

Karl Czasny

**QUANTENPHYSIK
ALS HERAUSFORDERUNG
DER ERKENNTNISTHEORIE**

Verfaßt und zur Druckreife gebracht mit Unterstützung der
Wissenschafts- und Forschungsförderung der Stadt Wien sowie der
Bausparkasse der österreichischen Sparkassen Aktiengesellschaft

Gedruckt mit Unterstützung des
Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung in Wien

Autor und Verlag bedanken sich bei den drei Fördergebern.

Zum folgenden Text

Das tradierte Realitätsverständnis der Naturwissenschaften setzt beobachtungsunabhängig vorhandene Eigenschaften der Gegenstände voraus und scheint somit nicht vereinbar zu sein mit den Entdeckungen der modernen Physik, welche die Annahme einer wesentlich engeren Verzahnung von Subjekt und Objekt im Erfahrungsvorgang nahe legen. Da es bisher weder der Physik noch der Erkenntnistheorie gelang, diesen Widerspruch aufzulösen, ist die in allen Beobachtungen zum Tragen kommende Beziehung von Subjekt und Objekt grundsätzlich zu überdenken.

Der vorliegende Text will einen Beitrag zur Bewältigung dieser Aufgabe für die Untersuchungsgegenstände der Quantenmechanik leisten. Es handelt sich dabei um die dritte Arbeit aus einer Studienreihe, welcher der Autor den Gesamttitel „**Erkenntnistheoretische Grundlagen der Physik**“ gab. Im Rahmen dieser Studienreihe versucht er die in verschiedenen Teilbereichen der Physik auftretenden Subjekt-Objekt-Probleme neu zu durchdenken und einer philosophisch tragfähigen Lösung zuzuführen.

Die beiden übrigen Studien der genannten Reihe sind unter dem Titel „Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik“, Band I und Band II beim GRIN Verlag (<http://www.grin.com>) erschienen. Während Band I das Subjekt-Objekt-Thema für die klassische Mechanik und die Relativitätstheorie analysiert, befaßt sich Band II mit der formalwissenschaftlichen Basis der Physik (Mathematik, Logik) und beleuchtet den philosophischen Hintergrund der Reflexionen des Autors.

Da der hier präsentierte Text an seinem Beginn in Kurzform alle für die Argumentation benötigten Resultate dieser beiden Studien zusammenfaßt, ist seine **Lektüre ohne vorangehende Rezeption jener zwei kompletären Publikationen möglich**.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	IV
Vorbemerkung des Autors	V
1. Problemstellung und Aufbau der Argumentation	1
2. Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik	5
2.1 Die Perspektive des transzendentalen Pragmatismus	5
2.2 Das Äquivalenzprinzip	6
2.3 Das Komplementaritätsprinzip	11
2.4 Das Stellvertreterprinzip	15
3. Komplementarität und duale Natur des Lichts	17
3.1 Der Doppelspalt-Versuch	17
3.2 Die verschiedenen Arten von Komplementarität	19
3.3 Der Welle-Teilchen-Dualismus und das Mysterium des Lichts	
3.4 Dualismus versus Dialektik von Wesen und Erscheinung	
o These	
o Erläuterungen	
o Auflösung des Mysteriums des Lichts	
4. Unschärfe und Unbestimmtheit	
4.1 Drei Arten der Unbestimmtheit	
4.2 Drei Aspekte der Unbestimmtheit zweiter Art	
o Meßaspekt	
o Formaspekt	
o Modellaspekt im Zusammenspiel mit Meß- und Formaspekt	
4.3 Die transzendente Basis des Modellaspekts der Unbestimmtheit	
4.4 Zur Quantenstruktur von Raum und Zeit	
5. Verschränkung	
5.1 Aufriß der Problemgeschichte	
5.2 Kritik an der EPR-Argumentation	
6. Der Welle-Teilchen-Charakter der Materie	
6.1 Die Wellenfunktion und ihre Deutung	
6.2 Fehlinterpretationen der Wellenfunktion	
6.3 Wellenfunktion und Kommunikationsschema	
6.4 Wellenfunktion und Stellvertreterprinzip	
7. Ausblick	
Verzeichnis der zitierten Literatur	
Namen- und Begriffsregister	
Anhang	
Inhaltsverzeichnisse der zwei ergänzenden Texte der Studienreihe	
Die Homepage zur Studienreihe	
Angaben zum Autor	

Danksagung

Der als Philosoph ohne physikalische Fachausbildung am vorliegenden Thema arbeitende Autor bedankt sich bei Harry Paul, Prof. emer. für theoretische Physik an der Humboldt-Universität zu Berlin für seine ausführliche Kritik an den im Zuge der Erarbeitung des vorliegenden Textes formulierten Thesen sowie für zahlreiche äußerst hilfreiche Hinweise auf den aktuellen Stand der Quantenphysik und sein Feedback zur Erstfassung des nachstehenden Textes. Ferner gilt der Dank des Autors Peter Mittelstaedt, Prof. emer. für theoretische Physik an der Universität zu Köln und Martin Bojowald, derzeit Assistant Professor am Institut für Gravitation und Kosmologie (ICG) der Pennsylvania State University, die beide mit ihm auf schriftlichem Weg über die jeweils unterschiedliche erkenntnistheoretische Sicht auf die Quantenmechanik bzw. das Gravitationsproblem diskutierten. Ein ganz besonderer Dank ergeht an Peter Heintzel, Prof. für Philosophie, und Roland Fischer, Prof. für Mathematik (beide an der Universität Klagenfurt), sowie an Herbert Pietschmann, Prof. emer. für theoretische Physik an der Universität Wien, für die Abfassung der für die Publikationsförderung erforderlichen Fachgutachten. Der letztgenannte hat darüber hinaus durch ausführliche Beantwortung einer Reihe von physikalischen Fachfragen wesentlich zum Zustandekommen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Die Verantwortung für alle trotz dieser Hilfestellungen verbliebenen physikalischen Ungenauigkeiten oder Fehler liegt selbstverständlich ausschließlich beim Autor.

Vorbemerkung des Autors

Physik und Philosophie waren ursprünglich nicht zwei von einander geschiedene Wissenschaften, gingen dann lange Zeit getrennte Wege und sind spätestens seit dem vorigen Jahrhundert aufgrund der die traditionellen Fachgrenzen sprengenden Ergebnisse der modernen Physik wieder sehr eng verbunden. Diese Annäherung wurde vor allem durch die mit den grenzüberschreitenden Resultaten unmittelbar konfrontierten Physiker getragen. Sie stürzten sich mit erfrischender Unerschrockenheit auf die ihnen nicht vertrauten philosophischen Probleme und zeigten keinerlei Scheu vor der langen und großen Tradition philosophischer Auseinandersetzung mit den nun von ihnen aus neuer Perspektive anzuschneidenden Fragestellungen. Die Philosophen dagegen betraten nur äußerst zaghaft physikalisches Terrain, was sicherlich damit zu tun hat, dass sich zwar jedermann auch ohne vorangehende Ausbildung durch einfaches Nachdenken eine Meinung zu den Grundthemen der Philosophie bilden kann, eine fundierte Stellungnahme zu physikalischen Fragen aber nicht nur ein Mindestmaß an einschlägigem Fachwissen sondern auch ein gewisses Verständnis für den mathematischen Formalismus der modernen Physik voraussetzt.

Wenn somit die Philosophen das unwegsame Gelände der Physik aus gutem Grund scheuen, beweisen sie doch allein schon dadurch große Offenheit für den physikalisch-philosophischen Dialog, dass sie bereitwillig auf die von den Physikern in diesen Dialog eingebrachten Problemstellungen eingehen, dabei über manche philosophischen Naivitäten bzw. Irrtümer ihrer neuen Gesprächspartner hinwegsehen und die von diesen praktizierten Sichtweisen in ihren eigenen Reflexionen berücksichtigen.

Dieselbe **Nachsicht** und **Offenheit** muß der Autor der vorliegenden Publikation vom physikalischen Fachpublikum erwarten, wenn er als Philosoph, Nichtphysiker und Nichtmathematiker den selten begangenen umgekehrt gerichteten Weg beschreitet, also ein Treffen der beiden Wissenschaften auf dem Kerngebiet der Physik arrangiert, um zu prüfen, ob philosophische Anliegen und Strategien der Problemlösung nicht neues Licht auf die von der modernen Physik aufgeworfenen Fragestellungen im Grenzbereich zwischen Naturwissenschaft und Philosophie werfen können. Er geht mit der Publikation der Resultate seiner Reflexion ganz bewußt ein großes **Wagnis** ein, weiß er doch, daß ihm bei diesem Vorhaben trotz aller Vorsicht und Rückversicherung fast zwangsläufig in der einen oder anderen Frage Fehler und Mißverständnisse unterlaufen sein müssen. Besagtes Wagnis wird sich nur dann gelohnt haben, wenn die physikalischen Kritiker sich nicht auf das (beim Autor sehr willkommene!) Formulieren von Einwendungen beschränken, sondern auch der Mühe unterziehen, die vom vorliegenden Text aufgerissene ungewohnte Perspektive der Betrachtung bekannter Fakten ernsthaft aufzunehmen, um so ihre eingelernte Sicht auf diese Fakten durch Hinzufügung einer neuen Dimension zu vertiefen.

- Die Philosophie ist ein Kampf gegen die Verhexung unsres Verstandes durch die Mittel unserer Sprache.
- Ein philosophisches Problem hat die Form: „Ich kenne mich nicht aus.“
- Was ist dein Ziel in der Philosophie? - Der Fliege den Ausweg aus dem Fliegenglas zeigen.

Ludwig Wittgenstein, Philosophische Untersuchungen §§ 109, 123, 309

1. Problemstellung und Aufbau der Argumentation

Die Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie brachte empirische Ergebnisse, die sich mittels der begrifflich-theoretischen Werkzeuge der klassischen Physik nicht verstehen lassen und so zur Entwicklung eines neuen, für gewöhnlich mit dem Überbegriff ‚Quantentheorie‘ bezeichneten Ansatzes führten. Indem dieser mehrere Grundannahmen der klassischen Physik negiert, vollzieht er auch einen Bruch mit unserem alltäglichen Weltverständnis. Denn letzteres ist zum einen in die nun obsoleten Basis-hypothesen der klassischen Physik eingegangen und hat zum anderen deren Ergebnisse in sich aufgesogen. Als Beispiel für jene Rückwirkung der klassischen Physik auf das Alltagsbewußtsein mag die inzwischen zum Gemeingut gewordene Vorstellung dienen, daß sich Wirkungen jeglicher Art nicht augenblicklich, sondern bloß mit endlicher Geschwindigkeit von einem Ort zu einem anderen ausbreiten können, eine Überzeugung also, die - wie noch im Detail zu erörtern sein wird - von der Quantentheorie nicht geteilt wird.

Die verschiedenen Brüche der Quantentheorie mit dem begrifflich-theoretischen Rahmen der klassischen Physik sind für die Erkenntnistheorie aus mehreren Gründen von Interesse. Erstens werfen sie, wie eben angedeutet, unser herkömmliches Bild von der Zeitstruktur der zwischen den Ereignissen bestehenden Zusammenhänge über den Haufen. Zweitens stellen sie auch unsere Annahmen betreffend eine umfassende, durch Naturgesetze geregelte Determinierung aller Ereignisse in Frage. Und drittens schließlich rütteln sie sogar an unserer Überzeugung vom Vorhandensein eines subjektunabhängigen Seins, indem sie zu ganz ernsthaftem Zweifel an der bisher unumstößlichen Sicherheit führen, daß die von uns beobachteten Objekte auch unabhängig von unserer Beobachtungsaktivität existieren.

Diese Problematisierungen betreffen Kernthemen der Erkenntnistheorie. Denn zum einen zielen sie auf oberste Axiome aller naturwissenschaftlichen Erkenntnis, was Fragen nach der historischen Relativität, dem Geltungsbereich und der Begründung jener Axiome aufwirft. Zum anderen wird hier die jeder Erkenntnis zugrunde liegende Beziehung zwischen Subjekt und Objekt mit einer solchen Dringlichkeit thematisiert, daß Erkenntnistheorie ja Philosophie überhaupt zu einer Stellungnahme gezwungen ist.

