Ein Einblick in die Philosophie der Physik

Holger Lyre

Philosophisches Seminar (LFB 1), Universität Bonn, Am Hof 1, D-53113 Bonn, Germany, E-mail: lyre@uni-bonn.de

19. März 2003

Inhalt

1 Die Philosophie der Physik – eine kurze Systematik **2**
1.1 Ontologie . . . 3
1.2 Erkenntnistheorie . . . 4
1.3 Wissenschaftstheorie . . . 5

2 Die Philosophie der Raumzeit-Theorien **6**
2.1 Spezielle Relativitätstheorie . . . 7
2.2 Allgemeine Relativitätstheorie . . . 7

3 Philosophische Probleme der Quantentheorie **9**
3.1 Das Messproblem . . . 9
3.2 Ontologie und Interpretationen der Quantentheorie . . . 10

4 Epilog **11**

5 Weitere Hinweise **12**
5.1 Allgemeine Literaturangaben . . . 12
5.2 Arbeitsgruppen an Universitäten . . . 12
5.3 Weitere Informationsquellen im Internet . . . 13

Bedarf die Physik heutzutage eigentlich noch der Philosophie – und falls ja, wie wäre das Verhältnis beider zu bestimmen? So mancher „hartgesottenene“ Physiker mag mit spontaner Abwehr auf eine solche Frage zu reagieren. Unmutsbekundungen gegenüber einer einerseits schulmeisterlich, aber gleichzeitig physikalisch inkompetent daherkommenden Philosophie finden sich bei einer Vielzahl bekannter Vertreter der jüngeren Physikgeschichte (Feynman, Weinberg, Hawking). Philosophie ist im Urteile vieler schlichtweg überflüssig.

Dieser Artikel sucht derartige Frontstellungen zu vermeiden. In der Tat gibt es schlechte Beispiele auf beiden Seiten, und es wäre schlecht verstandene Philosophie, sich heute noch als unfehlbare „Königin der Wissenschaften“ aufzuspielen. Demgegenüber möchte ich die These vertreten, dass Physik und Philosophie fachlich zunächst eigenständige, nebeneinander koexistierende Disziplinen sind, mit der Besonderheit freilich, dass die Philosophie der Physik sich an den Sachergebnissen der Physik orientiert und diese reflektiert – eine Art fachliche Symmetrie bei sachlicher Asymmetrie. Carl Friedrich von Weizsäcker drückt es so aus: *„Philosophie ist ihrem Wesen nach nachträglich“.*

Die Eigenständigkeit beider Disziplinen bedeutet aber auch, dass die Philosophie der Physik nicht einfach als populäre Wiedergabe der eigentlichen Physik misszuverstehen ist, sondern eben ein autonomes Fachgebiet mit genuinen Fragestellungen repräsentiert. In diesem Sinne soll in diesem Aufsatz versucht werden, einen Einblick zu geben in die Philosophie der Physik, wie sie sich derzeit versteht und praktiziert wird – und zwar vornehmlich für interessierte Physiker (Bekanntschaft mit den gängigen physikalischen Theorien wird daher beim Leser vorausgesetzt). Nach einigen vorbereitenden Bemerkungen zu den typischen Fragestellungen der Ontologie, Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie, soweit sie die Philosophie der Physik betreffen, folgt eine Darstellung spezieller philosophischer Problemstellungen in den beiden dominanten Theorien der Physik seit einem Jahrhundert: Relativitäts- und Quantentheorie. Da eine ausführliche Darstellung zweifelsohne bücherfüllend wäre, kann ich hier nur einige wenige ausgewählte Aspekte hervorheben und exemplarisch behandeln. Darüberhinaus verweise ich auf den Literaturanhang, der sich mit Absicht größtenteils an Grund- und Einstiegswerken orientiert.

1 Die Philosophie der Physik – eine kurze Systematik

Grob gesprochen erlaubt die Philosophie eine Quereinteilung in *theoretische* und *praktische* Philosophie sowie eine Horizontalunterscheidung in einen *systematischen* und einen *historischen* Zweig (die Bezeichnungen „quer“ und „horizontal“ sind natürlich rein konventionell). Die theoretisch-systematische Philosophie umfasst vor allem die Disziplinen Erkenntnistheorie, Wissenschaftstheorie, Logik, Metaphysik sowie die Philosophie der Naturwissenschaften und der Mathematik (im Gegensatz etwa zu den Disziplinen Ethik, Staatsphilosophie, Religionsphilosophie etc. der praktischen Philosophie). Da ich die Wissenschaftsgeschichte (theoretisch-historisch) hier nicht näher betrachten möchte, können wir uns auf den theoretisch-systematischen Quadranten beschränken, denn dort ist als eine der Bereichsphilosophien auch die *Philosophie der Physik* angesiedelt.

