Spalten des Doppelspaltgitters – vergleichbar mit dem Trefferbild von Tennisbällen, wenn diese von einer festen Position aus auf ein Doppelspaltgitter gespielt werden würden.

Handelt es sich bei den betreffenden Objekten aber um *Wellen*, so gleicht deren Verhalten beim Durchqueren des Doppelspaltgitters nicht dem von Tennisbällen, sondern dem von Wasserwellen: Entsprechend breiten sich solche wellenartigen Objekte hinter jedem der beiden Spalten des Doppelspaltgitters ringförmig aus. Im Zuge dieser Ausbreitung kommt es zur Überlagerung der beiden jeweils konzentrischen Wellenmuster, die Wellen *interferieren*¹⁷; das heißt ihre Amplituden verstärken sich an einigen Stellen, löschen sich an anderen dagegen aus. Ein Geschehen, das sich anhand zweier ins Wasser geworfener Steine illustrieren lässt, wenn die von diesen ausgelösten ringförmigen Wellen sich überlagern und ein gemeinsames und komplexeres Muster bilden.¹⁸ Aufgrund solcher Interferenzeffekte bildet sich im Fall von Wellen auf der Wand hinter dem Doppelspaltgitter nicht das oben beschriebene Treffermuster mit zwei Bereichen hoher Trefferhäufigkeit aus, sondern ein Interferenz- oder Diffraktionsmuster aus mehreren dichten und weniger dichten Bereichen.¹⁹

16 Sehr informativ und unterhaltsam zum Doppelspaltexperiment und seiner Geschichte ist der Vortrag Barad (2014): ›Re-membling the Future, Re(con)figuring the Past‹, der im Wesentlichen auf Passagen aus *Meeting the Universe Halfway* zurückgreift und diese pointiert wiedergibt.

17 Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 417 Fn. 7 fügt dem hinzu: »It is perhaps also worth noting that ›interference‹ can be a misleading term for the novice, since the verb ›to interfere‹ carries the connotations of disruption, hindrance, or obstruction. When waves meet, they don't disrupt or obstruct each other, no impact or collision occurs, as in the case of two particles. On the contrary, the whole point is that the waves can coexist unhindered by each other's presence; they can overlap in a common spatial region – indeed, at a single point.«

18 Vgl. hierzu auch die komplexen, aber wohlgeordneten Muster der stehenden Wellen in den Versuchen von Heinrich und Wilhelm Weber, die dafür Quecksilber in konstanten Intervallen in ein kreisrundes Gefäß fallen ließen: Weber/Weber (1825): *Wellenlehre auf Experimente gegründet, oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*, Tabelle VI und VII. Vgl. dazu auch die medien- und theaterwissenschaftlich orientierte Darstellung dieser Experimente in Tkaczyk (2014): ›Listening in Circles‹, S. 321–323.

19 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 100–102. Eine weitere Beschreibung solcher Interferenzmuster findet sich in Kapitel 2.1.2 zum klassischen Verständnis von Diffraction, in dem es um die physikalischen Grundlagen von Diffraction geht. Darüber hinaus muss festgehalten werden, dass die hier mit Barad als austauschbar verwendeten Begriffe von Diffraction und Interferenz nicht in allen Kontexten als derart miteinander übereinstimmend erachtet werden. Wie Barad allerdings darlegt, versteht sie diese Begriffe im Kontext des agentiellen Realismus als synonym – so schreibt sie in Barad (2013): ›Diffraktionen‹, S. 41–42: »Einige Physiker_innen bestehen darauf, die historische Unterscheidung zwischen Interferenz- und Diffraktionsphänomenen bei-

Die Erklärung für dieses unterschiedliche Verhalten von Wellen und Teilchen findet sich Barad zufolge darin, dass es sich bei diesen um »distinct phenomena with mutually exclusive characteristics«²⁰ handelt: Während Teilchen lokalisierte, das heißt lokal begrenzte Objekte sind, die zu jedem Zeitpunkt eine bestimmte Position im Raum innehaben, sind Wellen durch ihre räumliche Ausdehnung charakterisiert: Sie nehmen in jedem Moment mehr als eine Position im Raum ein, ganz wie Ozeanwellen, die sich einen Strand entlang bewegen.²¹ Anders als im Fall von Teilchen können verschiedene Wellen zugleich denselben Punkt im Raum einnehmen, indem sie sich wie beschrieben überlagern und interferieren:

Zusammengefasst sind Diffraktionsmuster ein charakteristisches Verhalten, das Wellen unter den richtigen Bedingungen aufweisen. Entscheidend ist, dass Diffraktionsmuster einen wichtigen Unterschied zwischen Wellen und Teilchen kennzeichnen: klassischer Physik zufolge *produzieren ausschließlich Wellen Diffraktionsmuster; Teilchen nicht* (da sie nicht zur gleichen Zeit den gleichen Ort besetzen können). Tatsächlich ist ein Diffraktionsgitter einfach eine Apparatur oder materielle Konfiguration, die eine Superposition von Wellen hervorruft.²²

Teilchen und Wellen weisen also grundlegend verschiedene Charakteristika auf, was zu ihrem divergierendem Verhalten im Doppelspaltexperiment und zu den klar voneinander unterscheidbaren Treffermustern führt. Daher sollte es mittels des Doppelspaltexperiments prinzipiell möglich sein, alle physikalischen Objekte daraufhin zu prüfen, ob es sich bei ihnen um Wellen oder um Teilchen handelt.