Die mit der Existenz der Quantentheorie gestellte philosophische Herausforderung hat aufgrund von zwei in der Einleitung zum ersten Band der vorliegenden Studienreihe vertretenen Thesen für deren Autor zusätzliche

Brisanz. Die eine dieser beiden Thesen behauptet, daß die von der Quantenphysik bisher unternommenen Versuche, eine ihrer empirischen Praxis und deren Ergebnissen gerecht werdende Interpretation des Subjekt-Objekt-Verhältnisses zu entwickeln, als gescheitert anzusehen seien. Die andere These hält ergänzend fest, daß auch schon die klassische Physik unter einer Reihe schwerwiegender Mängel der Reflexion auf das bei ihren Begriffsbildungen und Beobachtungen unterstellte Subjekt-Objekt-Verhältnis leide. Jene zweite These weckt damit die vage Hoffnung, daß die Lösung dieser durch die Quantentheorie mitgeschleppten klassischen Probleme bei der Bewältigung der nunmehr neu definierten Subjekt-Objekt-Frage helfen könne, daß also mit anderen Worten die im ersten und zweiten Band der Studienreihe dargelegte neue Sicht der philosophischen Grundlagen der klassischen Physik eine brauchbare Basis abgeben könne für eine korrekte erkenntnistheoretische Deutung der empirischen Ergebnisse der Quantenphysik und deren mathematischer Interpretation.

Diese vage Hoffnung ist nun im Rahmen einer **zweistufigen** Argumentation auf den Prüfstand zu stellen:

Zunächst hat ein **erster** Argumentationsschritt im anschließenden Kapitel 2 nochmals stichwortartig die in den beiden vorangehenden Publikationen entfaltete Sicht auf die epistemologischen Implikationen der klassischen Physik zu skizzieren. Es wird dabei deutlich werden, daß besagte Perspektive als eine Aktualisierung und zugleich Radikalisierung der durch Kant eingeleiteten kopernikanischen Wende der Wissenschaftsphilosophie zu verstehen ist, welche ein die übliche Auffassung geradezu umkehrendes Bild vom ‚Objekt‘, vom ‚Naturgesetz‘, von ‚Ursache und Wirkung‘ sowie von anderen fundamentalen Konzepten der Naturwissenschaften im allgemeinen und der Physik im besonderen vermittelt.

In den Kapiteln 3 bis 6 gilt es dann in einem **zweiten** Schritt zu beweisen, daß diese Umkehr der Sehgewohnheit tatsächlich eine in erkenntnistheoretischer Hinsicht stimmige Neuinterpretation der Ergebnisse der Quantenphysik ermöglicht. Es ist allerdings schon jetzt vor einem möglichen Mißverständnis des eigentlichen Ziels der vorliegenden Bemühung um eine korrekte Deutung der Quantenphysik zu warnen: Der Autor wiegt sich keineswegs in der Illusion, daß uns die veränderte Sicht auf die Ausgangsannahmen der klassischen Physik der schwierigen Aufgabe entheben könne, diese Konzepte angesichts der durch die Quantenphysik präsentierten empirischen Resultate weiterzuentwickeln. Was bewiesen werden soll, ist vielmehr die These, daß das in Kapitel 2 zu skizzierende modifizierte Verständnis der klassischen physikalischen Basisüberzeugungen deren Weiterentwicklung wesentlich vereinfacht und zu einem im Vergleich zur herkömmlichen erkenntnistheoretischen Reflexion auf die Quantentheorie viel plausibleren, nicht durch Paradoxien und innere Widersprüche entstellten Resultat führt.

Um den diesbezüglichen Nachweis zu erbringen, werden im Rahmen der Kapitel 3 bis 6 der Reihe nach einige empirische Schlüsselergebnisse der

modernen Teilchenphysik sowohl in ihrer üblichen Interpretation als auch in der neuen Sicht betrachtet, wobei zugleich mit den empirischen Resultaten auch die zu ihrer Interpretation von der Quantentheorie entwickelten theoretischen Konzepte, als da sind die Komplementarität, die Unschärfe bzw. Unbestimmtheit, die Verschränkung, die Superposition und die Dekohärenz, in der herkömmlichen und der vom Autor entwickelten Deutung zur Sprache kommen.

In methodischer Hinsicht haben sowohl die vorangehenden Untersuchungen der Studienreihe als auch sämtliche nun folgenden Erörterungen den Stellenwert von sinnkritischen Analysen des physikalischen Sprachspiels. Diese wollen aufzeigen, daß alle herkömmliche Physik (sowohl in ihrer klassischen als auch in ihrer quantenphysikalischen Spielart) einem ganz bestimmten Selbstmißverständnis betreffend das Verhältnis zu ihren Objekten unterliegt, welches dazu führt, daß die **vermeintlichen** Paradigmen und Axiome der Physiker erheblich abweichen von den ihre Forschungstätigkeit **tatsächlich** leitenden obersten Annahmen und Prinzipien.¹

Da nun aber jenes einer Sinnkritik zu unterwerfende Sprachspiel der Physik zu einem guten Teil aus angewandter Mathematik besteht, sind zum Abschluß dieser einleitenden Bemerkungen noch einige Worte zum Verhältnis von philosophischen zu physikalischen Interpretationen fällig. Denn als Nichtphysiker und Nichtmathematiker muß sich der Autor der folgenden Überlegungen fragen, auf welchen Gebieten er denn überhaupt in eine für beide Seiten fruchtbare Diskussion mit physikalisch-mathematischen Experten eintreten kann. Bei der Antwort auf diese Frage sind vier Ebenen der Quantenphysik zu unterscheiden:

1. ihre als Antworten auf bestimmte theoretische Fragestellungen fungierenden verbalen Interpretationen von experimentellen Ergebnissen
2. ihre mathematischen Modellierungen dieser Ergebnisse
3. ihre verbalen Deutungen der mathematischen Modellierungen
4. ihre obersten Überzeugungen, welche im Sinne der zuvor erwähnten Basiskonzepte physikalischen Forschens allen mathematischen und verbalen Interpretationen, sowie allen Fragestellungen zugrunde liegen und damit einerseits sämtlichen experimentellen Erfahrungen immer schon vorausgesetzt sind, andererseits aber im Lichte dieser Erfahrungen und deren Deutung weiter entwickelt werden müssen

Es liegt auf der Hand, daß die zuletzt erwähnte vierte Ebene einen Bereich der Überschneidung der Themenfelder von Quantenphysik und Philosophie bildet und damit den Schwerpunkt des schwierigen, aber unerläßlichen Dialoges der beiden Disziplinen markiert. Der genannte Dialog darf sich jedoch nicht auf diesen zentralen Bereich der physikalischen Basiskonzepte und Axiome beschränken. Wenn nämlich die vorangehende Kurzcharakteristik jener vierten Ebene erwähnt, daß die auf ihr angesiedelten obersten

¹ Vgl. Czasny, K. (2010 b), die Abschnitte 7.5 (zum Sprachspielbegriff) und 9.7 (zur Methodik der sprachspielkritischen Differenzierung zwischen dem vermeintlichen und dem tatsächlichen Sinn von Handeln)

Überzeugungen einerseits im Lichte der auf den drei anderen Ebenen erzielten Ergebnisse weiter entwickelt werden, andererseits jedoch der Produktion dieser Ergebnisse immer schon vorausgesetzt sind, dann ist klar, daß sich die philosophische Reflexion auf diese erkenntnistheoretischen Grundlagen der Quantenphysik auch sehr intensiv auf die empirischen Resultate der genannten Wissenschaft und deren theoretische Interpretation einlassen muß.

Damit bleiben aber die drei anderen Ebenen stets mit in der Diskussion und müssen deshalb, so gut es geht, auch in der philosophischen Reflexion berücksichtigt werden, wobei der Philosoph natürlich weder alternative physikalische Theorien noch Vorschläge zu deren mathematischer Modellierung ausarbeitet, sondern sich mit notwendigerweise vage bleibenden Anregungen zur möglichen Weiterentwicklung der Theorie vor dem Hintergrund der mit seiner Hilfe besser verstehbaren obersten Axiome und Basiskonzepte des physikalischen Denkens begnügt². Denn die konkrete Ausführung dieser Weiterentwicklung ist und bleibt Aufgabe der Physiker.

Das in den vorangehenden Zeilen mit Nachdruck thematisierte Erfordernis eines interdisziplinären Zugangs zu den im folgenden behandelten Fragen stößt erfahrungsgemäß auf allergrößte Schwierigkeiten, was seitens der Philosophie an der oft hermetischen Terminologie und seitens der Physik an der für die meisten Philosophen nicht oder nur schwer überwindbaren Mathematik-Barriere liegt. Umso wichtiger ist es, alle sich bietenden Möglichkeiten zur Diskussion und zur wechselseitigen Unterstützung beim Abbau von Mißverständnissen und Irrtümern zu nützen. In diesem Sinne hat der Autor begleitend zur vorliegenden Buch-Publikation eine **Homepage** mit **Diskussionsplattform** eingerichtet, zu deren Besuch er alle LeserInnen herzlich einlädt. Nähere Angaben zu dieser Homepage finden sich im Anhang (siehe Inhaltsverzeichnis).

² Vgl. Kapitel 7

2. Erkenntnistheoretische Grundlagen der klassischen Physik

2.1 Die Perspektive des transzendentalen Pragmatismus

Der Schlüssel zur Aufdeckung der nicht allein die physikalische, sondern jegliche naturwissenschaftliche Forschungstätigkeit **tatsächlich** leitenden obersten Überzeugungen liegt in der Einsicht, daß das Subjekt seine bei allen kognitiven Bemühungen angestrebte Vereinigung mit dem Objekt niemals im reinen Erkennen selbst, sondern stets erst im geglückten Vollzug des an seinen Erkenntnissen orientierten Handelns erfährt. Schauplatz der Vermittlung von Subjekt und Objekt ist daher nicht ein vom Handeln abtrennbarer autonomer kognitiver Prozeß, sondern das in eine ihm vorgelegte und übergeordnete Praxis eingebettete Erkennen. Daraus folgt, daß sich Sinn und Wahrheitsgehalt jeder Aussage nur vor dem Hintergrund von deren Stellenwert für die **Praxis** des Aussagenden und seiner Interaktionspartner klären lassen. Da dieser Stellenwert darin besteht, zur Orientierung und Erfolgssicherung des mit bestimmten Gegenständen befaßten Handelns beizutragen, liegt der **Sinn** der naturwissenschaftlichen Aussage in den aus ihr ableitbaren Aktionsmöglichkeiten in Bezug auf jene Objekte, während sich ihr **Wahrheitsgehalt** an der Erfolgchance der mit ihrer Hilfe gesteuerten Handlungen bemißt. Wahr sind nur solche Aussagen, die sich in der betreffenden Praxis bewähren, während als widerlegt jene Urteile zu gelten haben, die zum Scheitern des an ihnen ausgerichteten Handelns führen.

Dieser Versuch eines konsequenten Bezugs des Erkenntnisprozesses auf die ihm vorgelagerte Praxis eröffnet dem hier vertretenen Ansatz nicht nur Zugang zu üblicherweise ausgeblendeten Tiefenschichten des Sinns von alltäglichen und wissenschaftlichen Überzeugungen, sondern grenzt ihn auch von allen ontologischen und empiristischen Standpunkten ab. Während nämlich erstere dem Erkennen die Fähigkeit zubilligen, ein aus den Handlungsbezügen herausgelöstes, an sich seiendes Objekt abzuspiegeln, möchten letztere Erkenntnis auf ein künstlich von seiner gesellschaftlichen Handlungsbasis abgetrenntes Substrat an individuellen sinnlichen Erfahrungen reduzieren. Darüber hinaus wird aber auch die konstruktivistische Position zurückgewiesen, da sie das uns im Erkennen erscheinende Objekt als Resultat einer willkürlichen, also ebenfalls aus den Erfordernissen der Praxis herausgelösten Konstruktion ansieht.

Bei aller Ablehnung des Konstruktivismus darf jedoch nicht übersehen werden, daß er zurück verweist auf die bis hin zu Descartes reichende Tradition des transzendentalen Denkens, die ihrerseits sehr brauchbare Anregungen für die Erarbeitung eines die eben genannten Fehler vermeidenden Problemzugangs bietet. Wichtigster Anknüpfungspunkt ist hier die Philosophie Kants. Von ihr übernimmt der vorliegende Ansatz einerseits die alle Reflexionen vorantreibende **Hauptfrage** nach dem Beitrag des Subjekts zur Konstitution der ihm erscheinenden Welt und andererseits die **Überzeugung**, daß insofern auch dem Objekt ein Anteil an jener Konstitution der Erscheinungswelt zuzusprechen ist, als das Subjekt Erfahrungen stets als Resultate

des Kontakts mit einem Gegenüber erlebt, das sich dabei auf ganz bestimmte Weise zeigt und gegen Fehlinterpretationen seines Verhaltens sperrt.