Gewiss hat es eine Philosophie der Physik schon immer gegeben – der Ausdruck „Naturphilosophie“ war immerhin bis in das 19. Jahrhundert hinein synonym zu „Naturwissenschaft“, und es gab weder eine sehr sichtbare Trennung der naturwissenschaftlichen Einzeldisziplinen voneinander noch eine Abspaltung fachinterner und fachphilosophischer Fragen. Lässt man alle historischen Hintergründe und Motive der Abtrennung der Fachwissenschaften von der Philo-

sophie beiseite, so muss spätestens für das 20. Jahrhundert eine solche Trennung ganz deutlich konstatiert werden. Dabei hat sich im angelsächsischen Sprachraum die Bezeichnung „philosophy of science“ durchgesetzt, ein Terminus, den man im Deutschen am ehesten durch den Ausdruck *Wissenschaftsphilosophie* wiedergibt, denn hier ist eine Art Mischung aus moderner Naturphilosophie, Wissenschaftstheorie (im engeren Sinne), Erkenntnistheorie, Logik und Wissenschaftsgeschichte gemeint (eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich insofern, als „science“ im engeren Sinne nur die Naturwissenschaften bezeichnet – im Gegensatz zum deutschen Wort „Wissenschaft“). In jüngerer Zeit spaltet sich die Wissenschaftsphilosophie in zunehmendem Maße auf in die Philosophie der einzelnen naturwissenschaftlichen Fachdisziplinen. Die Bezeichnung Philosophie der Physik – insbesondere als Rückübersetzung von „philosophy of physics“ – ist in diesem Sinne dann doch eine noch relativ junge Erscheinung.

Nun lassen sich beinahe sämtliche Fragestellungen der systematisch betriebenen theoretischen Philosophie einer vierfachen Klassifikation unterordnen: 1. *Ontologie*: Welches sind die Gegenstände einer Disziplin? 2. *Methodologie*: Welche methodischen Voraussetzungen werden in einer Disziplin gemacht? 3. *Erkenntnistheorie* oder *Epistemologie*: Welche Art von Wissen oder Erkenntnis kann erlangt werden, und wie stehen die Erkenntnisse in Beziehung zum wissenden oder erkennenden Subjekt? 4. *Semantik*: Welche interpretatorischen und bedeutungstheoretischen Implikationen kommen in den Theorien, die eine Fachwissenschaft entwickelt, zum Tragen? Methodologische und theoriensemantische Fragestellungen werden verstärkt in der *Wissenschaftstheorie* behandelt, wenngleich sich dies immer auch mit Fragen der Ontologie und Erkenntnistheorie mischt. Die drei Bereiche Ontologie, Erkenntnistheorie und Wissenschaftstheorie möchte ich im Folgenden etwas genauer umreißen.

1.1 Ontologie

Ausgangspunkt einer jeden ontologischen Untersuchung ist die Frage nach dem Seienden oder Sein - kurz gefragt: was ist oder was existiert? In der Philosophie der Physik fragt man insbesondere nach dem Gegenstandsbereich, den eine physikalische Theorie definiert oder durch den sie definiert wird: welches sind die *Entitäten*, die in einer je speziellen Theorie auftreten? Die an der aristotelischen Tradition orientierte, vorherrschende Ontologie neigt dazu, sich vornehmlich auf Gegenstände oder Objekte als Entitäten zu beziehen. Dies ist aber nicht zwingend, ebensogut lassen sich Ontologien von Ereignissen oder Sachverhalten, Prozessen oder Strukturen betrachten. So ist beispielsweise die Frage durchaus nahe liegend, ob in der Quantenmechanik der Gegenstandsbegriff nicht eigentlich aufgegeben werden muss zugunsten reiner Klassen von Eigenschaften (die durch die Messobservablen im Hilbertraum beschrieben werden). Oder, noch weiter gefragt, ob in der Quantenfeldtheorie nicht eher Prozesse oder Ereignisse als grundlegend angesehen werden sollten.