Diese Annahme gründet in einer der grundlegenden Prämissen der klassischen newtonschen Physik, der zufolge physikalische Objekte stets zu einer der beiden Kategorien Teilchen oder Welle gehören *müssen* – und zwar *nur* zu einer, so dass ein physikalisches Objekt *entweder* Teilchen *oder* Welle ist, nicht aber beides oder irgendetwas

zubehalten [...]. [...] Dennoch ist die Physik hinter Phänomenen der Diffraction/Beugung und hinter Phänomenen der Interferenz dieselbe: *beide resultieren aus der Superposition von Wellen*. [...] Ich verwende die Begriffe »Diffraction« und »Interferenz« synonym, ohne den historischen Kontingenzen Bedeutsamkeit zu gewähren, durch die ihnen verschiedene Namen zugewiesen wurden.« Vgl. dazu auch Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 28-29: »While some physicists continue to abide by the purely historical distinction between diffraction and interference phenomena, I use the terms »diffraction« and »interference« interchangeably. That is, I side with the physicist Richard Feynman and others who drop this distinction on the basis that what is at issue in both cases is the physics of the superposition of waves.« Für Richard Feynman sei, wie Barad (2013): »Diffractionen«, S. 42 hinzufügt, die »Unterscheidung zwischen Interferenz und Diffraction/Beugung bloß ein historisches Artefakt ohne physikalische Relevanz.«

20 Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 100. Dies ist wiederum einer der Fälle, in denen Barad den Begriff *Phänomen* verwendet, ohne zwangsläufig die Konnotationen und Implikationen anzulegen, die dieser Begriff im Rahmen des agentiellen Realismus mit sich bringen wird (vgl. Fußnote 15 in diesem Kapitel 1.1.1).

21 So Barads Formulierung, »like ocean waves that move along a stretch of beach« (ebd.).

22 Barad (2013): »Diffractionen«, S. 42. *Superposition* bezeichnet hier nichts anderes als die zuvor im selben Zitat genannte *Überlagerung*.

dazwischen.²³ Gerade weil diese Prämisse aber von derart zentraler Bedeutung für das Theoriegebäude der newtonschen Physik ist, gerieten bestehende klassische physikalische Theorien notwendigerweise in Erklärungsnot, als verschiedene Experimente widersprüchliche Ergebnisse darüber erbrachten, ob physikalische Objekte wie das Licht nun zur Kategorie der Welle oder zur Kategorie der Teilchen zu zählen sein müssten.

1.1.2 Die Frage nach der Natur des Lichts

To follow the discussion here, readers unfamiliar with the debates about the nature of light in the early twentieth century need only know that there was seemingly contradictory evidence that light behaved as a wave under certain experimental conditions and as a particle under different experimental conditions.²⁴

Da sich der newtonschen Physik zufolge alle physikalischen Objekte entweder der Kategorie Teilchen oder der Kategorie Wellen zuordnen lassen sollten,²⁵ muss aus dieser Perspektive auch das Licht zwangsläufig entweder zu den Teilchen oder zu den Wellen gehören. Die Frage aber, zu welcher Kategorie das Licht denn nun zu zählen sei, zeigte sich in der Physik seit dem 17. Jahrhundert als umstritten: So unterstellte die mit Christiaan Huygens in Zusammenhang stehende Wellenoptik dem Licht noch Wellencharakter,²⁶ während die später weit verbreitete und maßgeblich von Isaac Newton mitgeprägte Korpuskeltheorie Licht eindeutig Teilchencharakter zusprach²⁷ – eine Haltung, die trotz des immensen Einflusses Newtons auf die physikalische Gemeinschaft gegen Ende des 19. Jahrhunderts erneut revidiert wurde, als physikalisch Forschende dann doch und »beyond the shadow of a doubt«²⁸ zu der Überzeugung zurückkehrten, dass es sich bei Licht korrekterweise um Wellen handeln müsse.²⁹

Dieser letztgenannte Wandel im Paradigma über die Natur des Lichts lag nicht zuletzt an einem von Thomas Young im Jahr 1802 konzipierten Doppelspaltexperiment.³⁰ Wie Barad schreibt, wollen zahlreiche Physiklehrbücher dieses Doppelspaltexperiment Youngs als die finale, experimentelle Widerlegung der Korpuskeltheorie Newtons verstanden wissen.³¹ Wie sie aber betont, ist dieser Übergang vom Paradigma des Lichts als Teilchen zum Licht als Welle kein plötzlicher und singular verortbarer Bruch: Vielmehr handelt es sich um einen historisch ausgedehnten Prozess und um das Ergebnis zahlreicher und unterschiedlicher Veränderungen und Verschiebungen in der experi-

23 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 100. Bei der hier vorliegenden logischen Verknüpfung – dem *entweder ... oder* – handelt es sich also nicht um eine Disjunktion, sondern um eine Kontravalenz, das *exklusive Oder*.

24 Barad (1995): »A Feminist Approach to Teaching Quantum Physics«, S. 72 Fn. 7.

25 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 100.

26 Vgl. Huygens (1890): *Abhandlung über das Licht*.

27 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 97.