Eine Weiterentwicklung des Kantschen Standpunktes erscheint hauptsächlich nach drei Richtungen hin notwendig: Zum ersten gilt es den vom Begründer des modernen transzendentalen Denkens übersehenen Umstand zu berücksichtigen, daß die konstitutiven Leistungen des Subjekts sich nicht auf rein theoretische Aktivitäten beschränken, sondern vor allem im Bereich seines **praktischen** Tuns zu suchen sind. Zum zweiten ist der von ihm ebenfalls weitgehend vernachlässigten Tatsache Rechnung zu tragen, daß der Gebrauch von (insbesondere sprachlichen) **Symbolen** eine zentrale Rolle bei der im Zuge der Praxis stattfindenden Konstitution der Selbst- und Gegenstandserfahrung des Akteurs spielt. Und zum dritten ist im Gegensatz zu Kant davon auszugehen, daß die erfahrungskonstitutive Tätigkeit stets eine **soziale** Dimension aufweist und daher als gesellschaftliche Praxis begriffen werden muß.

Alle drei erwähnten Aspekte des Anknüpfens an Kant wurden bereits mehrfach von im Geiste des Königsberger Meisters oder in Opposition zu ihm philosophierenden Denkern entfaltet.³ Es kam daher bei der Erarbeitung des vorliegenden Standpunkts nur darauf an, die diesbezüglichen Ansätze in kritischer Auseinandersetzung anzueignen bzw. weiter zu entwickeln und so mit einander zu verknüpfen, daß sie für die Analyse der Konstitution von physikalischen, mathematischen und logischen Erkenntnissen fruchtbar gemacht werden können.⁴ Die dabei erarbeitete Position nennt sich **transzendentaler Pragmatismus**⁵, womit ein gewisses Naheverhältnis zu den von Karl-Otto Apel und Jürgen Habermas entwickelten Ansätzen einer transzendentalen (Apel) bzw. universalen (Habermas) Pragmatik angedeutet ist.⁶

2.2 Das Äquivalenzprinzip

Im Zentrum der Argumentationen der zwei die vorliegende Studie ergänzenden Untersuchungen zur klassischen Physik steht der Versuch, aus den eben erläuterten Ausgangshypothesen des transzendentalen Pragmatismus die obersten Grundsätze des naturwissenschaftlichen Erkennens her-

³ Am Rande sei darauf hingewiesen, daß in den letzten Jahren auch eine Reihe von neurobiologischen Beiträgen zur Kognitionswissenschaft die hohe Relevanz dieser drei Korrekturen des transzendentalen Ansatzes für das Verständnis des Erkenntnisprozesses bestätigt haben. Vgl. Bauer, J. (2005); insbesondere S. 69 und 165 (zum Konnex zwischen Erkennen und Handeln), S. 25, 76 und 165 (zum Konnex zwischen Erkennen und Sprechen), sowie S. 59, 106 und 118f. (zur sozialen Dimension der Konstitution von Erfahrung)

⁴ In der ersten Publikation der Studienreihe findet sich eine detaillierte Überblicksdarstellung der Bezüge der Position des Autors zu den einschlägigen philosophischen Strömungen und Standpunkten, die unter anderem auf folgende Denker eingeht: G.W.F. Hegel, K. Marx, C.S. Peirce, E. Husserl, G. Frege, L. Wittgenstein, S. Freud, O. Bauer, M. Adler, H. Kelsen, Th. W. Adorno, J. Habermas, K.-O. Apel und E. Tugendhat. Vgl. Czasny, K. (2010 a), Abschnitt 1.4

⁵ In der Folge werden auch alle übrigen vom Autor der Studienreihe selbst geprägten Begriffe bei ihrem erstmaligen Auftreten im Text durch *kursive Schrift* gekennzeichnet.

⁶ Die Ersetzung des Terminus ‚Pragmatik‘ durch jenen des ‚Pragmatismus‘ soll die im Zuge der beiden vorangehenden Publikationen ausführlich behandelte Differenz in der jeweiligen Sicht auf die zwischen Theorie und Praxis bzw. Sprechen und Handeln bestehenden Relationen anzeigen. Vgl. Czasny, K. (2010 b), Teil 9

zuleiten. Das Ergebnis dieser Bemühungen besteht in der Aufdeckung von **drei Prinzipien**, die nun kurz vorgestellt werden sollen, wobei jeweils auch auf die aus ihnen folgenden Konsequenzen für die Struktur unseres Naturbilds hingewiesen wird.

Die Suche nach dem ersten und **obersten** Prinzip alles Erkennens folgt der Frage, wie das Erkennen zur Orientierung des Handelns beiträgt. Sie führt zu dem Ergebnis,

- daß Erkennen nie etwas anderes war, ist oder sein wird als die **Rückführung des Unbekannten auf das Bekannte**,
- und daß jede derartige Rückführung zu der Einsicht führt, etwas bislang Unbekanntes sei als **äquivalent** mit einer bereits bekannten Erscheinung anzusehen, **weil** es sich so wie diese **verhält** und man sich ihm gegenüber daher selbst vermutlich so verhalten kann, wie gegenüber dem bekannten Phänomen.

Alle wissenschaftlichen Modelle erfüllen diese für die sichere Steuerung unseres Handelns wesentliche Rückführungsfunktion. Denn jedes Modell behauptet, daß irgend ein bislang unbekannter Sachverhalt nach dem Muster einer vertrauten Angelegenheit zu begreifen sei und verspricht damit implizit, daß wir uns ihm gegenüber verhalten können wie im Falle der gut bekannten Vorbildsituation. Wir tun das dann auch, und so lange wir damit Erfolg haben, sagen wir, das Modell sei zutreffend. Erst wenn wir bei der Orientierung unseres Handelns an dem Vergleichsbild scheitern, sind wir gezwungen nach einem besser funktionierenden Modell zu suchen, das sich nun neuerlich in der Praxis bewähren muß.

Ein Blick auf die Entwicklung der Physik von ihrer Ur- und Altertumsge-
schichte bis zur Gegenwart belegt die universelle Gültigkeit jenes Grund-
satzes.⁷ Er macht deutlich, daß das genannte Prinzip nicht nur bereits in
den ersten Anfängen dieser Geschichte, nämlich bei der Herausbildung
des animistischen Naturbilds der Frühmenschen, zum Tragen kam, son-
dern auch im Zentrum des Fortschritts der modernen Physik steht - zeigt
doch die genauere Betrachtung des von Einstein formulierten **Äquivalenz-
prinzips**, daß es sich dabei bloß um eine Adaptierung des seit je her gülti-
gen obersten Grundsatzes aller Erkenntnis für die Problemlagen der Physik
des zwanzigsten Jahrhunderts handelt.⁸

Die Analysen des in weiterer Folge als Äquivalenzprinzip (manchmal auch
ausführlich als *erkenntnistheoretisches Äquivalenzprinzip*) bezeichneten
Grundsatzes der Rückführung des Unbekannten auf das Bekannte im
Rahmen der beiden Studien zur klassischen Physik werfen nicht nur neues

⁷ Vgl. Czasny, K. (2010 a), Teil 5

⁸ Das Einsteinsche Äquivalenzprinzip wird im Rahmen der Studie über die erkenntnistheoretischen Grundlagen der klassischen Physik zunächst in Band I, Abschnitt 5.1 vor dem Hintergrund der eben erwähnten historischen Betrachtung des allgemeinen erkenntnistheoretischen Äquivalenzgrundsatzes behandelt und dann in Band II, Abschnitt 8.12 einer ausführlichen Analyse unter logischen Gesichtspunkten unterworfen. Vgl. Czasny, K. (2010 a, b)

Licht auf die **Dynamik** des Erkenntnisprozesses, sondern erhellen auch die **formale Gestalt** unseres Naturbildes:

Weil elementarste Schichten dessen, was uns immer schon bekannt ist, praxisbewährte Gewißheiten enthalten, die unsere zwischenmenschlichen Kontakte zum Gegenstand haben, unterstellen wir auch sämtlichen Strukturen des Objektbereiches eine jenen sozialen Beziehungsmustern ähnelnde Form. Es ist allerdings anzumerken, daß wir diese Unterstellung nicht an der durch und durch verdinglichten Oberfläche unseres Bewußtseins praktizieren, sondern auf der nur durch kritische Reflexion erschließbaren Tiefenebene des tatsächlichen Sinns unseres Handelns. Erst wenn die Selbstreflexion zu der genannten Ebene vordringt, wird daher deutlich,

daß wir unbeschadet aller anderslautenden Glaubenssätze in unserer tatsächlichen Alltags- bzw. Wissenschaftspraxis

- jedes Objekt nach dem Muster eines Interaktionspartners behandeln, als ob es gleich uns ein Subjekt wäre,
- sämtliche Wirkungen bzw. Wechselwirkungen zwischen den Objekten nach dem Vorbild von sozialen Handlungen bzw. Interaktionen denken (weshalb alle Arten von Kausalität Abbilder verschiedener Typen von sozialen Wechselwirkungen sind)
- und schließlich mit dem durch die Gesetzesform ausgedrückten Zwangscharakter der auf die Objekte projizierten Wirkungsmuster die Steuerungsmacht unserer Handlungsregeln nachbilden.

Diese Einsicht steht durchaus in Einklang mit der Tatsache, daß sich umgekehrt auch das Subjekt in mannigfacher Hinsicht nach dem Vorbild seiner Objekte begreift - man denke im vorliegenden Kontext etwa an Versuche, den menschlichen Körper und Geist sowie soziale Beziehungen mittels verschiedenster Arten von Maschinenmodellen zu verstehen. Sie sind nur Belege für die umfassende Geltung des Äquivalenzprinzips, dessen Regulierungsmacht offenbar so weit reicht, daß sich ihr auch alle Bemühungen um Selbsterkenntnis unterwerfen. Hat daher ein im Objektbereich registrierter Tatbestand erst einmal den Stellenwert einer problemlos akzeptierten Gewißheit erlangt, so wird er bedenkenlos als Modell für die Rückführung eines in der Subjektsphäre angesiedelten, aus bestimmten Gründen fragwürdig gewordenen Vorgangs bzw. Zustandes auf etwas Bekanntes herangezogen.

Resultat dieser bis zur Selbstaufgabe radikalen Anwendung des erkenntnistheoretischen Äquivalenzprinzips sind vielschichtige Zusammenhänge **wechselseitiger Vermittlungen** von Subjekt und Objekt. Auch wenn sie im Einzelfall niemals zur Gänze rekonstruiert werden können, so ist doch davon ausgehen, daß sich an der Basis jedes solchen Vermittlungsgefüges die Rückführung eines zu erkennenden Tatbestands im Objektbereich auf ein als bekannt erachtetes soziales Phänomen findet. Denn der Grund für die kontinuierliche Anwendung des Äquivalenzprinzips ist ja, wie bereits erwähnt, die Absicht der Handelnden, das Unbekannte ihrem Tun verfü-

bar zu machen. Ziel des Erkennens ist also die Aufrechterhaltung der autonomen **Handlungsfähigkeit** der Akteure und nicht die Herstellung einer sich in vorgefundene Objektgefüge einordnenden **Funktions**tüchtigkeit. Man hat deshalb den Gegenstand letztlich als ein **virtuelles Subjekt** anzusehen⁹ und darf die umgekehrte Position (also die Auffassung des Subjekts als *virtuelles Objekt*) immer bloß im Sinne einer vorläufigen, in tiefere Erkenntnis aufzulösenden Hilfshypothese einnehmen.