Ontologische Aussagen beziehen sich nicht notwendigerweise allein auf empirisch Gegebenes, sondern betreffen unter Umständen auch mathematische Größen. In gewisser Weise gehen wir gegenüber all denjenigen Größen in einer physikalischen Theorie eine „ontologische Verpflichtung“ ein, die, lax gesagt, im Formalismus nicht verlustfrei eliminierbar sind. Dies können empirische, aber ebensogut auch mathematische Entitäten sein (einen derartigen *mathematischen Realismus* nennt man auch *Platonismus*). In den hochelaborierten Theorien der modernen Physik ist dies eine durchaus ernstzunehmende Option; denn es scheint schier unmöglich, physikalische Theorien rein „konkretistisch“, also nur mit Bezug auf Größen, denen ausschließlich empirische Entitäten entsprechen, zu formulieren.

Eine entscheidende Frage im Zusammenhang mit ontologischen Untersuchungen ist diejenige nach *Identität*. Einem weit verbreiteten Slogan Quines zufolge gilt „no entity without identity“, denn es entspricht unserer Intuition, dass nur dasjenige existiert, was mit sich selbst identisch ist. Man benötigt daher Kriterien der Identität oder Individuation. Ein klassisches und ebenfalls intuitives Identitätskriterium ist das *Leibniz-Prinzip*. Es besagt die Identität des Ununterscheidbaren, dass also zwei Dinge, die in all ihren Eigenschaften gleich sind, als identisch anzusehen sind. Dabei kann zu den Eigenschaften ebenso die raumzeitliche Lokalisation hinzutreten. In der Quantenmechanik vieler Teilchen ist das Leibniz-Prinzip aber offenkundig verletzt. Da andererseits für einen Viel-Teilchenzustand (in aller Regel) die Gesamtanzahl angegeben werden kann, steht man zunächst vor der Schwierigkeit nicht-individuierbarer Entitäten. Die Quantenmechanik stellt daher eine große Herausforderung für die klassische Ontologie dar.

Weiterführende Literatur: Künne (1980), Kuhlmann et al. (2002), Runggaldier und Kanzian (1998), Quine (1953)

1.2 Erkenntnistheorie

In der Erkenntnistheorie wird unser Wissen oder unsere Erkenntnis – etwa von der physikalischen Welt – selbst zum Gegenstand der Untersuchung. Einer groben Einteilung zufolge unterscheidet man zwischen *Empirismus*, *Rationalismus* und *Apriorismus*. Der strenge Empirist gesteht lediglich die Möglichkeit von Wissen oder Erkenntnis auf der Basis von (Sinnes-) Erfahrung zu, während ein strenger Rationalist nur durch das Denken oder im Geist gebildete Kenntnisse – von dieser Art könnte etwa mathematisches Wissen sein – anerkennt. Klarerweise werden Naturwissenschaftler in weitem Umfange empiristischen Überzeugungen zuneigen, die entscheidende Frage ist dann aber, ob physikalisches Wissen – insbesondere die Kenntnis naturgesetzlicher Zusammenhänge – hierdurch erschöpfend erklärbar wird.

Der Apriorismus, eine Position, die traditionell vor allem mit dem Namen Kants verbunden ist, behauptet neben dem (aposteriorischen) empirischen Wissen noch zusätzliche Anteile apriorischer Erkenntnis. Das entscheidende Argument dabei ist, dass die zugestandene Möglichkeit von Erfahrung gewisse Vorbedingungen zur Voraussetzung hat, die sich dann in der Erfahrung mit Notwendigkeit und Allgemeinheit als wahr erweisen. Eine solche *transzendentale*, d.h. auf die „Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung“ rekurrierende Argumentation wird in der zeitgenössischen Philosophie der Physik mit einer Reihe von Einwänden konfrontiert: Transzendentale Argumente lassen sich, so ein Einwand, scheinbar nicht anders als durch den Hinweis ihrer unmittelbaren Evidenz validieren. Da ferner die apriorischen Erkenntnisformen nicht in den Gegenständen, sondern im erkennenden (transzendentalen) Erkenntnissubjekt liegen, scheint in die Begründung der Physik ein inakzeptabler subjektiver Zug angesichts ihres objektiven Anspruchs einzugehen. Vom Standpunkt des Aprioristen ist dies allerdings ein Missverständnis des transzendentalen Arguments, das Objektivität eben auf Intersubjektivität zurückzuführen sucht. Gleichwohl ist zuzugestehen, dass der klassische kantische Begründungsversuch der Naturwissenschaft auf Aprioriannahmen zurückgegriffen hat, die zu wesentlichen Teilen aufgrund unseres heutigen Kenntnisstandes zurückzuweisen sind. So hat Kant etwa die Dreidimensionalität und Euklidizität des Raumes als a priori angesehen, eine Position, die bei erstem Hinsehen angesichts der Allgemeinen Relativitätstheorie unhaltbar scheint.