28 Ebd., S. 99.

29 Vgl. ebd.

30 Vgl. ebd., S. 97.

31 Vgl. ebd., S. 97-98.

mentellen Praxis und den dabei verwendeten Begriffen.³² Young distanzierte sich denn auch aus wissenschaftsstrategischen Gründen von jeder Befürwortung einer Wellentheorie des Lichts – die Autorität Newtons und der Korpuskeltheorie waren schlicht noch zu wirkmächtig in der wissenschaftlichen Gemeinschaft verankert.³³ Der Paradigmenwechsel, zu dem Youngs Experiment einen wesentlichen Beitrag leistete, muss also als verwoben mit zahlreichen anderen Entwicklungen begriffen werden, insbesondere mit den von James Clark Maxwell zwischen 1861 und 1864 erarbeiteten und später nach ihm benannten Maxwell-Gleichungen, im Zuge derer dem Licht ebenfalls Wellencharakter zugesprochen wurde.³⁴ Weder verlief diese Entwicklung also plötzlich, noch ist sie monokausal zu erklären, und dennoch: Zum Ausgang des 19. Jahrhunderts handelte es sich bei Licht der allgemeinen Übereinkunft nach definitiv um Wellen.³⁵

Wie Barad weiter ausführt, wurde es jedoch im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts zunehmend schwieriger, an der Idee festzuhalten, es könne überhaupt im Sinne der klassischen Physik eine eindeutige Erklärung oder konsistente Theorie für die Natur des Lichts geben,³⁶ denn »new experiments seemed to indicate that light manifests particle-like characteristics under one set of experimental conditions and wavelike characteristics under other circumstances.«³⁷ Wenn es sich bei Teilchen aber um lokalisierte Objekte handelt, Wellen dagegen durch ihre Ausdehnung im Raum charakterisiert sind, wie kann es dann möglich sein, dass Licht sich einmal als zur Kategorie der Teilchen und einmal als zur Kategorie der Wellen gehörig verhielt? Für die vorherrschende newtonsche Theorie war ein solcher Befund schlicht inakzeptabel und die diesbezüglichen experimentellen Befunde schienen jede Möglichkeit einer stimmigen Erklärung für die Natur des Lichts in unerreichbarer Ferne verschwinden zu lassen, sollten sie sich denn bestätigen.³⁸

1.1.3 Das Doppelspaltexperiment als Gedankenexperiment bei Einstein und Bohr

The suggestion of using a two-slit arrangement with a movable diaphragm was originally proposed by Einstein in an attempt to [...] show the incompleteness of quantum theory.³⁹

-
- 32 So ebd., S. 98–99, unter anderem unter Bezug auf Buchwald (1989): *The Rise of the Wave Theory of Light*.
- 33 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 99. Darüber hinaus herrscht heute Uneinigkeit darüber, ob Young das von ihm beschriebene Doppelspaltexperiment überhaupt durchgeführt hat und ob dieses, sollte es zu seiner Durchführung gekommen sein, in dem von Young beschriebenen Aufbau die Funktion eines Doppelspaltexperiments hat erfüllen können (vgl. ebd.).
- 34 Vgl. ebd.
- 35 Vgl. ebd. Dieser Befund stellte zwar die Korpuskeltheorie des Lichts in Frage, nicht jedoch die Autorität der newtonschen Physik *per se*. Dafür sollte erst die Quantenphysik ausschlaggebend sein. Für eine tiefergehende Beschreibung der Gründe für und der Reaktionen auf die Krise vgl. zudem Barad (1996): »Meeting the Universe Halfway«, S. 178.
- 36 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 99.
- 37 Ebd., S. 99–100.
- 38 Vgl. ebd., S. 99. Vgl. auch Barad (1995): »A Feminist Approach to Teaching Quantum Physics«, S. 72 Fn. 7.
- 39 Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 266–267.

Die Erklärungsnot, in die die klassische newtonsche Theorie geraten war, wurde weiter verschärft durch physikalische Experimente, die zeigten, dass es nicht nur das in der Frage nach seiner Natur historisch ohnehin umstrittene Licht war, das sich unter den einen experimentellen Bedingungen als Welle und unter anderen Bedingungen als Teilchen verhielt. Selbst physikalische Objekte, die innerhalb der Physik stets als Teilchen gegolten hatten, ließen experimentell denselben rätselhaften Welle-Teilchen-Dualismus erkennen⁴⁰ – ein Befund, der die Erschütterung des newtonschen Theoriegebäudes fortsetzte und verstärkte: »These findings seemed to indicate nothing less than a seismic shift in our understanding of the nature of scientific knowledge, if not the very nature of the world.«⁴¹ Auch nachdem 1926 Formalismen eingeführt worden waren, um quantenphysikalische Vorgänge mathematisch zu erfassen,⁴² blieb die grundsätzliche Frage ungeklärt, wie mit dem Paradoxon des Welle-Teilchen-Dualismus von Licht und Elektronen umzugehen sei.⁴³

Wie Barad schreibt, reagierten sowohl Albert Einstein als auch Niels Bohr auf eben-diese Problematik und griffen in ihrer Debatte – unter anderem – auf das Doppelspalt-experiment zurück.⁴⁴ Dabei zogen Einstein und Bohr allerdings keine konkreten Ex-perimentalaufbauten zur empirischen Überprüfung ihrer Schlussfolgerungen heran, sondern machten Gebrauch von reinen *Gedankenexperimenten*.⁴⁵

40 Barad spricht bezüglich dieses Welle-Teilchen-Dualismus vom »dual ›wave-particle‹ feature« und von »[w]ave-particle duality« (ebd., S. 100). Vgl. auch Fußnote 43 in diesem Kapitel 1.1.3.