Äquivalenz ist im Unterschied zu vollkommener Identität stets nur so etwas wie ‚Gleichheit unter bestimmten Gesichtspunkten‘, wobei sich letztere von den praktischen Orientierungserfordernissen jenes Handelns herleiten, welches sich der jeweiligen Erkenntnisse bedienen möchte. So wie zum Beispiel Masse und Energie sind daher auch bestimmte Aspekte des gesellschaftlichen Lebens (wie etwa die Orientierung des sozialen Handelns an Regeln) niemals völlig ident mit gewissen Strukturmerkmalen des Objektbereichs (wie etwa der Steuerung des Objektverhaltens durch Naturgesetze), sondern nur äquivalent - also ident unter dem Gesichtspunkt bestimmter Handlungsziele des das Objektverhalten beobachtenden Akteurs.¹⁰

Was sind nun aber die Ziele, aus deren Blickwinkel uns die zuletzt erwähnte Äquivalenzen von sozialen Tatbeständen und Naturphänomenen erscheinen? Betrachten wir vor der Beantwortung dieser Frage zunächst beispielhaft die Äquivalenz von Masse und Energie: Sie erschließt sich vor dem Hintergrund der Absicht, den Bewegungszustand eines Objekts zu verändern. Denn der Energiegehalt des Objekts widersetzt sich dem an diesem Ziel orientierten Handeln in genau derselben Weise wie die Masse des Gegenstands. Man benötigt also zum Beispiel ein wenig mehr Kraft zur Beschleunigung eines rot glühenden Eisenstücks als zur entsprechenden Beschleunigung desselben Objekts, wenn es sich in kaltem Zustand befindet. Der vermehrte Energiegehalt des glühenden Metalls erscheint daher dem die zusätzliche Kraft aufwendenden Akteur als äquivalent zu seiner trägen Masse.¹¹

Die Äquivalenz von sozialen Strukturen und solchen des Objektbereiches konstituiert sich im Gegensatz zum vorangehenden Beispiel nicht in Bezug auf ein konkretes Handlungsziel, sondern im Lichte der allen inhaltlichen

⁹ Diese ‚virtuelle Subjektivität‘ des Gegenstands unterscheidet sich durch ihren von der Funktion der Handlungsorientierung her bestimmten ‚**Als-Ob-Status**‘ von objektiv idealistischen Konzepten wie etwa der Leibnizschen Monade.

¹⁰ Wegen dieser bei jeder Äquivalenz nicht vollständigen Gleichheit haben auch die eben angesprochenen Analogien zwischen den Strukturen unseres sozialen Handelns und den im Erkenntnisvorgang auf die Objekte projizierten Ordnungsmustern ihre genau definierten **Grenzen**. Die in den vorangehenden Bänden der Studienreihe präsentierten Analysen versuchen daher überall, wo sie entsprechende heimliche Analogien aufspüren, eine möglichst genaue Bestimmung dieser Grenzen vorzunehmen. Auch die noch folgenden Überlegungen, werden sich dort, wo es um eine möglichst präzise Bestimmung des jeweils unterschiedlichen Stellenwerts von Naturgesetzen in der klassischen Physik und in der Quantentheorie geht, im Detail mit den Grenzen der Äquivalenz zwischen den das menschliche Handeln leitenden Regeln und den nach dem Modell dieser Regeln konzipierten Naturgesetzen beschäftigen müssen. Vgl. Abschnitt 6.3

¹¹ Vgl. Einstein, A., Infeld, L. (1950), Seite 235

Zielsetzungen vorgeordneter Absicht, die Verhaltensform ‚kommunikatives Handeln‘ auch im Kontakt mit den Objekten zu praktizieren: Kommunikatives Handeln (so wie wir es in unseren sozialen Kontakten einüben) ist immer an Regeln orientiert und setzt als Gegenüber einen selbst an Regeln orientierten Interaktionspartner voraus. Wenn ich daher diesen Verhaltensstil auch in meinen Objektkontakten praktizieren will, muß ich von der Generalhypothese ausgehen, daß das Verhalten der Gegenstände prinzipiell so wie mein eigenes Verhalten durch Regeln gesteuert ist - wobei ich dann bei genauerer Betrachtung durchaus zugestehen kann, daß die Dinge ihren Regeln auf eine etwas andere Weise folgen als wir Menschen.

Im Laufe unserer Geschichte kommt es zu sehr unterschiedlichen Ansichten darüber, **wie** die Objekte ihren Regeln folgen, und jede derselben korrespondiert einer ganz bestimmten Art des kommunikativen Herantretens an die Gegenstände:

- In den vorwissenschaftlichen Epochen geht man (grob vereinfachend gesprochen) davon aus, daß es den Objekten bis zu gewissem Grad frei steht, ihre Regeln zu befolgen oder sie zu mißachten. Der Umgang mit den Dingen ist daher ein **dialogischer**: Man beschwört die Gegenstände durch Bitte, Schmeichelei oder Bann, sich auf bestimmte Weise zu verhalten, bzw. nicht zu verhalten (zu regnen, oder nicht zu regnen, zu stürmen oder nicht zu stürmen, usw.).
- Daß das Objekt seinen Regeln immer und überall zwanghaft folgen muß, ist erst eine Annahme des naturwissenschaftlichen Zeitalters, in dem die übergeordnete Kommunikationsstrategie nicht mehr darin besteht, mit den Gegenständen in eine bestimmte Art des Dialoges einzutreten. Denn man hat inzwischen bemerkt, daß es bequemer ist, sie zu **überlisten**, indem man genau jene Ausgangs- und Randbedingungen herstellt, unter denen ein zwanghaft gesetzesmäßiges Verhalten zu den jeweils gewünschten Zuständen führt. Aus der dialogischen Interaktion wird damit ein **strategisches Kommunizieren**.
- Den Übergang von der klassischen Physik zur Quantentheorie kennzeichnet dann eine neuerliche Änderung der Ansicht darüber, auf welche Art die Objekte ihren Regeln folgen, und eine der Hauptaufgaben des fünften und sechsten Kapitels dieser Studie wird darin bestehen, genauer herauszuarbeiten, wie besagte Änderung zu verstehen ist.

In ihrem Zusammenspiel ergeben die Äquivalenzbeziehungen zwischen den von uns im Objektbereich wahrgenommenen Ordnungsmustern und der Form unserer eigenen Interaktionen ein geschlossenes Gefüge, das als ein aller Objekterkenntnis zugrunde liegendes **Kommunikationsschema** bezeichnet werden kann. Die historischen Betrachtungen in Teil 5 des ersten Bandes der Studienreihe zeigen auf, daß sich die konkrete Ausgestaltung dieses Kommunikationsschemas und damit des Naturbildes in Abhängigkeit vom geschichtlichen Wandel der gesellschaftlichen Verhältnisse ändert, während seine Grundstruktur erhalten bleibt. Sie verdeutlichen damit zugleich, daß die prinzipielle Analogie zwischen Gesellschaftsform und

Naturbild bei aller Wandelbarkeit des letzteren als ein **oberstes, unhistorisches Apriori** jeder Naturerkenntnis zu gelten hat.

Der apriorische Charakter des Kommunikationsschemas bezeichnet eine wichtige Differenz zwischen dieser ‚obersten‘ und wichtigsten Anwendung des Äquivalenzprinzips und dem allen einzelwissenschaftlichen Modellbildungen zugrunde liegenden Behaupten von Äquivalenzbeziehungen: Die Aussagen letztgenannten Typs haben nämlich nicht den Stellenwert einer jeder einzelnen Erfahrung vorausgehenden (weil sie strukturierenden) Generalhypothese, sondern fußen, wie zuvor am Beispiel der Äquivalenz von Masse und Energie angedeutet, auf Beobachtungsergebnissen, welche zu der **empirisch begründeten** Schlußfolgerung führen, daß zwei Objekte ganz unterschiedlichen Typs auf ein bestimmtes Verhalten des Subjekts identisch reagieren und daher im Lichte des betreffenden Verhaltens als äquivalent anzusehen sind.

Abschließend noch eine Bemerkung zu dem im Postulat eines unsere Naturerkenntnis strukturierenden Kommunikationsschemas angesprochenen **Anthropomorphismus** der physikalischen Modelle: Letzterer tritt so offen zu Tage, daß er schon vielfach konstatiert wurde¹². Was bisher aber noch weitgehend fehlte und daher zentrales Thema der vorliegenden Studie bildet, ist seine systematische erkenntnistheoretische Reflexion. So erschließt sich etwa der eigentliche Grund für den herausragenden erkenntnistheoretischen Stellenwert des Kommunikationsschemas nur dann, wenn man den Erkenntnisvorgang auf eine konsequentere Weise, als dies bisher geschah, pragmatistisch betrachtet. Denn nur eine solche Sichtweise kann deutlich machen,

- daß die aller Sicherstellung erfolgreichen Handelns **vorgelagerte** Basisfunktion des Erkennens für das Tun darin besteht, objektbezogene Tätigkeit in Gestalt kommunikativer Praxis überhaupt erst einmal zu **ermöglichen**,
- und daß daher (wie zuvor erläutert) sämtliche auf den Objektbereich projizierten Modelle die wahrgenommenen Vorgänge als Kommunikationsprozesse darzustellen haben, weil sie nur so den Akteur in die Lage versetzen, sich interagierend in diese Prozesse einzuklinken.

2.3 Das Komplementaritätsprinzip

Beim zweiten der drei aus den Ausgangsannahmen des transzendentalen Pragmatismus ableitbaren Grundsätze des naturwissenschaftlichen Erkennens handelt es sich um das Komplementaritätsprinzip. Es wurde zwar so wie das Äquivalenzprinzip durch die moderne Physik ein Stück weit ins Bewußtsein der Forscher gerückt, muß jedoch, wenn man es in seiner ganzen erkenntnistheoretischen Tragweite erfassen will, von bestimmten Spezifizierungen, die sich auf seinen physikalischen Anwendungsbereich,

¹² Diesbezügliche Hinweise finden sich zum Beispiel bei Bauer, O. (1916), Spengler, O. (1918) und Kelsen, H. (1946), sowie in jüngerer Zeit bei Krieger, M., H. (1992) und Latour, B. (2001)

die Quantenmechanik, beziehen, befreit werden.¹³ Die Untersuchungen dieser Studienreihe liefern die entsprechenden Bereinigungen und decken so ein **allgemeines Komplementaritätsprinzip** auf, das uns bei der Analyse der Erfahrungskonstitution in **drei Spielarten** gegenübertritt:

Zum ersten als transzendentes Grundprinzip, dessen kontinuierliche Anwendung durch alle menschlichen Akteure jenen beiden fundamentalen Mustern der kognitiven Handlungsorientierung zugrunde liegt, welche im ersten Band der Studienreihe als der ‚*raum-zeitliche Orientierungsrahmen*‘ und das ‚*Kraft-Materie-Paradigma*‘¹⁴ bezeichnet werden. Zum zweiten als ein alles Erleben von unterschiedlichen Objektqualitäten steuernder Konstitutionsmechanismus und zum dritten als zentrales Muster der quantenphysikalischen Erfahrung. Um diese drei Spielarten des allgemeinen Komplementaritätsprinzips von einander zu unterscheiden, soll in der Folge von *transzendentaler*, *alltäglicher* und *quantenphysikalischer Komplementarität* gesprochen werden.

Die Funktionsweise des allgemeinen Komplementaritätsprinzips wird am besten verdeutlicht durch etwas näheres Betrachten der transzendentalen Komplementarität, was nun durch eine kurze Skizzierung der im ersten Band durchgeführten Analyse des raum-zeitlichen Orientierungsrahmens geschehen soll.¹⁵ Besagte Analyse nimmt eine bisher von aller Philosophie übersehene Fragestellung zu ihrem Ausgangspunkt. Sie interessiert sich nämlich nicht in kontemplativer Haltung dafür, **was** der Raum bzw. die Zeit ist, oder **wie** raum-zeitliche Erfahrungen konstituiert werden, sondern fragt in pragmatistischer Perspektive danach, **warum** wir als Handelnde aus ganz praktischen Gründen zwischen einem Neben- und einem Nacheinander von Gegebenheiten **unterscheiden müssen**. Denn so selbstverständlich diese Unterscheidung auf den ersten Blick scheinen mag, so wenig ist sie es.

Zur Untersuchung der genannten Frage wird der Leser zu einem transzendentalen Gedankenexperiment eingeladen, bei dem er sich in einen abgedunkelten Raum zu begeben hat, in dem er nichts sieht als einen kleinen roten Leuchtpunkt. Nun schließt er die Augen, und wenn er sie wieder öff-

¹³ Die erste Formulierung des Komplementaritätsprinzips in seiner quantenphysikalischen Spezifikation war eine der großen Leistungen von Niels Bohr. Er war auch weitsichtig genug einzuräumen, daß dem von ihm entdeckten Prinzip möglicherweise eine viel umfassendere Bedeutung zukommen könnte; vgl. Bohr, N. (1937), Seite 209. Es gelang aber weder Bohr, noch einem der anderen Pioniere der Quantenphysik, die allgemeine erkenntnistheoretische Relevanz dieses Prinzips zu erfassen. In weiterer Folge scheiterten auch die allergrößten Köpfe der modernen Physik in dem Bemühen, den wahren Stellenwert dieses fundamentalen Gesetzes menschlicher Erkenntnis zu erfassen. Selbst ausgewiesene Kenner der philosophischen Tradition wie etwa Wolfgang Pauli tappten bis an ihr Lebensende im Dunkeln. Bei ihrem Ringen um ein tieferes Verständnis der in den quantenmechanischen Komplementaritätseffekten zum Ausdruck kommenden Subjekt-Objekt-Relation dachten sie sogar an mögliche „magische Wirkungen“ des Beobachters auf seinen Gegenstand und an deren Untersuchung durch die „empirische Parapsychologie“ - vgl. Pauli, W. (1956) - nicht jedoch an eine nüchterne transzendente Analyse der Faktenlage.