Die vor allem angelsächsisch geprägte Philosophie der Physik im 20. Jahrhundert hat sich mehrheitlich vom Apriorismus abgewandt. Er wird nur in Einzelpositionen (z.B. Weizsäcker

1971, siehe aber auch den „internen Realismus“ nach Putnam 1993) oder gelegentlich zur Begründung der Quantenmechanik aus ersten Prinzipien etwa auf der Basis der Quantenlogik vertreten, denn traditionell werden logische Gesetze als a priori angesehen (beispielsweise ist der Satz vom Widerspruch, so ließe sich argumentieren, a priori gewiss, da gar nicht sinnvoll beschrieben werden kann, wie eine Welt beschaffen sein muss, in der dieser Satz nicht gilt – und in diesem Sinne gehört er zu den Vorbedingungen wissenschaftlicher Theorien).

Nun ist der strenge Empirismus des Wiener Kreises u.a. auch auf Grund der mit ihm einhergehenden starken Realismusannahmen (teilweise nahe eines *metaphysischen Realismus*, der die Existenz der Außenwelt, ihre Unabhängigkeit vom Erkenntnissubjekt und eindeutige Wissbarkeit fordert) ebenfalls zu einer überholten Position geworden. Dennoch sieht sich die in der modernen Wissenschaftsphilosophie vorherrschende Strömung einem „geläuterten Empirismus“ verpflichtet, und insbesondere die Realismusdebatte spielt dabei eine zentrale Rolle. Inwieweit hier von Läuterung die Rede ist, und in welcher Weise der heute so zentrale „wissenschaftliche Realismus“ zu verstehen ist, soll im nächsten Abschnitt zur Sprache kommen.

Weiterführende Literatur: Gabriel (1993), Baumann (2002)

1.3 Wissenschaftstheorie

Zu den typischen Fragestellungen der Wissenschaftstheorie zählen methodologische Fragen nach den Unterschieden zwischen hypothetisch-deduktiver Methode und Induktion oder dem Verhältnis von Theorie und Empirie sowie Fragen nach wissenschaftlicher Argumentation, Bestätigung, Rechtfertigung, Rationalität, Objektivität oder Erklärung (hier gibt es zum Teil weite Überschneidungen mit Fragestellungen der Erkenntnistheorie – aus Platzmangel kann ich hierauf nicht näher eingehen). Im Zusammenhang mit den Methodenfragen ist wohl auch jedem Naturwissenschaftler Poppers *Falsifikationismus* geläufig, also zunächst die schon auf Hume zurückgehende These, dass auf induktiven Wege – also auf Grund einer endlichen Anzahl von Beobachtungen – nie in Strenge auf die Allgemeingültigkeit von Naturgesetzen geschlossen werden kann – mit der dann folgenden Konklusion, dass gesetzesartige Zusammenhänge niemals bestätigt (verifiziert) werden können und daher immer nur hypothetischen Charakter haben. Gleichwohl dient Falsifizierbarkeit als Abgrenzungskriterium von Theorien, deren Grad an Wissenschaftlichkeit sich an ihren Falsifikationsmöglichkeiten bemisst.

Fragen der Theoriensemantik, also solche, die den Bedeutungsgehalt theoretischer Terme betreffen, führen auf einige sehr bedeutsame und zentrale Überlegungen in der Wissenschaftstheorie. Hier sei exemplarisch die These der *Theorienunterbestimmtheit* hervorgehoben. Dieser These zufolge – deren Ahnvater wiederum Quine ist – lassen sich zu jeder gegebenen Menge an Beobachtungsdaten nicht nur eine, sondern immer mehrere, gegebenenfalls sogar unendlich viele Theorien finden, die, wenngleich empirisch äquivalent, so doch ontologisch different sind. Die TUD-These (theory underdetermination) stellt klarerweise eine Unterminierung realistischer Vorstellungen dar, da es uns, falls die These korrekt ist, niemals gelingen kann, die Welt eindeutig zu beschreiben (die Welt mag zwar in ihrer Existenz an sich eindeutig sein, ist aber dennoch so geartet, dass sie uns keine eindeutige Beschreibung erlaubt).