41 Ebd. Einer dieser experimentellen Befunde für das Wellenverhalten von Elektronen war Ergebnis des Davisson-Germer-Experiments, das 1927 von Clinton Davisson und seinem damaligen Assistenten Lester Germer an den *Bell Laboratories* durchgeführt wurde. Barad beschreibt dieses Experiment wie folgt: »Sehr zu ihrer Überraschung bestätigten Clinton Davisson und Lester Germer 1927 zufälligerweise dieses Ergebnis für Elektronen. Sie schossen langsame Elektronen auf einen Nickel-Einkristall, als sich ein unbeabsichtigter Vakuumbruch ereignete. Nachdem sie das Vakuum repariert hatten, wärmten sie die Nickelprobe nach, um den Schaden am Ziel zu reparieren, und nahmen ihr Experiment wieder auf. Dieses Mal sahen sie ein bemerkenswertes Muster in ihren Ergebnissen: Die angesammelten Elektronen bildeten ein Diffraktionsmuster. Sie hatten versehentlich einen direkten Beweis für das Wellenverhalten von Materie entdeckt.« (Barad (2013): »Diffraktionen«, S. 44-45) Gleichzeitig zu Davisson und Germer führte der englische Physiker George Paget Thomson – Sohn von Joseph John Thomson, der 1897 das Elektron überhaupt erst entdeckt hatte – mittels eines abweichenden Verfahrens ebenfalls den experimentellen Nachweis für das Wellenverhalten von Elektronen durch, so dass Davisson und Thomson sich den Nobelpreis für diesen Befund teilten (vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 418 Fn. 15).

42 So Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 249-250: »Actually, by the end of January 1926, there appeared to be two separate formulations of the laws of quantum mechanics: the matrix mechanics of Heisenberg, Born, and Jordan (an elaboration of Heisenberg's ideas developed in the early summer of 1925) and Schrödinger's wave mechanics.«

43 Vgl. ebd., S. 295. Barad selbst spricht wiederholt vom »wave-particle duality paradox« (unter anderem in ebd., S. 29) und vom »paradox of wave-particle duality« (ebd., S. 105). Vgl. auch Fußnote 40 in diesem Kapitel 1.1.3.

44 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 101.

45 Vgl. ebd., S. 100. Für Einstein und Bohr war dementsprechend unklar, ob sich diese Experimente jemals praktisch würden umsetzen lassen – ihnen genügte deren *prinzipielle* Umsetzbarkeit. Es dauerte bis ins Jahr 1959, bevor ein Doppelspaltexperiment für Elektronen vollzogen werden konnte, das von Claus Jönsson durchgeführt und nach ihm benannte Jönsson-Experiment (vgl. hierzu Jönsson (1961): »Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten«), das in

Gedanken experiments are pedagogical devices. They are tools for isolating and bringing into focus key conceptual issues. Generally speaking, there is no expectation that a gedanken experiment will ever be realized as an actual laboratory experiment. Einstein and Bohr made famous and extensive use of gedanken experiments in trying to get at the essential elements of the physics. Indeed, gedanken experiments became the testing ground for their contrary understandings of quantum physics.⁴⁶

Anders als Bohr nämlich, seines Zeichens Verfechter der quantenphysikalischen Theorie, lehnte Einstein die Quantenphysik, ihre Grundannahmen und Implikationen Zeit seines Lebens ab.⁴⁷ Einsteins Absicht im Austausch mit Bohr war es dementsprechend, die Gültigkeit der quantenphysikalischen Theorie effektiv in Frage zu stellen, indem er ihr mit seinem Gedankenexperiment eine grundsätzliche Inadäquatheit nachzuweisen hoffte.⁴⁸

Als Ausgangspunkt diente Einstein das rätselhafte Doppelverhalten von Elektronen, die entsprechend der vorherigen Ausführungen auch dann ein Interferenzmuster ausbildeten und damit Wellencharakter erkennen ließen, wenn sie nicht auf einmal, sondern sukzessive eines nach dem anderen durch ein Doppelspaltgitter befördert wurden.⁴⁹ Während also jedes einzelne Elektron als *Teilchen* auf der Wand hinter dem Doppelspaltschirm auftraf, erschien als Gesamtergebnis die Trefferverteilung eines Interferenz- bzw. Diffraktionsmusters von interferierenden *Wellen*.⁵⁰ Wie aber war das möglich? Interferierte hier ein einzelnes Elektron mit sich selbst? Ging jedes einzelne Elektron etwa durch beide Spalten des Doppelspaltgitters?⁵¹

Barads Arbeiten allerdings nicht erwähnt wird. Bevor die von Einstein und Bohr als Gedankenexperiment entworfene Version des Doppelspaltexperiments jedoch umgesetzt, ihre Ausführungen empirisch überprüft und zugunsten Bohrs entschieden werden konnten (vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 291-292), sollte es noch einmal bis in die 90er Jahre dauern – so ebd., S. 104-105: »Bohr argued that if we were to perform a two-slit experiment with a which-path device (which can be used to determine which slit each electron goes through on its way to the detecting screen), we would find that the interference pattern is destroyed. [...] It is a remarkable and quite unexpected fact that in the mid-1990s it became technologically possible to *actually perform* a version of this gedanken experiment in the lab [...]«.

46 Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 100.