¹⁴ Ein Paradigma ist die auf einen bestimmten Kommunikationstyp und damit auf ein bestimmtes Wissenschafts- und Praxisfeld bezogene Spezifikation des allgemeinen Kommunikationsschemas; vgl. die diesbezüglichen Erläuterungen samt Kritik am Kuhnschen Paradigmenkonzept in Czasny, K. (2010 b), Abschnitt 6.4

¹⁵ Die ausführliche Untersuchung findet sich in Czasny, K. (2010 a), Teil 2.

net, nimmt er nichts als einen grün leuchtenden Punkt wahr. Der Leser möge sich nun fragen, unter welchen Bedingungen er in dieser Situation sagt, daß sich das Grün des zweiten Punktes in einiger Entfernung **neben** dem inzwischen nicht mehr sichtbaren Rot des ersten befinde, und unter welchen Bedingungen er meint, es liege **danach** - aus dem roten Punkt sei also mit anderen Worten ein grüner geworden.

Die Antwort eröffnet einen Blick auf die sonst gänzlich im Verborgenen ablaufende Arbeit des transzendentalen Komplementaritätsprinzips. Sie lautet nämlich: „Ein ‚Daneben‘ erlebe ich in einer solchen Situation nur dann, wenn ich registriere, daß ich mich zwischen den Wahrnehmungen des roten und des grünen Leuchtpunktes selbst bewegt habe (wobei diese Bewegung auch in einer bloßen Veränderung des Blickwinkels bestehen kann). Andernfalls erlebe ich ein ‚Danach‘, also eine Verwandlung des roten in einen grünen Leuchtpunkt.“

So wie für den Quantenphysiker im Sinne der quantenphysikalischen Komplementarität die Art der Erscheinung des Lichts (als Welle oder Teilchen) davon abhängt, welche Aktionen er als Experimentator setzt, hängt im vorangehenden Experiment die Art der Erscheinung einer Differenz zwischen zwei Sinneseindrücken (als ein Neben- oder Nacheinander) von gewissen Handlungen der Versuchsperson (Bewegung oder Ruhen) ab. In beiden Fällen liegt also eine bestimmte Wahrnehmungsalternative vor, die **komplementär** zum jeweils erfahrungskonstitutiven Tun des Subjekts ist.

Auch im Bereich der alle Erfahrungen von unterschiedlichen Objektqualitäten steuernden alltäglichen Komplementarität ist eine ähnliche Situation gegeben: Welche Eigenschaft eines Gegenstandes ich erfahren kann, hängt immer davon ab, mit welchem erfahrungskonstitutiven Handeln ich an das betreffende Objekt herangehe: rücke ich ihm mit einer Waage zuleibe, werde ich stets nur sein Gewicht erfahren, nähere ich mich ihm mittels eines Geigerzählers, kann ich bloß Kenntnis von seiner allfälligen Radioaktivität, niemals aber von seinem Gewicht erlangen.

Die transzendente und die quantenphysikalische Spielart der Komplementarität unterscheiden sich unter anderem dadurch von der zuletzt erwähnten Alltagskomplementarität, daß bei ihnen neben der Komplementarität zwischen dem erfahrungskonstitutiven Handeln und dem jeweiligen Wahrnehmungsergebnis zwei weitere, eng mit einander zusammenhängende Aspekte der Komplementarität vorliegen:

- Einerseits besteht in beiden Fällen eine Komplementarität zwischen den zwei durch je unterschiedliches erfahrungskonstitutives Handeln erzeugten Erscheinungen: Letztere ergeben nämlich zusammen ein in sich geschlossenes Bild des jeweiligen Vorgangs im Objektbereich: So wie aus der kombinierten Betrachtung von Wellen- und Teilchenercheinungen ein Gesamtbild des sich ausbreitenden Lichts resultiert, ergibt die kombinierte raum-zeitliche Betrachtung eines beliebigen Tat-

bestands im Objektbereich einen vollständigen Eindruck von dessen Prozeßhaftigkeit.

- Andererseits ist in beiden Fällen auch auf der Ebene des erfahrungskonstitutiven Handelns eine entsprechende Komplementarität gegeben. Damit ist gemeint, daß die den zwei jeweils komplementären Erfahrungsformen zugrunde liegenden Handlungstypen mit einander das gesamte Tätigkeitsspektrum einer bestimmten Praxisdimension abdecken, also jeweils streng alternativen Charakter haben. In diesem Sinne sind zum Beispiel die alle Erfahrungen eines Neben- bzw. Nacheinanders fundierenden Handlungsmuster des Sich-Bewegens bzw. Ruhens die zwei einander ausschließenden, einzigen Optionen der Bewegungsdimension unserer Praxis.

Dieses Gegenüberstehen von einander jeweils entsprechenden Komplementärstrukturen im Bereich der Erscheinungen und auf der Ebene des erfahrungskonstitutiven Handelns führt zurück zu der Ausgangsfrage, **warum** wir im Erkennen und Wahrnehmen kontinuierlich das Komplementaritätsprinzip anwenden, warum wir also etwa zwischen einem Neben- und Nacheinander von Erfahrungen unterscheiden müssen. Im konkreten Fall des raum-zeitlichen Orientierungsrahmens lautet die Antwort:

Nur deshalb, weil das Subjekt im Zuge des Erfahrens von Sinneseindrücken aus Gründen der Selbststeuerung des eigenen Handelns auch seinen eigenen, der jeweiligen Wahrnehmung zugrunde liegenden Bewegungszustand registrieren muß, unterscheidet es im Objektbereich zwischen Raum und Zeit. Während sich das Erfahren eines Nebeneinanders, bzw. eines Raumes, durch die in das Erleben von **Eigenbewegungen** eingebundenen Wahrnehmungen konstituiert, entsteht das Erfahren eines Nacheinanders, bzw. einer Zeit, im Zuge von Wahrnehmungen, die vor dem Hintergrund des Erlebens von eigener **Unbewegtheit** stattfinden.¹⁶

Ergänzend ist anzumerken, daß auch die dem eingangs erwähnten Kraft-Materie-Paradigma zugrunde liegende Unterscheidung zwischen Kraft- und Materieerfahrungen auf einem der Handlungssteuerung dienenden, kontinuierlichen Herstellen von Bezügen zwischen den jeweiligen Sinneseindrücken und dem Erleben des zu ihrer Erfahrung führenden eigenen Handelns fußt: Ein und derselbe Sinnesbefund wird entweder als Kraft- oder als Materieerfahrung interpretiert, je nachdem, ob der Akteur zugleich mit seinem Erleben bei sich selbst eine Haltung eigener körperlicher **Passivität** oder **Aktivität** registriert.¹⁷

¹⁶ Das im vorliegenden Abschnitt diskutierte Gedankenexperiment erhellt nur die unterste Schicht der Konstitution des raum-zeitlichen Orientierungsrahmens und wirft noch kein Licht auf jene höherstufigen kognitiven Leistungen, welche zu einer Loslösung dieses Orientierungsrahmens vom zufälligen Bewegungszustand des einzelnen Individuums führen.

¹⁷ Die Analyse der Komplementarität von Kraft- bzw. Materieerscheinungen und körperlicher Passivität bzw. Aktivität des Akteurs ist in der ersten Publikation der Studienreihe nachzulesen. Vgl. Czasny, K. (2010 a), Teil 4

Die vorangehenden Ausführungen sollten deutlich gemacht haben, daß zwischen dem Äquivalenz- und dem Komplementaritätsprinzip folgende Beziehung besteht: Beide leitenden kognitiven Prinzipien stellen sicher, daß alle Erkenntnisse und sämtliche auf deren Basis stattfindenden Wahrnehmungen¹⁸ zur Steuerung des Handelns verwendet werden können. Während sich aufgrund kontinuierlicher Anwendung des Äquivalenzprinzips eine inhaltliche Struktur unserer Wahrnehmungen herausbildet, welche es erlaubt, die im sozialen Handeln eingeübten Aktionsmuster auch im Kontakt mit den Objekten anzuwenden, stellt das Komplementaritätsprinzip sicher, daß uns alle Wahrnehmungswerkzeuge (der raum-zeitliche Orientierungsrahmen, das Kraft-Materie-Paradigma sowie die Begriffe und Kategorien) gestatten, im Verlauf des Handelns nicht nur das Objekt, sondern zugleich immer auch uns selbst als Akteure im Blick zu behalten. Man kann daher sagen: Das Äquivalenzprinzip sorgt für handlungsgerechte **inhaltliche** Strukturen der Objekte unserer Wahrnehmung, während das Komplementaritätsprinzip dafür verantwortlich ist, daß wir die Objekte aus einem die Selbststeuerung des Handelns ermöglichenden **Blickwinkel** erfassen.

2.4 Das Stellvertreterprinzip

Das letzte der drei in den beiden ersten Bänden der vorliegenden Studienreihe aufgedeckten Leitprinzipien jeder naturwissenschaftlichen Forschung kann als **Stellvertreterprinzip** bezeichnet werden. Es ist von geringerem Allgemeingrad als das erkenntnistheoretische Äquivalenzprinzip, folgt es doch letztlich aus ihm. Weil es aber gerade bei der Konstitution der dem modernen Physiker erscheinenden Welt von äußerst großer und noch nie explizit gewürdigter Wirkungsmacht ist, soll ihm hier der Fundamentalstatus zuerkannt werden.

Das Äquivalenzprinzip selbst sorgt **unmittelbar** nur dafür, daß die Akteure den mit ihnen **direkt** in Kontrakt tretenden Objekten den Stellenwert von virtuellen Subjekten zuweisen. Dabei bleibt es aber nicht. Denn jene Gegenstände äußern ihren Subjektcharakter ja nicht nur in ihrer als Kommunikationsbeziehung verstandenen Relation zu den Handelnden, sondern scheinen sich auch gegenüber allen anderen Objekten in Analogie zu interagierenden Subjekten zu verhalten. Sie machen damit sämtliche Gegenstände ihres Umfelds zu Kommunikationspartnern - ‚infizieren‘ sie also gleichsam mit virtueller Subjektivität - und tragen auf diesem Weg die Subjektrolle stellvertretend für den Akteur selbst ein Stück weiter in die Objektwelt hinein. Weil aber die von ihnen mit Subjektivität ‚angesteckten‘ Gegenstände ebenfalls zu ‚Überträgern‘ von Subjektivität werden, erhält schließlich die gesamte Objektwelt den Charakter virtueller Subjektivität.

Daraus resultiert unter anderem eine ganz entscheidende Folgerung für den Umfang der von uns als prinzipiell erfahrbar und daher **real** angesehe-

¹⁸ Die genauere Differenzierung zwischen ‚Erkennen‘ und ‚Wahrnehmen‘ erfolgt im Rahmen der logischen Analysen der zweiten Publikation der Studienreihe. Vgl. Czasny, K. (2010 b), Teil 8

nen Welt. Um diese Folgerung zu verstehen, muß man zunächst bedenken, daß das Objekt, sofern wir es mit voller Konsequenz nach dem Muster eines Subjekts begreifen, sich nicht nur wie ein solches verhält, sondern auch im Zuge seines Verhaltens Erfahrung konstituiert - wobei man hier natürlich nur von virtueller Erfahrung sprechen kann. Ferner ist zu berücksichtigen, daß wir uns diese virtuelle Erfahrung auf mittelbarem Weg aneignen, indem wir uns zum Gegenstand so wie zu unseren menschlichen Kommunikationspartnern verhalten, mit denen wir uns identifizieren, um anschließend die Welt **mit ihren Augen** sehen zu können. Da wir auf diese Weise lernen, die Welt aus der Perspektive unserer Objekte zu erleben, können diese für uns bei der Erschließung des Mikrokosmos sowie der räumlichen und zeitlichen Tiefen des Weltalls als eine Art ‚Späher‘ fungieren, indem sie im Zuge ihres Verhaltens **stellvertretend für uns** (virtuelle) Erfahrungen von jenen Sphären der Welt erzeugen, welche unserem eigenen Tun und der durch dieses konstituierten Wahrnehmung verschlossen sind. Der Realitätsanspruch aller Aussagen der modernen Physik über den Ursprung des Universums, oder über die unserer unmittelbaren Erfahrung nicht zugängliche, ja sogar unvorstellbare Vieldimensionalität des Raumes hat hier seine Basis¹⁹, ist also nur über das Stellvertreterprinzip begründbar.