Ein sehr simples Beispiel für das Phänomen der Unterbestimmtheit wäre etwa das folgende: Sei $G(X;t) = 0$ ein mathematisch formuliertes Gesetz, das von beliebigen Parametern X und der Zeit t abhängt, dann ist $G(X;t) + g(t) = 0$ mit $g(t) = g_o(t)(t - t_1)(t - t_2)...$, wobei $g_o(t)$ eine beliebige Funktion und t_i die Messzeitpunkte darstellen, ein offenkundig empirisch äqui-

valentes Gesetz, denn zu jedem Messzeitpunkt $t = t_i$ ist $g(t_i) = 0$. In dieser Form besagt die TUD-These schlicht, dass wir nie sicher sein können, ob die Welt sich nicht „in Wirklichkeit“ völlig widrig und irregulär verhält, solange wir nicht „hingucken“. Dennoch wirkt das Beispiel banal, da wir doch scheinbar gute Gründe haben, die Gutartigkeit der Welt vorauszusetzen. Doch welches sind diese guten Gründe? Es handelt sich hier vor allem um theoretische Metakriterien wie etwa Einfachheit, Kohärenz, innere Konsistenz und Vereinheitlichungscharakter. (Für einen strengen Empiristen besteht gleichwohl die Schwierigkeit, die Allgemeingültigkeit derartiger nicht-empirischer Metakriterien nachzuweisen!).

Eine interessantere Version der TUD-These folgt aus der schon erwähnten Tatsache, dass naturwissenschaftliche Theorien mehr als nur reine Beobachtungsterme enthalten, und wir vielen Theorietermen, zum Beispiel dem Begriff „Elektron“, nicht nur epistemische Nützlichkeit, sondern Realstatus zubilligen. Diese Position wird als *wissenschaftlicher Realismus* bezeichnet – und die TUD-These kann als Argument gegen sie verwendet werden. In der hier vorgestellten Allgemeinheit sollte man erwarten, in der wissenschaftlichen Praxis auf Schritt und Tritt mit dem Phänomen der Unterbestimmtheit konfrontiert zu sein. Wir müssen im Grunde annehmen, ständig einer Vielzahl von empirisch äquivalenten Alternativen zu einer gegebenen Theorie gegenüberzustehen. Dies ist aber nicht der Fall, woraus sich dann umgekehrt die Vermutung ableiten lässt, etwas an der TUD-These sei falsch.

Der Nutzen solcher Debatten in der Wissenschaftstheorie liegt insgesamt darin, mehr über das Wesen von Theorien herauszufinden. So lässt sich die TUD-These eventuell im Rahmen des modernen „non statement view“ von Theorien – auch als *semantische Theorienauffassung* bezeichnet – abmildern. Gegenüber der älteren *syntaktischen* Auffassung („statement view“), der gemäß Theorien als axiomatische Satzsysteme angesehen werden, werden in der semantischen Auffassung Theorien durch die Klasse ihrer Modelle definiert. Ein Modell ist dabei eine Struktur, die eine Theorie wahr macht (etwa als Interpretation des Satzsystems, als Darstellung oder Simulation). In der semantischen Auffassung spielt also die Unterscheidung von Beobachtungs- und Theorietermen keine so zentrale Rolle wie in der syntaktischen, was die Problematik der Unterbestimmtheit ein wenig entschärft. In den folgenden Abschnitten werde ich das Thema noch einmal im Rahmen praktischer Beispiele berühren.

Weiterführende Literatur: Chalmers (1986), Curd und Cover (1998), Kosso (1992), Ladyman (2002), Lambert und Brittan (1970), Sklar (2000)

2 Die Philosophie der Raumzeit-Theorien

Philosophische Fragen der Raumzeit-Theorien spielen seit der Entdeckung der nicht-euklidischen Geometrien im 19. Jahrhundert eine besondere Rolle; denn mit dieser Entdeckung tritt die Frage auf den Plan, welche Geometrie der wirklichen Welt zukommt, und wie sich also zwischen mathematischer und empirischer Geometrie unterscheiden lässt (bereits das Wissen um die Möglichkeit mehrerer Geometrien unterminiert ja die von Kant zuvor behauptete Apriorizität der euklidischen Geometrie). Die Rolle apriorischer oder, wie es nun auch heißt, konventioneller Elemente zur Begründung der empirischen Geometrie führt seither auf wichtige Fragestellungen.