47 Vgl. ebd., S. 104. Und das, obwohl Einstein selbst eine der den Welle-Teilchen-Dualismus in der Physik begründenden und die quantenphysikalische Revolution mitinitiiierenden Personen gewesen war. Karl Popper attestiert Einstein allerdings auch eine ähnliche Haltung gegenüber der von Letzterem entwickelten allgemeinen Relativitätstheorie, die Einstein »lediglich als eine Annäherung an eine befriedigendere Theorie« gegolten haben soll (vgl. Popper (2005): *Die Welt des Parmenides*, S. 204).

48 Vgl. Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 104.

49 Vgl. ebd., S. 102. Das Befremdliche an diesem Umstand war zudem, dass trotz der Herausbildung dieses Interferenzmusters jedes einzelne Elektron nach seinem Weg durch das Doppelspaltgitter an einem bestimmten Punkt auf der Wand nachgewiesen werden konnte (vgl. ebd.).

50 Vgl. ebd.

51 Vgl. ebd. Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.1.3 zu Barads Quantenverständnis von Diffraction. Dass diese Frage zu bejahen ist und ein einzelnes Elektron unter bestimmten Bedingungen ganz in diesem Sinne mit sich selbst interferiert stellt Barad (2014): »Diffractioning Diffraction«, S. 180 heraus.

Auf Basis dieser Überlegungen stellte Einstein in seinem Gedankenexperiment die subversive Frage, was denn geschähe, wenn in einem solchen Doppelspaltexperiment mit Elektronen ein *Detektor* an einem der beiden Spalten des Doppelspaltgitters angebracht würde, mit dem festgestellt werden könnte, durch welchen Spalt ein Elektron schlüpfte.⁵² Prinzipiell würde es hierfür genügen, den zuvor starr fixierten Rahmen einer der beiden Spalten des Doppelspaltgitters beweglich zu lagern, etwa mit einer Federung.⁵³ Würde das Elektron durch den gefederten Spalt schlüpfen, so würde sich dies durch einen Ausschlag des nun beweglichen Rahmens dieses Spalts bemerkbar machen.⁵⁴ Blieb dieser Ausschlag der Federung beim Durchgang eines Elektrons durch das Doppelspaltgitter dagegen aus, wäre klar, dass dieses durch den anderen Spalt gegangen sein musste.⁵⁵ Mittels dieses Aufbaus, so Einstein, müsste es möglich sein, ein Elektron zu erwischen, wie es sich *zugleich* als Teilchen und als Welle verhielt.⁵⁶

Einsteins Hoffnung war nicht, dieses wundersame gleichzeitige Verhalten von Elektronen als Welle *und* Teilchen in konkreten Experimenten sichtbar zu machen. Ganz im Gegenteil ging es ihm um die Inkonsistenz in der Annahme, dass ein solches gleichzeitiges Doppelverhalten von Elektronen wirklich möglich und beobachtbar sein könne.⁵⁷ Die Idee hinter seinen von Barad beschriebenen Überlegungen lässt sich daher so umreißen: Da das von Einstein entworfene Gedankenexperiment in seinen Augen notwendig zu einer inkonsistenten Annahme führte – nämlich zu der Annahme eines gleichzeitigen Wellen- und Teilchenverhaltens von Elektronen –, das Experiment aber mit den Annahmen der von Bohr vertretenen quantenphysikalischen Theorie konform ging, blieb nur der Schluss übrig, dass die quantenphysikalische Theorie selbst inkonsistent sein musste und damit zu disqualifizieren wäre.

Für Bohr lag entsprechend viel daran, eine stimmige Erwiderung auf dieses von Einstein ins Feld geführte Gedankenexperiment zu finden, um die Konsistenz der quantenphysikalischen Theorie trotz dieses Einwands zu bewahren.⁵⁸ Den Kern des einsteinischen Arguments nämlich akzeptierte auch Bohr: Sollte ein Experiment denkbar sein, mit dem genau bestimmt werden könnte, durch welchen Spalt ein Elektron geschlüpft war und in dem *zugleich* ein Interferenzmuster auf der Wand hinter dem Doppelspalt aufträte – das Elektron sich also zugleich als Welle und Teilchen verhielte –, so sähe sich die Quantenphysik in eine tiefe Krise gestürzt, denn die Existenz einer logisch konsistenten Theorie für diesen Befund hielt auch Bohr für ausgeschlossen.⁵⁹ Darüber

52 Vgl. dazu Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 104: »[A] two-slit experiment with a which-path device [...]«.

53 Vgl. ebd., S. 267. Das hier von Barad diskutierte Beispiel ist eine Variante des von Einstein herangezogenen Gedankenexperiments als »recoiling slit« experiment« (ebd.).