Die Macht des Stellvertreterprinzips reicht aber noch weiter! Wie sich im Verlauf des sechsten Kapitels zeigen wird, besitzt es sogar die Kraft, die bedauernswerte Schrödingersche Katze aus ihrem unseligen Schwebezustand zwischen Sein und Nichtsein zu erlösen und damit eine der verstörendsten Paradoxien der Quantentheorie aufzulösen.

¹⁹ Die Partikel, mit deren Augen wir den Raum des Mikrokosmos erfahren, verfügen zum Teil über ein gänzlich anderes Bewegungsrepertoire als wir selbst und konstituieren daher (stellvertretend für uns) völlig neue Formen des Raumes. So hat etwa der von den Spin-1/2-Teilchen erzeugte Raum eine vom Raum unserer Alltagswelt abweichende Geometrie, da die genannten Teilchen sich nicht um 360 sondern um 720 Grad drehen müssen, um wieder in ihre Ausgangsposition zu gelangen. Vgl. Davies, P., Brown, J., R. (1992), Seite 36

3. Komplementarität und duale Natur des Lichts

3.1 Der Doppelspaltversuch

Vor dem Hintergrund des in den vorangehenden Abschnitten grob skizzierten Umrisses der erkenntnistheoretischen Grundlagen der klassischen Mechanik wendet sich die Analyse nun der Quantentheorie zu. Es gilt dabei zunächst die Komplementarität, als das erste ihrer fünf zu untersuchenden zentralen Konzepte, aufzugreifen, um eine der wichtigsten Erscheinungsformen jener Komplementarität, die sogenannte ‚duale Natur‘ des Lichts als Welle und Teilchen, verstehen zu lernen.

Am Beginn der folgenden Betrachtung steht nochmals ein kurzer Rückblick auf die klassische Mechanik, deren Geschichte von einem ständigen Schwanken zwischen beiden konkurrierenden Sichtweisen des Lichts als Welle oder Teilchen geprägt ist:

Hatte der Holländer Christiaan Huygens eine Wellentheorie des Lichts aufgestellt, welche die Anfang des 17. Jahrhunderts von Boyle und Hooke durchgeführten Interferenzexperimente zu erklären vermochte, so konnte Newton mit seiner Teilchenhypothese eine einleuchtende Erklärung für die im Prisma stattfindende Zerlegung des Sonnenlichts in die Spektralfarben liefern. Die Erklärung einer Reihe wichtiger Lichterscheinungen wie etwa jener der Polarisation²⁰ durch die Wellenhypothese führte dann im 18. und 19. Jahrhundert zu einer immer stärkeren Dominanz des Wellenmodells, welches schließlich mit Maxwells Einsicht, daß es sich beim Licht um eine elektromagnetische Welle handelt, scheinbar endgültig den Sieg davontrug.

Eine neuerliche, völlig überraschende Wendung brachte am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts Plancks Entdeckung, daß die Vorgänge der Absorption und Emission von elektromagnetischer Energie durch Atome nicht kontinuierlich, also nicht in einem der wellenförmigen Energieausbreitung entsprechenden Modus erfolgen, sondern diskontinuierlich in endlichen Beträgen, sogenannten Quanten.²¹ Einstein nutzte diese Entdeckung zur Deutung des mittels der Wellenhypothese nicht erklärlichen photoelektrischen Effekts²² und unterstrich damit nachdrücklich die Teilchennatur des Lichts. Das bislang letztgültige Wort in der geschilderten Auseinandersetzung sprach schließlich Bohr mit seiner sogenannten **Komplementaritätsthese**, welche den Wettstreit der beiden konkurrierenden Hypothesen durch die Feststellung beilegt, daß das Licht **duale Natur** aufweist, weshalb erst beide einander ergänzenden Sichtweisen seine vollständige Beschreibung liefern.

²⁰ Natürliches Licht schwingt nach allen Richtungen hin, während (linear) polarisiertes Licht in einer raumfesten Ebene schwingt.

²¹ Die vorangehenden Ausführungen folgen der Darstellung durch Walther, T., Walther, H. (1999), Seite 10 ff.

²² Dieser Effekt besteht darin, daß das auf eine Metalloberfläche auftreffende Licht Elektronen aus dem Atomverband herausreißt. Nach der Wellentheorie des Lichts sollten die Elektronen nicht sofort das Metall verlassen, sondern bloß zu schwingen beginnen und erst etwas später (nach ‚Aufschaukelung‘ der Schwingung) wegfliegen. Tatsächlich beginnt jedoch die Elektronenemission sofort nach dem Aufprall des Lichtstrahls, was Einstein als Resultat der Teilcheneigenschaft des auftreffenden Lichts deutete. Vgl. Zukav, G. (1981), Seite 72

Komplementarität ist damit (wie schon in 2.3 angedeutet) in mehrfacher Hinsicht im Spiel: einerseits als die soeben erwähnte Komplementarität der beiden Sichtweisen, andererseits aber auch als Komplementarität zwischen dem erfahrungskonstitutiven Beobachtungshandeln des Experimentators und der durch dieses Handeln konstituierten Erscheinung des Beobachtungsgegenstands ‚Licht‘. Denn es hängt, wie gleich erläutert wird, von der jeweiligen experimentellen Anordnung und damit von der Entscheidung des Experimentators ab, ob das Licht als elektromagnetische Welle oder als Teilchen, genannt ‚Photon‘, in Erscheinung tritt.

Das am häufigsten zur Illustration der dualen Natur des Lichts zitierte Experiment ist der sogenannte ‚Doppelspalt-Versuch‘. Die Urform dieses Versuchs wurde erstmals im Jahr 1803 von Thomas Young durchgeführt. Young sendete einfaches Sonnenlicht durch zwei knapp neben einander gelegene, senkrechte Schlitze und deutete das an der hinter diesem Doppelspalt gelegenen Wand erscheinende streifenförmige Muster als Resultat der Interferenz von an den beiden Spalten gebeugten Lichtwellen, sodaß das betreffende Experiment als Beleg für den Wellencharakter des Lichts gelten konnte.

Die duale Natur des Lichts tritt bei diesem Versuch erst in dem Moment zutage, in dem man die Intensität des durch die beiden Spalte gesendeten Lichts soweit reduziert, daß in der gesamten Anordnung nur mehr elektromagnetische Energie im Ausmaß eines einzigen Photons vorhanden ist. Führt man das Experiment unter diesen Bedingungen genau einmal durch, dann entsteht auf einem hinter dem Doppelspalt postierten, sehr empfindlichen Detektor ein einzelner Lichtpunkt. Nach oftmaliger Wiederholung des Experiments mit jeweils minimaler Intensität des Lichts erscheinen dann viele derartige Lichtpunkte, die zusammen genommen ein bestimmtes Muster zeigen. Es gibt zwei Varianten der Gestaltung dieser Versuchsreihe, in denen das Licht jeweils eine der beiden Seiten seiner Doppelnatur offenbart:

- Bei der ersten Variante versucht der Experimentator durch entsprechende Messungen in jedem Teilexperiment der Versuchsreihe herauszufinden, durch welchen der beiden Spalte das jeweilige Photon seinen Weg nimmt, was unweigerlich zur Folge hat, daß die Summe aller am Ende der Versuchsreihe am Detektor vorhandenen Lichtpunkte kein Interferenzmuster mehr ergibt.²³
- Bei der zweiten Variante verzichtet der Experimentator auf die eben erwähnten Messungen im Bereich des Doppelspalts - und wird für diese Diskretion vom Licht gleichsam belohnt, indem die am Ende der Versuchsreihe am Detektor vorhandenen Lichtpunkte einander zu einem schönen Interferenzmuster ergänzen.

²³ Man hat alle erdenklichen Methoden einer derartigen Messung probiert - das Ergebnis war stets dasselbe: das Interferenzbild verschwand. Vgl. Walther, T., Walther, H. (1999), Seite 95

Interessiert sich somit der Experimentator für die Teilcheneigenschaft des Lichts und beschließt demzufolge den Weg der einzelnen Photonen zu erkunden, dann zeigt ihm das Licht bereitwillig seinen Teilchencharakter und gibt Antwort auf die Frage nach dem Weg. Zugleich scheint es dabei aber seine Wellennatur zu verlieren, was daran zu erkennen ist, daß es im Rahmen des vorliegenden Experiments nicht mehr interferiert. Entscheidet sich der Versuchsleiter dagegen für eine Beobachtung des Wellencharakters des Lichts, dann hat er es auch bei schwächster Intensität des auf seinem Weg durch den Doppelspalt beobachteten Lichts mit einer elektromagnetischen Welle zu tun, in Bezug auf die es gar keinen Sinn hat, danach zu fragen, durch welchen der beiden Spalte sie geht. Der Experimentator verzichtet daher auf entsprechende Messungen, und auch in diesem Fall demonstriert das Licht genau jenen Aspekt seines Verhaltensrepertoires, welcher dem vom Versuchsleiter gewählten Beobachtungsmodus entspricht: Denn es verhält sich nun als eine Welle, die am Doppelspalt in zwei miteinander interferierende Partialwellen aufgespalten wird, was zur Folge hat, daß trotz minimaler Lichtintensität bei den Einzelexperimenten am Ende der Versuchsreihe ein Interferenzmuster erscheint.

Aus dem Blickwinkel der erkenntnistheoretischen Reflexionen der beiden ersten Publikationen der vorliegenden Studienreihe sind an der eben referierten Sicht des Doppelspalt-Versuches **zwei Aspekte** von Interesse. Der erste der beiden bezieht sich auf das Komplementaritätsprinzip selbst, dessen begriffliche Analyse es im folgenden Abschnitt 3.2 zu vertiefen gilt. Der zweite betrifft das konkrete Verhältnis zwischen den beiden Erscheinungsformen des Lichts, das in den Abschnitten 3.3 und 3.4 im Detail untersucht wird.

3.2 Die verschiedenen Arten von Komplementarität

Im Hinblick auf den ersten Aspekt ist einleitend zunächst zu wiederholen, daß die das Geschehen am Doppelspalt bestimmende quantenphysikalische Komplementarität, wie bereits in Abschnitt 2.3 festgestellt, nur die **Spezifikation** eines noch allgemeineren Komplementaritätsprinzips ist: Indem der von Bohr entdeckte Grundsatz ausspricht, daß die Erscheinung jeder der beiden alternativen Verhaltensformen des Lichts von der jeweiligen Entscheidung des Experimentators für ein ganz bestimmtes Beobachtungsverhalten abhängt, weist er auf die fundamentale, also für alle Erfahrungsbereiche und Praxisfelder geltende Komplementarität zwischen der jeweiligen Art der Erscheinung des Objekts und der diese Erscheinung konstituierenden Praxis des erfahrenden Subjekts hin.