Weiterführende Literatur: Audretsch und Mainzer (1988), Carrier (1994), Earman (1989), Friedman (1983), Kanitscheider (1971), Mühlhölzer (1983), Sklar (1974), Torretti (1983)

2.1 Spezielle Relativitätstheorie

Zu den zentralen Ergebnissen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) gehört bekanntlich die Aufgabe des Begriffs der absoluten Gleichzeitigkeit. Wie in jüngeren Debatten der Philosophie der Physik wieder betont wird, stellt die Relativität der Gleichzeitigkeit ein ernsthaftes Problem für unsere natürlichen Realismusvorstellungen bezüglich der unabhängigen Existenz von Ereignissen und der damit verbundenen Ontologie der Zeit dar. Unsere natürliche Vorstellung, sicherlich die Vorstellung des vielzitierten Mannes auf der Straße, ist nämlich, dass ein Objekt oder Ereignis zu jedem Zeitpunkt vollständig gegenwärtig ist und die Zeit als Ganzes durchläuft. Diese Position wird als *Endurantismus* bezeichnet. Die dazu entgegengesetzte Position, der *Perdurantismus*, behauptet eine diachrone Identität von Objekten, spricht ihnen also zeitliche Ausdehnung und somit zeitliche Teile zu (analog zur räumlichen Ausdehnung von Dingen). Diesen Positionen korrespondieren *Präsentismus* und *Eternalismus* als ontologische Annahmen über die Zeit. Die Annahme des Präsentisten, dass nur die Gegenwart existent sei, steht in offenkundigem Konflikt mit der SRT, denn jeder Beobachter definiert seine eigene Gleichzeitigkeitsrelation. Da zudem jeder Beobachter die zeitliche Abfolge von Ereignissen relativ auf sein Bezugssystem festlegt, kann anscheinend das An-sich-Bestehen von Ereignissen und mithin der Realismus nur dadurch gerettet werden, dass wir der perdurantistischen Auffassung zuneigen. Der hiermit einhergehende Vierdimensionalismus – im Gegensatz zum endurantistischen Dreidimensionalismus – lässt sich durch das Bild eines Blockuniversums verdeutlichen. In den jüngeren Diskussionen der Philosophie der Physik geht es um die Frage, ob diese Konsequenz unvermeidlich ist.

Über die Relativität der Gleichzeitigkeit hinaus diskutiert man die These der *Konventionalität der Gleichzeitigkeit*. Man betrachte, um die Gleichzeitigkeit zwischen zwei Uhren A und B in einem Inertialsystem zu definieren, ein Lichtsignal, das zur Zeit t_1 von Uhr A nach B gesandt, dort unmittelbar reflektiert und zum Zeitpunkt t_2 wieder bei A empfangen wird. Die Standarddefinition der Gleichzeitigkeit besagt nun, dass das Ereignis zur Zeit $t' = t_1 + \epsilon(t_2 - t_1)$ mit $\epsilon = 1/2$ auf A simultan ist zum Moment der Signalreflektion an B. Dabei muss man jedoch, wie schon Einstein bemerkte, die nicht weiter überprüfbare Konvention eingehen, dass das Licht auf dem Hin- und Rückweg dieselbe Geschwindigkeit annimmt. Diese seit den Arbeiten von Reichenbach (1927) und Grünbaum (1963) weithin akzeptierte Konventionalitätsthese der Gleichzeitigkeit wurde später durch eine Arbeit von Malament (1977) untergraben und hat in den letzten Jahren die Diskussion um die Konventionalität der Gleichzeitigkeit wieder neu entfacht (vgl. Sarkar und Stachel 1999).

2.2 Allgemeine Relativitätstheorie

Konventionalistische Fragestellungen finden ihre Fortsetzung in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), denn unstrittigerweise gehen in die Beschreibung der empirischen Geometrie konventionelle Elemente ein. Knapp gesagt benötigt man zur Erfassung der empirischen Geometrie jeweils eine *Zuordnungsdefinition* zwischen einer rein mathematischen Abstandsrelation und einem physikalisch realisierten Längenmaßstab. Bei Transport eines solchen Maßstabs durch den Raum fordert man die Invarianz seiner Länge. Dies ist aber im Grunde nicht überprüfbar, denn man könnte ebenso gut behaupten, dass der Maßstab entlang seines Weges schrumpft oder wächst (und zwar derart, dass seine Länge bei Rückführung an den Ausgangspunkt – also bei Paralleltransport entlang einer geschlossenen Kurve – wieder in den Ausgangszustand zurückkehrt). Geschieht dies universell, so existiert offenkundig keine Möglichkeit eines empirischen

Tests, denn alle Eichmaßstäbe sind ebenso betroffen. Das hat zur Folge, dass es keinen Sinn macht, von *der* Länge des Maßstabs an sich zu sprechen, und die „wahre“ Geometrie daher unerkennbar ist.