54 Vgl. ebd., S. 103-104.

55 Vgl. ebd.

56 Barad beschreibt dies auf ebd., S. 104 als »to catch electrons in the act of behaving like a particle and a wave simultaneously.«

57 Vgl. ebd.

58 So schreibt Barad unter anderem in ebd., S. 123: »[T]he historical evidence shows that Bohr focused intensely on finding a satisfactory resolution of the conceptual difficulties and was willing to take risky steps and introduce extreme measures in the course of this unwavering effort.«

59 Vgl. ebd., S. 106.

hinaus stimmte Bohr Einstein auch insofern zu, als dass er es prinzipiell für durchaus möglich erachtete, ein Doppelspaltexperiment wie von Einstein beschrieben mit einem Detektor aus beweglichen Teilen auszustatten und so zu prüfen, durch welchen Spalt die Elektronen jeweils schlüpfen.⁶⁰

Allerdings – und dies ist der springende und für Barad entscheidende Punkt in Bohrs Erwiderung auf Einstein – würde der Einbezug eines solchen Detektors bzw. einer Federung in den Experimentalaufbau das Ergebnis des Versuchs grundlegend verändern: Würden nämlich solche *beweglichen* Teile einbezogen, mittels derer die Elektronen nun eben als Teilchen gemessen werden sollen, so bildete sich laut Bohr nicht mehr das von Einstein erwartete für *Wellen* charakteristische Interferenzmuster auf der Wand hinter dem Doppelspaltgitter aus, sondern stattdessen das Trefferbild aus zwei getrennten Bereichen, wie es für *Teilchen* charakteristisch ist.⁶¹ In dem Moment also, in dem der Messaufbau des Experiments die Elektronen als Teilchen messen soll – so Bohr –, werden diese sich auch als Teilchen verhalten.⁶² Die von Einstein angeführte paradoxe Situation, in der ein Elektron sich zugleich als Welle und Teilchen verhielt, würde daher gar nicht erst nicht eintreten.

Doch wie soll es möglich sein, dass das Verhalten der beobachteten Objekte sich mit einer Veränderung am messenden Apparat derart grundlegend ändert? Schließlich geht es hier nicht um die Feststellung, dass Messungen bzw. Beobachtungen⁶³ das Verhalten der gemessenen Objekte *stören* können, indem sie beispielsweise deren Bewegung beeinflussen,⁶⁴ sondern darum, dass Veränderungen am Messapparat die beobachteten Objekte von einer physikalischen Kategorie in eine völlig andere zu katapultieren scheinen. Wie konnte Bohr zu einer solchen, aus Sicht der klassischen newtonschen Physik mehr als nur kontraintuitiv erscheinenden Feststellung gelangen – eine Feststellung, die sich darüber hinaus zu dieser Zeit eben nicht anhand eines konkret vollzogenen Experiments nachweisen ließ, sondern lediglich die Prognose über den Ausgang eines reinen Gedankenexperiments darstellte?⁶⁵

Wie Barad mitteilt, gelangte Bohr zu dieser Schlussfolgerung »only after wrestling long and hard with the paradox of wave-particle duality.«⁶⁶ Seiner Überzeugung nach

60 Dies wird von Barad nicht explizit geäußert, geht aber aus dem Umstand hervor, dass Bohr nicht das von Einstein konzipierte Doppelspaltexperiment mit Detektor in Frage stellt, sondern dieses – wie noch folgen wird – selbst zentral für seine Argumentation heranzieht (vgl. beispielsweise ebd., S. 101).

61 Vgl. ebd., S. 104.

62 Vgl. ebd.

63 *Messung* und *Beobachtung* – *measurement* und *observation* – zählen zu den zahlreichen Synonymen in Barads Arbeiten, was sich in diesem Fall anhand Barads Umgang mit diesen Begriffen in ebd., S. 113–115, S. 120, S. 176, S. 195–197, S. 282 und S. 284 zeigt. Noch eindeutiger wird diese Synonymität erkennbar auf ebd., S. 322 und S. 352, wo Barad beide Begriffe zu »measurement observations« zusammenzieht. Entsprechend verwende ich in dieser Arbeit *Messung* und *Beobachtung* ebenfalls synonym (vgl. auch die Herausarbeitung der Bedeutung von *Messung* als *Intra-aktion* im agentiellen Realismus in Kapitel 3.1.4).

64 Vgl. dazu den im Kapitel 1.2 angespannenen Faden zur Bedeutung der *Störung* in Barads Argumentation.

65 Vgl. ebd., S. 105.

66 Ebd.

stellte der durch Experimente belegte Welle-Teilchen-Dualismus von Licht, Elektronen und anderen physikalischen Objekten zwar die Gültigkeit der bestehenden physikalischen Annahme in Frage, dass es sich bei solchen physikalischen Objekten entweder um Teilchen oder um Wellen handeln müsse. Die Ergebnisse dieser Experimente aber waren *konsistent* und *reproduzierbar*, denn die Verwendung desselben Experimentalapparats hatte stets auch dasselbe Verhalten der gemessenen Objekte zur Folge: »To Bohr the consistency and reproducibility of the experimental results, however surprising the results themselves may be, gave him faith that it would be possible to find a coherent framework.«⁶⁷ Konsistenz und Reproduzierbarkeit der experimentellen Ergebnisse bildeten für Bohr also den Garant dafür, dass sich dennoch Ordnung in den Erscheinungen des Welle-Teilchen-Dualismus ausdrücken musste. Die einzige Erklärung aber, die sich für Bohr am Ende als vereinbar mit den experimentellen Ergebnissen und dem Welle-Teilchen-Dualismus erwies,⁶⁸ war eben die, dass das Verhalten von gemessenen Objekten – und damit die Beantwortung der Frage, zu welcher Kategorie diese zu zählen seien – nicht allein von diesen Objekten und den ihnen inhärenten Eigenschaften abhing, sondern ebenso von der Art der Messung, d.h. vom spezifischen *physischen* Arrangement des jeweils zur Messung verwendeten Apparats.⁶⁹