Worin die Besonderheit der quantenphysikalischen Komplementarität besteht, kann eine etwas genauere Betrachtung des Doppelspalt-Versuches verdeutlichen, welche die möglichen Methoden zur Messung des Photonenweges durch einen der beiden Spalte samt ihrem jeweiligen Ergebnis

aufzeigt. Es sind im Prinzip drei Arten solcher Messungen zu unterscheiden:

- Verwendet man Meßmethoden, welche einen **Energieaustausch** mit dem zu beobachtenden Photon implizieren, so wird dabei dessen Frequenz verändert, was gleichbedeutend ist mit einer Zerstörung seiner Fähigkeit zur Interferenz im Rahmen der vorliegenden Versuchsanordnung. Zwei Teilstrahlen mit unterschiedlicher Frequenz liefern nämlich kein stehendes, sondern bloß ein laufendes Interferenzmuster, welches unter den geschilderten Versuchsbedingungen ein völlig verwaschenes Gesamtbild am Detektor ergeben muß.
- Selbst subtilere Meßmethoden, die eine Feststellung des Photonenweges **ohne** Energieaustausch gestatten, greifen so stark auf das Licht zu, daß dieses nicht mehr interferiert. Wenn man etwa hinter beide Spalte ein Medium setzt, dessen Brechungsindex durch das elektromagnetische Feld des Photons verändert wird²⁴, um durch Messung dieser Änderung des Brechungsindex herauszufinden, wo das Photon ‚entlang läuft‘, führt dies unweigerlich zu einer Phasenfluktuation des Lichts. Letztere zerstört ebenfalls das Interferenzbild, weil entsprechend den Gesetzen der klassischen Optik Interferenz zwischen zwei Teilstrahlen nur dann entstehen kann, wenn zwischen diesen eine feste Phasenbeziehung besteht.
- Auch alle übrigen bisher erdachten Experimente, welche mit noch schlauerem indirekten Meßmethoden arbeiten, die keinerlei Störung des durch einen der beiden Spalte wandernden Lichts zur Folge haben, sind zum Scheitern verurteilt. Sie verfehlen ihr Ziel, weil bestimmte zu ihrer Durchführung erforderliche Messungen wegen der erst in Kapitel 4 zu besprechenden Unschärfebeziehung nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchzuführen sind.²⁵

Der Versuch einer Generalisierung dieser beim Doppelspalt-Experiment gegebenen Situation kommt zu folgendem Resultat: Sieht man von den an der quantenphysikalischen Unschärfebeziehung scheiternden indirekten Meßversuchen ab, dann besteht der Hauptunterschied zwischen der quantenphysikalischen Komplementarität und der bereits in 2.3 erläuterten all-

²⁴ Es handelt sich dabei um den sogenannten ‚elektrooptischen Kerr-Effekt‘. Dieser nach seinem Entdecker John Kerr (1824 bis 1907) benannte Effekt der nichtlinearen Optik besteht darin, daß das Anlegen eines elektrischen Feldes an ein Medium unter anderem dessen optische Eigenschaften verändert, weil dadurch eine nichtlineare Neuausrichtung bzw. Neuorientierung der verschiedenen Ladungsträger im Material verursacht wird. Die Stärke des Kerr-Effekts hängt von den Materialeigenschaften ab. Er ist in sogenannten ‚nichtlinearen Medien‘ (z.B. bestimmte Kristalle und Flüssigkeiten) besonders stark ausgeprägt und damit gut zu beobachten. (Vgl. Wikipedia, Stichwort „Kerr-Effekt“)

²⁵ Ein diesbezügliches Beispiel ist das von Zeilinger erwähnte Gedankenexperiment mit einer Lichtquelle, die so konstruiert ist, daß sie jeweils Paare von Photonen mit genau entgegengesetzter ‚Flugrichtung‘ aussendet. Alle für die Bestimmung des Photonenweges erforderlichen Messungen könnten in diesem Fall an dem selbst nicht am Doppelspaltexperiment beteiligten Zwillingsteilchen vorgenommen werden. Dieses Vorgehen scheitert deshalb, weil gemäß der zwischen Ort und Impuls eines jeden Objekts bestehenden Unschärfebeziehung eine ausreichend genaue Impulsbestimmung beim Zwillingsteilchen nur dann möglich ist, wenn der Ort der Entstehung der beiden Teilchen so ungenau festgelegt ist, daß die das Photonenpaar aussendende Lichtquelle nicht mehr die für die Entstehung eines Interferenzbildes erforderliche Kleinheit aufweist. Vgl. Zeilinger, A. (2003), Seite 48 ff.

täglichen Komplementarität darin, daß im ersten Fall ein direkt auf das jeweilige Objekt abzielendes Beobachtungshandeln nicht bloß die Art der Erscheinung des betreffenden Gegenstands (im vorliegenden Fall: des Lichts) für dessen Beobachter bestimmt, sondern unmittelbar auf das Objekt selbst zugreift und dieses dabei substantiell verändert.

Die erst im vierten Kapitel näher zu untersuchende Frage der Unschärfe soll vorläufig beiseite gelassen werden, um Raum zu schaffen für eine etwas genauere Betrachtung jenes das Beobachtungsobjekt substantiell verändernden Zugriffs. Diese Betrachtung soll klären, ob hier wirklich eine absolute Besonderheit der Beobachtungsvorgänge in der Welt der Quanten vorliegt. Vor der Beantwortung der genannten Frage ist jedoch ein für die nachfolgenden Ausführungen wesentlicher Begriff einzuführen. Es handelt sich dabei um das Konzept des **Beobachtungsuniversums**, dessen Bedeutung hier etwas ausführlicher zu erläutern ist, weil es auch in der erkenntnistheoretischen Reflexion auf die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie eine wichtige Rolle spielt.²⁶

Das Konzept des Beobachtungsuniversums wird am besten schrittweise erklärt, wobei die erste Explikationsetappe den genannten Begriff von der einer bestimmten Gemeinschaft von Handelnden erscheinenden Welt abzugrenzen hat: Während letztere durch die Gesamtheit aller vom betreffenden Kollektiv praktizierten Handlungsvollzüge konstituiert wird, ist das in der Folge als Beobachtungsuniversum bezeichnete Ensemble von Erfahrungen ausschließlich Komplement der wissenschaftlich organisierten Beobachtungspraxis. In diesem Kontext kann das Beobachtungsuniversum als die Summe all jener Erfahrungen definiert werden, welche auf Basis der mit einer bestimmten Beobachtungstechnologie durchführbaren Beobachtungshandlungen erzielbar sind.

Zum besseren Verständnis dieser Definition sind weitere Differenzierungen erforderlich. Zunächst ist festzuhalten, daß eine Beobachtungstechnologie neben ihrer im vorliegenden Zusammenhang nicht relevanten Organisationsstruktur im Normalfall zwei Komponenten umfaßt:

- einen bestimmten Satz von Beobachtungswerkzeugen (optische Geräte, Abtastinstrumente, Waagen, usw.)
- und ein bestimmtes Beobachtungsmedium, welches den Kontakt zwischen den Beobachtungswerkzeugen und dem Beobachtungsgegenstand herstellt.

Daraus folgt, daß jeder der ein Beobachtungsuniversum konstituierenden Beobachtungsvorgänge als eine zwei Zwischenglieder (Werkzeug und Medium) umfassende Kommunikationskette aufzufassen ist²⁷, welche gemäß

²⁶ Vgl. die diesbezüglichen Überlegungen in Kapitel 7

²⁷ In hoch entwickelten Beobachtungstechnologien, insbesondere auch in der Teilchenphysik, schiebt sich zwischen die eigentlichen Beobachtungswerkzeuge und den Beobachter noch ein drittes Zwischenglied: der Interpretationsapparat, der die vom menschlichen Verstand nicht zu bewältigende Vielzahl der von den Beobachtungswerkzeugen gelieferten Daten ersten maschinellen Auswertungen unterwirft. In weiterem Sinne kann aber auch der Interpretationsapparat als Beobachtungswerkzeug aufgefaßt werden.

dem Stellvertreterprinzip²⁸ einen indirekten Interaktionskontakt zwischen dem Subjekt (dem Beobachter) und seinem Objekt (dem Beobachtungsgegenstand) herstellt. Bei den mit den jeweiligen Beobachtungswerkzeugen interagierenden Beobachtungsmedien handelt es sich um bestimmte Beobachtungsenergien bzw. -materien. So fungiert etwa bei allen optischen Beobachtungen, oder bei Beobachtungen mit Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- oder Gammastrahlen der Elektromagnetismus als Beobachtungsenergie, während zum Beispiel im Fall der sogenannten ‚Neutrinoastronomie‘²⁹ bestimmte Elementarteilchen, also Formen von Materie als Vermittler zwischen die Beobachtungswerkzeuge und die Beobachtungsgegenstände treten.

In der Praxis besteht die ein Beobachtungsuniversum konstituierende Beobachtungstechnologie immer aus verschiedensten Beobachtungswerkzeugen, die durchaus mit jeweils unterschiedlichen Beobachtungsmedien arbeiten können. Theoretisch sind aber auch Grenzfälle von Beobachtungsuniversen vorstellbar, in denen die erfahrungskonstitutiven wissenschaftlichen Beobachtungen mit nur einem einzigen Werkzeug durchgeführt werden. Dabei ist auch jener Fall denkbar, in dem das für gewöhnlich zwischen Beobachtungsinstrument und Beobachtungsgegenstand vermittelnde Medium wegfällt - man denke nur an die Möglichkeit der Beobachtung durch das Abtasten von Gegenständen mittels eines Taststocks. Die im Normalfall zwischen dem Werkzeug und dem Beobachtungsgegenstand vermittelnde Beobachtungsenergie wird hier ersetzt durch die Energie des Subjekts selbst, also des den Taststock führenden Beobachters. Ein anderer Grenzfall eines Beobachtungsuniversums ist jenes, das durch die mit ‚freiem Auge‘ durchgeführten Beobachtungen konstituiert wird. Hier ist zwar das Beobachtungsmedium (elektromagnetische Energie in Gestalt von Licht) vorhanden, es fehlt jedoch ein dieses Medium manipulierendes Beobachtungswerkzeug.

Im Zentrum der folgenden Reflexion stehen nicht die typischerweise aus dem Zusammenspiel vieler Einzelwerkzeuge und mehrerer Medien resultierenden realen Beobachtungsuniversen. Es geht vielmehr um Universen, die jeweils durch höchstens ein einziges Beobachtungswerkzeug und/oder ein einziges Beobachtungsmedium konstituiert werden, denn an ihrem Beispiel läßt sich sehr gut verdeutlichen, daß jedes Beobachtungsuniversum eine bestimmte **Grenze** hat, die an ihrer **Außenseite** durch den Bereich des mit der gegebenen Beobachtungstechnologie prinzipiell nicht Beobachtbaren umschlossen wird, und an ihrer **Innenseite** eine an sie heranreichende **Randzone** des gerade noch Beobachtbaren aufweist, welche dadurch gekennzeichnet ist, daß in ihr eine andere Wahrnehmungsstruktur, insbesondere eine andere Art der Komplementarität herrscht als in den zentraler gelegenen Bereichen des jeweiligen Universums.

²⁸ Vgl. die auf dieses Prinzip bezogenen Ausführungen in Abschnitt 2.4

²⁹ Die elektrisch neutralen Neutrinos sind die leichtesten der elementaren Materiebausteine. Da sie extrem selten reagieren, können sie nahezu ungehindert aus kosmischen Objekten wie der Sonne entweichen. Vgl. auch die auf die Neutrinoastronomie bezogenen Ausführungen in Kapitel 7.

Was unter dem Bereich des prinzipiell nicht Beobachtbaren zu verstehen ist, kann am Beispiel eines ohne Beobachtungsmedium auskommenden Universums demonstriert werden, das nur aus jenen Erfahrungen besteht, die mittels eines durch die Hand des Beobachters geführten Taststocks konstituiert werden. Einerseits gibt es hier (wie in jedem Beobachtungsuniversum) bestimmte **qualitative** Beobachtungsgrenzen, die darin bestehen, daß gewisse Arten der Erfahrung völlig ausgeschlossen sind - im vorliegenden Beispiel etwa alle optischen Erfahrungen wie Helligkeit/Dunkelheit und Farbe. Es sind aber auch innerhalb des Sektors der grundsätzlich erfahrbaren Eigenschaften bestimmte **quantitative** Grenzen des prinzipiell Beobachtbaren vorhanden. So ist etwa das Spektrum quantitativ unterschiedlicher Erfahrungen der Eigenschaft der ‚Härte‘ im Taststockuniversum sehr schmal und äußerst grobkörnig. Kann man doch hier zwar zwischen der Härte eines Teiges und der eines Baumstamms unterscheiden, aber keinerlei Aussagen über unterschiedliche Härtegrade von verschiedenen Mineralien treffen. Derartige Differenzierungen liegen für das Subjekt des Taststockuniversums prinzipiell im Bereich des Unbeobachtbaren. Die Begründung für diese enge quantitative Begrenzung des Spektrums der im Taststockuniversum möglichen Härteerfahrungen liegt darin, daß die bei der Konstitution der Härte unterschiedlicher Mineralien im Spiel befindlichen Energien das Niveau der vom Beobachter bei der händischen Führung des Taststocks mobilisierbaren Energie bei weitem übersteigt.