Was es bedeutet, dass unsere Weltbeschreibung nur bis auf Koordinatenkonventionen realistisch interpretierbar ist, lässt sich besonders anschaulich am Beispiel der so genannten „Hohlwelttheorie“ diskutieren. Die Idee wurde publik durch den Amerikaner Cyrus Teed Ende des 19. Jahrhunderts, der behauptete, die Erde hätte nicht die Gestalt einer Kugel, auf deren Außenfläche wir uns befinden, sondern die Gestalt einer Hohlkugel, deren Innenfläche von uns bewohnt wird (der englische Ausdruck „hollow earth theory“ ist deshalb präziser). Mathematisch lässt sich dies durch eine einfache Koordinatentransformation wiedergeben– die Inversion am Kreis $r' = \frac{R^2}{r}$, wobei R der Erdradius ist. Diese Transformation führt dazu, dass Geraden, die Geodäten des konvexen, uns vertrauten Bildes, im konkaven Hohlweltbild übergehen in Kreise durch den Mittelpunkt (d.h. Lichtstrahlen folgen nun diesen neuen kreisförmigen Geodäten). Insofern es sich hier nur um eine Koordinatentransformation handelt, ist klar, dass die Hohlwelttheorie eine lebensfähige Alternative zur gewöhnlichen konvexen Auffassung darstellt.

Ein „Detail“ stört jedoch, denn die Inversion am Kreis ist ja am Punkt $r = 0$ singulär. Ließe sich dann nicht durch eine „Reise zum Mittelpunkt der Erde“ ein *experimentum crucis* durchführen? Die Antwort ist nein, denn der Hohlwelttheoretiker kann, wie etwa auch Roman Sexl (1983) hervorgehoben hat, ein solches Experiment durch eine geeignete Symmetrieannahme aushebeln, indem er zum Beispiel den Vorzeichenwechsel aller Feld- und Wellenfunktionen gemäß $\psi(x) = \psi(-x)$ für $|x| \to \infty$ fordert – ein Lehrbuchbeispiel für die in der Wissenschaftstheorie allgemein anerkannte *Duhem-Quine-These*, dass ein experimentum crucis niemals strenge Beweiskraft besitzt. Prinzipiell lassen sich immer geeignete Zusatzannahmen (er-)finden, um widerspenstige Einzeldaten zu erklären.

Nachdem nun aber die empirische Äquivalenz beider „Theorien“ geklärt ist, stellt sich die Frage, inwieweit der Konflikt zwischen konvexer und konkaver Sichtweise eventuell ein Beispiel für die TUD-These ist. Hierzu muss man nach der vermeintlichen ontologischen Differenz beider Auffassungen fragen. Handelt es sich nicht einfach um zwei Beschreibungsweisen ein und derselben Sache? In der Tat ist es plausibel zu fordern, dass, wenn alternative Beschreibungen eines Gegenstandsbereichs ineinander übersetzbar sind, es sich um keinerlei ontologische, sondern eben nur eine Differenz in der Darstellung handelt. Für den hier in Rede stehenden Vergleich hat die obige Zusatzannahme der Hohlwelttheorie jedoch kein Gegenstück in der gewöhnlichen, konvexen Theorie, und man findet in der wissenschaftstheoretischen Debatte unterschiedliche Auffassungen darüber, inwieweit metatheoretische Kriterien der Einfachheit, Kohärenz, Konsistenz etc. (die sicher unsere pragmatische Bevorzugung der konvexen Theorie beeinflussen) auch ontologisch zählen.

Neben dem Konventionalismus sind Fragen zum ontologischen Status von Raum und Zeit selbst seit jeher von Bedeutung in der Philosophie der Raumzeit-Theorien. Man unterscheidet zwischen den Gegenpositionen *Substantialismus* – hier wird der Raum bzw. die Raumzeit im Sinne einer Substanz, also in Analogie zu materiellen Körpern, gedeutet – und *Relationalismus* – hier wird die Raumzeit als Menge aller Körperrelationen und also nicht als eigenständige Entität aufgefasst. In der Tradition stehen sich entsprechend Newton und Leibniz als Vertreter beider Positionen gegenüber. Da für Einstein bei der Aufstellung der ART das Mach-Prinzip, also die Forderung, dass die Raumzeit allein keinerlei physikalische Wirkungen hervorrufen dürfe (die Lösungen der Feldgleichungen sollen eindeutig durch die Materieverteilung festgelegt sein),

heuristisch leitend war, kann man hier zunächst eine relationalistische Einstellung erblicken. Insofern die ART aber beispielsweise Vakuumlösungen o.ä. zulässt, ist der Substantialismus weiterhin eine gangbare Option.