Diese – in vorliegender Arbeit noch auf- und umzuarbeitende – Schlussfolgerung fasste Bohr in dem für seine Überlegungen zentralen Begriff der *Komplementarität*: Bohr zufolge ergänzen Wellen- und Teilchencharakter einander nämlich nicht nur wie die zwei Seiten einer Medaille. Diese Charakteristika schließen einander auch aus in dem Sinne, dass sie niemals innerhalb einer einzelnen Messung beide zugleich genau bestimmt werden können.⁷⁰ Dies ist der Fall, da der zur Messung eingesetzte Apparat

67 Ebd., S. 420 Fn. 4. Barad drückt diesen Punkt auf ebd., S. 105-106 auch auf diese Weise aus: »The anchor point that Bohr used to steady the sense of vertigo that accompanied these perplexing results was that the (actual) experiments that displayed the ›dual‹ nature of matter and light were both consistent and reproducible: every time a given apparatus was used, the same behavior – whether particle or wave (not both) – resulted. One apparatus consistently manifested one kind of behavior, and a mutually exclusive apparatus consistently exhibited another.«

68 Bohr unternahm mehrere Anläufe, um die problematischen experimentellen Befunde theoretisch zu fassen. So stellte sich beispielsweise der folgende, frühere und nicht weniger radikale Ansatz Bohrs als unhaltbar heraus: »Significantly, Bohr cared so deeply about finding a coherent understanding of wave-particle duality that at one point he contemplated the possibility of giving up on perhaps the most fundamental of all physical principles – the conservation of energy and momentum – if in this Faustian bargain he could see his way clear to reconciling the seemingly contradictory findings. In 1924 Bohr wrote a paper with Kramers and Slater putting forth the radical conjecture that the conservation of energy and momentum did not apply at the level of individual atomic events. [...] The trio quickly retracted the proposal when contrary experimental evidence came to light demonstrating strict adherence to the conservation laws for individual atomic events, but Slater never forgave Bohr for convincing him to go along with such a radical proposal.« (Ebd., S. 123-124)

69 Vgl. ebd., S. 105-106. Der Wortlaut des letzten Satzes vor dieser Fußnote folgt Barads diesbezüglicher Formulierung vom »physical arrangement of the apparatus« (ebd., S. 114 und 117).

70 Barad geht an zwei Stellen in ihren Arbeiten auf das reziproke Verhältnis der Definierbarkeit von Welle und der Definierbarkeit von Teilchen ein, wie es sich in Bohr Arbeiten findet (vgl. Barad (1995): »A Feminist Approach to Teaching Quantum Physics«, S. 53-59 und Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 294-302). Hier zeigt Barad, wie durch Überlagerung verschiedener, selbst

dann Wellencharakter an den gemessenen Objekten hervorruft, wenn er über starre Teile verfügt – wie im Fall des Doppelspaltexperiments *ohne* federnden Detektor. Für das Auftreten von Teilchencharakteristika an den gemessenen Objekten müssten dieselben Teile desselben Apparats dagegen beweglich gehalten werden. Daher kann mit Barad festgestellt werden: »Complementarity is a matter of material incompatibility: the instrument cannot have a part that is simultaneously both movable and fixed.«⁷¹

Der Begriff der Komplementarität impliziert für Bohr also zweierlei und »folgt nicht der umgangssprachlichen Verwendung. Mit Komplementarität bezeichnet er ›einander ausschließend‹ und zugleich ›füreinander notwendig‹.«⁷² Übertragen auf Einsteins Doppelspaltexperiment heißt dies: *Entweder* es wird mittels des Detektors festgestellt, durch welchen Spalt ein Elektron schlüpft und dieses als Teilchen behandelt – dann ergibt sich auch ein für Teilchen charakteristisches Treffermuster. *Oder* es wird darauf verzichtet, diese Information zu erheben, indem stattdessen starr fixierte Spalten Verwendung finden – und das Ergebnis wird dann ein für Wellen charakteristisches Interferenzmuster sein. Wellen- und Teilchencharakter – wie auch die Starre bzw. Beweglichkeit der entsprechenden Bauteile des Apparats – sind also in Bohrs Sinne komplementär, hängen notwendigerweise miteinander zusammen, schließen sich aber ebenso

räumlich ausgedehnter Wellen von unterschiedlicher Wellenlänge ein räumlich begrenztes und lokalisiertes Wellenpaket erzeugt werden kann, das damit genau die Charakteristika aufweist, die klassischerweise mit dem Begriff des Teilchens verbunden werden (vgl. ebd., S. 298). In dem Grenzfall nun, dass unendlich viele solcher Wellen überlagert werden, ist die *Position* des sich durch diese Überlagerung ergebenden Wellenpakets zwar exakt bestimmt – zugleich ist aber die *Wellenlänge* auf größtmögliche Weise unbestimmt (vgl. den Text zu Abbildung 27 auf ebd., S. 299). Umgekehrt muss in dem Fall, in dem die *Wellenlänge* exakt bestimmt ist, die *Position* auf größtmögliche Weise unbestimmt sein, so dass allgemein gilt: »The more well-defined the spatial localization, the less well-defined the wavelength, and vice versa.« (Ebd.) Wellenlänge und Position als die für Wellen und Teilchen spezifischen Charakteristika können also nie zugleich bestimmt sein, sondern stehen in einem reziproken und sich gegenseitig innerhalb eines Kontinuums graduell ausschließenden Verhältnis. Wie in dieser Arbeit noch herausgearbeitet wird, geht es für Bohr anhand dieser Feststellungen insbesondere darum, dass die *Begriffe* Wellenlänge und Position selbst in einem solchen reziproken, komplementären Verhältnis zueinander stehen. Vgl. hierzu auch in Kapitel 1.3.1 die Fußnote 188.