Nach dem prinzipiell nicht erfahrbaren Außenbereich gilt es nun noch die von innen her an die Grenze des Beobachtungsuniversums heranreichende Randzone des gerade noch Beobachtbaren näher zu betrachten. Die Reflexion kommt dabei endlich zu der vor der Erläuterung des Begriffs des Beobachtungsuniversums gestellten Frage nach der Besonderheit der quantenphysikalischen Beobachtungsvorgänge zurück:

Wenn zunächst nur solche Beobachtungsuniversen berücksichtigt werden, die auf Meßmethoden beruhen, welche so wie die zuvor betrachtete Härtemessung mittels Taststock einen bestimmten Energieaustausch zwischen dem Beobachtungsinstrument auf der einen Seite und dem zu vermessenden Objekt auf der anderen Seite implizieren, dann liegt es auf der Hand, daß prinzipiell **jedes** der unendlich vielen möglichen Beobachtungsuniversen eine Randzone aufweist, in welcher die beim Meßvorgang ausgetauschte Energie von ähnlicher Größenordnung ist wie jene Energie, welche bei der Konstitution der vor der Messung gegebenen beobachtungsrelevanten Eigenschaften der Meßobjekte im Spiel ist. Klar ist auch, daß diese Randzone etwa bei dem durch Licht konstituierten Beobachtungsuniversum in unendlich viel kleineren maßstäblichen Bereichen angesiedelt ist als beim äußerst ‚grobkörnigen‘ Taststockuniversum.

Völlig unabhängig von dieser maßstäblichen Differenz hat jedoch in **jedem** Fall die Komplementarität zwischen dem Beobachtungshandeln und der Erscheinung der im betreffenden Universum wahrnehmbaren Objekte in der durch das erwähnte Energieverhältnis definierten Randzone ganz ähn-

lichen Charakter wie die sich auf den ersten Blick als absoluter Sonderfall präsentierende quantenphysikalische Komplementarität: Denn die Beobachtungsaktivität konstituiert hier durchwegs nicht bloß das Erscheinen einer ganz bestimmten Eigenschaft des Objekts, sondern greift unmittelbar auf den Gegenstand selbst zu, wobei dieser eine substantielle Veränderung erfährt. Es gilt nur zwei Besonderheiten zu beachten, welche die quantenphysikalische Komplementarität von dieser in den Randzonen aller Beobachtungsuniversen herrschenden Form der Komplementarität unterscheiden:

Die **erste** dieser Besonderheiten wird deutlich, wenn man sich überlegt, daß die jeweils durch den Beobachtungsvorgang bewirkte substantielle Veränderung des Gegenstands unterschiedlich tief gehen kann, was konkret folgendes bedeutet:

Weil sich der Akteur seinen Objekten mittels verschiedenster Arten des erfahrungskonstitutiven Handelns nähert, erscheint an jedem Gegenstand eine entsprechende Vielzahl von Eigenschaften. Jede durch einen Beobachtungsvorgang bewirkte Veränderung betrifft immer bloß einzelne dieser Eigenschaften, und es hängt nur vom Stellenwert des betreffenden Merkmals für **Typik** des jeweiligen Objekts ab, wie tiefgehend der mit der Beobachtung verbundene Zugriff auf den betreffenden Gegenstand ist: Wird eine Eigenschaft verändert, die konstitutiv für den jeweiligen Objekttyp ist, sodaß aufgrund der Veränderung des einzelnen Merkmals der gesamte Gegenstand seine Typik ändert, dann liegt ein besonders folgenschwerer Zugriff auf das Objekt vor.

Und genau darin besteht die erwähnte erste Besonderheit der quantenphysikalischen Komplementarität: Denn der mit der Beobachtung des Lichtweges verbundene Zugriff auf das Licht verändert mit dessen Interferenzfähigkeit ein Merkmal, das ausschlaggebend für den Wellencharakter des Lichts ist, also für dessen Zugehörigkeit zum Objekttypus ‚Welle‘. Dieses Spezifikum ist allerdings nicht als ein ausschließliches ‚Privileg‘ der quantenphysikalischen Komplementarität anzusehen, kann man sich doch auch in der Makrowelt Beobachtungsuniversen vorstellen, in deren Randzonen das Beobachtungshandeln in einer Weise auf bestimmte Gegenstände zugreift, welche bewirkt, daß letztere in der Folge ihre Typik verändern. Man denke etwa an die Beobachtung des Weges eines aus einfacher Seifenlauge bestehenden Objekts vom Typus ‚Seifenblase‘ in einem nur durch die tastenden Finger einer Hand konstituierten Beobachtungsuniversum: Jeder Versuch, die zu einem bestimmten Zeitpunkt gegebenen Ortskoordinaten eines derartigen Gegenstands zu ermitteln, würde in diesem Universum mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu einem grundlegenden Wandel der Typik des beobachteten Objekts führen.

Behutsame quantenphysikalische Zugriffe auf den Gegenstand ‚Licht‘ sind nicht so gestaltverändernd wie der Zugriff des tastenden Fingers auf das Objekt ‚Seifenblase‘, und sie sind auch weniger radikal als jene Interpretation des Doppelspalt-Experiments vermuten läßt, welche davon spricht,

daß sich das Licht hier entsprechend den jeweiligen Meßaktivitäten des Experimentators entweder als Teilchen oder als Welle verhält. Denn besagte Formulierung legt die Annahme nahe, der Wechsel in der Art der Meßaktivität würde eine so umfassende **qualitative** Änderung des in den Versuch involvierten Lichts bewirken, daß dieses sich in all seinen Aspekten von der Welle zum Teilchen bzw. umgekehrt wandle. Die vorangehenden Ausführungen sollten demgegenüber deutlich gemacht haben, daß die Messung aus der elektromagnetischen Welle kein Teilchen macht, sondern lediglich zu solchen **quantitativen** Änderungen an den beiden am Doppelspalt entstehenden Partialwellen führt, daß diese die Eigenschaft der Interferenzfähigkeit verlieren.

In diesem Sinne wäre daher bei Ausweitung des Experiments durch zwei zusätzliche Doppelspalte, die hinter dem ersten Doppelspalt gesetzt werden müßten, jede der beiden am ersten Doppelspalt entstehenden Partialwellen für sich genommen wieder zur Interferenz fähig. Die Nichtinterferenz am klassischen Doppelspalt darf also nicht vorschnell als Beweis für das Vorliegen eines Teilchens interpretiert werden, sondern hat bloß als Nachweis dafür zu gelten, daß die nach wie vor im Spiel befindliche elektromagnetische Welle durch quantitative Änderung bestimmter Parameter gewisse vor der Messung vorhandene (und für ihre Wahrnehmung als Welle ausschlaggebende) Eigenschaften verloren hat.

Eine vorsichtige Verallgemeinerung dieser auf unsere Beobachtungen des Lichts bezogenen Überlegungen für alle Beobachtungsgegenstände und Beobachtungsuniversen kommt zu folgendem Ergebnis:

- Auch in den Randzonen der Beobachtungsuniversen bewirkt die zwischen Subjekt (Beobachter) und Objekt (Beobachtungsgegenstand) stattfindende, fallweise über Beobachtungswerkzeuge und/oder Beobachtungsmedien vermittelte Meßinteraktion im Normalfall keinen umfassenden Wandel der Identität des Objekts (macht also etwa nicht aus einer elektromagnetischen Welle ein Teilchen).
- Sie führt vielmehr nur zu einer mehr oder weniger weit gehenden quantitativen Veränderung einzelner Eigenschaften des Gegenstandes (z.B. Änderung der Phasencharakteristik der elektromagnetischen Welle),
- aus der unter bestimmten Beobachtungsbedingungen Reaktionsmuster resultieren, welche die von uns wahrgenommene Typik des betreffenden Objekts verändern (z.B. Änderung des Interferenzverhaltens im klassischen Doppelspaltversuch als Grund für die Wahrnehmung einer Teilchenerscheinung des Lichts).

Nun noch kurz zur **zweiten** Besonderheit des hier betrachteten Aspekts³⁰ der quantenphysikalischen Komplementarität: Sie besteht darin, daß sich die Welt der Quanten **in ihrer Gesamtheit** innerhalb der Randzone der mittels elektromagnetischer oder anderer bekannter Formen der Energie

³⁰ Diese Einschränkung ist wichtig. Denn wie bereits erwähnt, spielt in bestimmten Fällen auch das erst im nächsten Kapitel zu erörternde Unschärfeprinzip eine Rolle für das Auftreten einer spezifisch quantenphysikalischen Spielart der allgemeinen Komplementarität.

konstituierbaren Beobachtungsuniversen befindet. Sie erscheint uns daher als eine Welt, die durchgehend durch die für jene Randzonen typische Spielart der Komplementarität gekennzeichnet ist. Diese sich auf die gesamte Welt der Quanten erstreckende Geltung der nur in den Randzonen von Beobachtungsuniversen auftretenden Besonderheit des Komplementaritätsprinzips läßt bei vielen der auf die Beobachtung ‚ihrer‘ Teilchenwelt konzentrierten Quantenphysiker die Illusion entstehen, daß das, was in Wahrheit Ausdruck einer in allgemeinsten Gesetzen des Subjekt-Objekt-Verhältnisses begründeten Eigenschaft sämtlicher Beobachtungsuniversen ist, Resultat einer singulären Qualität der von ihnen beobachteten Objekte sei, welche diese von sämtlichen Gegenständen unserer Alltagswelt unterscheidet. Daß es solche absoluten Besonderheiten der quantenphysikalischen Objekte tatsächlich geben mag, wird hier keineswegs geleugnet. Das soeben analysierte Spezifikum der quantenphysikalischen Komplementarität zählt aber nicht zu ihnen.

Nach der prinzipiellen Klärung des Stellenwerts der Besonderheiten der quantenphysikalischen Komplementarität sind nur noch zwei ergänzende Erläuterungen hinzuzufügen, die das Verständnis des erkenntnistheoretischen Stellenwerts von Komplementarität vertiefen sollen.

Die erste erinnert nochmals daran, daß wir es gemäß den Ausführungen des Abschnitts 2.3 mit insgesamt drei Spielarten der Komplementarität zu tun haben. Wenn man die in den Randzonen der Beobachtungsuniversen zum Tragen kommenden Formen der Komplementarität, zu denen unter anderem auch die quantenphysikalische Komplementarität zählt, als ‚*Randzonenkomplementarität*‘ anspricht, dann kann man die zwischen jenen drei Formen der Komplementarität bestehenden **Funktionsdifferenzen** auf folgenden plakativen Nenner bringen:

- transzendente Komplementarität **erzeugt** die Objekte der Erfahrung,
- alltägliche Komplementarität **zeigt** ihre unterschiedlichen Aspekte
- und Randzonenkomplementarität **verändert** sie substantiell.

Die zweite ergänzende Erläuterung betrifft jene in der vorangehenden Analyse der quantenphysikalischen Komplementarität ausgesparten Messungen, welche auf Wechselwirkungen zwischen Beobachtungswerkzeug und Meßobjekt beruhen, die **keinen** Energieaustausch umfassen - so wie etwa die oben erwähnte Messung des Lichtweges durch Setzung eines nichtlinearen Mediums hinter dem Doppelspalt. Wie das genannte Beispiel zeigt, tritt das zuvor als typisch für die Randzonenkomplementarität bezeichnete Phänomen der substantiellen Veränderung des Meßobjekts auch bei derartigen Messungen ohne Energieaustausch auf. Man muß daher die durch das Wirken der Randzonenkomplementarität gekennzeichneten Grenzgebiete von Beobachtungsuniversen auch für jene Formen der Beobachtungspraxis definieren, die ohne Energieaustausch mit dem Beobachtungsgegenstand auskommen. In diesem Fall könnte man die genannten Randzonen folgendermaßen abgrenzen:

Eine ohne Energieaustausch mit dem Beobachtungsgegenstand ablaufende Messung konstituiert dann einen durch Randzonenkomplementarität gekennzeichneten Erfahrungsbereich, wenn sich die in ihrem Verlauf stattfindende Wechselwirkung auf Eigenschaften des Meßobjekts erstreckt, die unmittelbar oder mittelbar von hoher, womöglich gar ausschlaggebender Bedeutung für die gesamte Typik des jeweiligen Objekts sind. Die jeweilige Phasencharakteristik eines sich ausbreitenden elektromagnetischen Feldes wäre ein solches Merkmal, verschwindet doch im Gefolge einer Veränderung dieser Phasencharakteristik die Interferenzfähigkeit des Feldes am Doppelspalt und damit dessen am Doppelspalt erscheinender Wellencharakter.