71 Ebd., S. 329.

72 Barad (2012): *What Is the Measure of Nothingness?*, S. 22 Fn. 4. Die Reihenfolge dieser zwei Punkte in der Formulierung Barads lässt es so erscheinen, als wäre *füreinander notwendig* das Neuartige an Bohrs Begriff der Komplementarität. Dennoch deckt sich gerade dieser Punkt mit der umgangssprachlichen Verwendung von komplementär als *ergänzend* – ganz so, wie sich Komplementär-farben gegenseitig zu Weiß bzw. zu Schwarz ergänzen. So schreibt beispielsweise Ross Ashby in eben dieser alltäglicheren Bedeutung von Komplementarität über zwei seiner Bücher: »They are, however, intimately related, and are best treated as complementary; each will help to illuminate the other.« (Ashby (1956): *An Introduction to Cybernetics*, S. v) Das Neue an Bohrs Verständnis von Komplementarität ist dagegen auch Barads Auffassung nach das erweiterte Verständnis von komplementär als *ausschließend*, auch wenn dieser Punkt in dem im Fließtext gegebenen Zitat aus *What Is the Measure of Nothingness* zuerst gegeben wird. Auf deutlichere Weise schreibt auch Barad (2015): »Quantenverschränkungen und hantologische Erbschaftsbeziehungen«, S. 91 nur vom *ausschließenden* Charakter komplementärer Eigenschaften und stellt fest: »Das meint Bohr mit *Komplementarität*.« Ebenso findet sich eine äquivalente Formulierung in Barad (2007): *Meeting the Universe Halfway*, S. 415 Fn. 54 als »simultaneously necessary and mutually exclusive«.

in dem Sinne aus, dass sie niemals mittels ein und desselben Apparats genau bestimmt werden können. Entsprechend ist es laut Bohr unmöglich, dass das von Einstein behauptete Doppelverhalten von Elektronen als Welle *und* Teilchen eintritt, denn der Einbau des beweglichen Detektors würde zwangsläufig verhindern, dass die gemessenen Objekte sich weiter als Wellen verhielten, womit sich anstatt des Diffraktionsmusters ein für Teilchen charakteristisches Treffermuster auf dem Schirm hinter dem Doppelspaltgitter ergeben würde – *problem solved*.⁷³

Wie diese Ausführungen also nahelegen, genügt der Einwand Einsteins nicht, um die bohrschen Bemühungen um eine konsistente, quantenphysikalische Theorie und dessen Erklärung der widersprüchlichen experimentellen Ergebnisse aus den Angeln zu heben. Wie diese allerdings ebenso implizieren, setzt Bohrs auf dessen Verständnis von Komplementarität beruhende Antwort voraus, dass die zuvor genannte, grundlegende und intuitiv nachvollziehbare Annahme der klassischen Physik, dass alle physikalischen Objekte entweder der Kategorie Teilchen oder der Kategorie Wellen zugehören, aufgegeben werden muss. Auf welche Weise es Bohr gelingt, das Aufgeben dieser grundlegenden newtonschen Prämisse theoretisch einzufangen und welche weitreichenden und radikalen Folgen dies in seinen, vor allem aber in Barads Verständnis hat, zählt zu den wesentlichen Fäden, wie sie in den folgenden Kapiteln zu Bohrs Philosophie-Physik in Barads Verständnis fortgeführt und vertieft auf- und umgearbeitet werden.

1.2 Das time-of-flight measurement

In summary, the time of flight measurement is a sound method for determining the initial conditions only from the perspective of classical physics. The reason is that classical physics is premised on the assumption that observation interactions are continous and determinable. Quantum physics is based on the fact that interactions are discontinuous and indeterminable. Therefore, it is not possible to determine the initial conditions using time of flight measurements, or any other method for that matter.⁷⁴

Um die in Kapitel 1.1 angesprochenen Überlegungen fortzuführen, wird es im Folgenden um das zweite, in *Meeting the Universe Halfway* ebenso zentral verhandelte Experiment neben dem Doppelspaltexperiment gehen, mittels dessen Barad in die für den agentialen Realismus relevanten quantenphysikalischen Erkenntnisse und Implikationen einführt, nämlich das *time-of-flight measurement*.⁷⁵

Bei der von Barad in *Meeting the Universe Halfway* herangezogenen Variante dieses time-of-flight measurement handelt es sich zwar – ganz wie im Fall des Doppelspaltexperiments in der Debatte zwischen Einstein und Bohr – um ein Gedankenexperi-

73 Die hier nur vorläufig und lose umrissene Argumentation Bohrs wird insbesondere in Kapitel 1.3.2.2 weiter entfaltet werden.

74 Barad (1995): ›A Feminist Approach to Teaching Quantum Physics‹, S. 52.

75 Nicht zuletzt kommt dieses Beispiel bereits in dem frühen Artikel Barad (1995): ›A Feminist Approach to Teaching Quantum Physics‹ und zwar auf S. 47-52 zum Tragen. Barads spätere Beschreibung des time-of-flight measurement in *Meeting the Universe Halfway* folgt dann stärker der Fassung aus Barad (1996): ›Meeting the Universe Halfway‹, S. 169-171).