In der jüngeren Debatte für oder gegen den Substantialismus bezüglich der Raumzeit hat in letzter Zeit ein Argument von Earman und Norton (1989) eine zentrale Rolle gespielt. Es wird als „hole argument" bezeichnet, denn es fußt auf Einsteins „Lochbetrachtung", also seinen frühen konzeptionellen Schwierigkeiten mit der allgemeinen Kovarianz der noch nicht entdeckten ART. Da die naheliegendste Variante des Raumzeit-Substantialismus darin besteht, die Punkte der Raumzeit-Mannigfaltigkeit als Entitäten per se aufzufassen, ändert ein Diffeomorphismus den Gesamtzustand der Welt. Eine derartige Transformation kann ja als infinitesimale Verschiebung der Punkte der Mannigfaltigkeit angesehen werden. Der Mannigfaltigkeits-Substantialist wird seine Auffassung auch ungeachtet der Tatsache vertreten, dass Diffeomorphismen die genuinen Observablen der Theorie ungeändert lassen. Earman und Norton betrachten daher ein untransformiertes und ein transformiertes Modell der ART mit einem speziellen Diffeomorphismus, der bis zum Gegenwartszeitschnitt die Identität, dann aber eine glatte Abweichung hiervon darstellt. Für den Substantialisten spaltet die Welt dabei indeterminiert auf (da dies nicht durch die diffeomorhismen-invariante Dynamik der Theorie vorhersagbar ist). Das „hole argument" besteht nun darin zu zeigen, dass die ontologischen Kosten der substantialistischen Auffassung in der höchst unplausiblen Inkaufnahme eines radikalen Ad hoc-Indeterminismus in einer ansonsten einwandfrei deterministischen Theorie bestehen.

3 Philosophische Probleme der Quantentheorie

Zweifellos stellt die Quantentheorie mit ihren zahllosen Problemstellungen bezüglich der Messung, der Frage der Individualität der Objekte, der Nicht-Separabilität und Nicht-Lokalität und der Möglichkeit, den Formalismus in ontologisch sehr verschiedener Weise zu deuten, nach wie vor die größte Herausforderung an die Philosophie der Physik dar. Im Folgenden sollen speziell das Messproblem und einige prominente Interpretationsansätze kurz angesprochen werden.

Weiterführende Literatur: Albert (1994), Audretsch und Mainzer (1990), Baumann und Sexl (1984), Bell (1987), Bub (1997), Dickson (1998), Falkenburg (1994), Healey (1989), Hughes (1989), Maudlin (1994), Mittelstaedt (1998), Redhead (1987), Stöckler (1984)

3.1 Das Messproblem

Zu den virulentesten Problemen der Quantentheorie zählt immer noch das Problem der quantenmechanischen Messung. Vereinfacht besteht ein Messprozess aus drei Schritten: Erstens sind Messobjekt und Messgerät miteinander zu koppeln. Dabei tritt eine Wechselwirkung auf. Nach der Messwechselwirkung erfolgt zweitens eine Trennung von Messgerät und Messobjekt. Der dritte und letzte Schritt besteht darin, dass das Messgerät sich nun in einem Zustand befindet, in dem es den gemessenen Objektzustand irreversibel registriert (und entsprechend anzeigt). Genau dieser letzte Schritt ist es, der sich im Rahmen der Quantenmechanik nicht erfassen lässt, denn formal kann der reine Zustand des Gesamtsystems, das nach der Messwechselwirkung aus Messobjekt und Apparat besteht, durch keinerlei unitäre Transformation in einen gemischten Zustand übergehen. Betrachtet man daher nach der Trennung von Objekt und Apparat die

reduzierte Dichtematrix des Messapparats, so erhält man lediglich ein uneigentliches, jedoch kein eigentliches Gemisch (zur wichtigen Unterscheidung von *improper* und *proper mixtures* vgl. D'Espagnat 1965). Aber nur eigentliche Gemische erlauben dasjenige, was man die *Ignoranzinterpretation* nennt: dass nämlich der Zustand des Systems definit vorliegt und sich lediglich der unvollständigen Beobachterkenntnis entzieht. In der Quantenmechanik führt jedoch die Anwendung der Ignoranzinterpretation auf uneigentliche Gemische zu formalen Widersprüchen. Das Messproblem besteht also darin, dass die Quantenmechanik das Zustandekommen irreversibler Messergebnisse nicht erklären kann – obwohl diese offenkundig allerorten vorkommen!

Die Lösungsansätze zum Messproblem fächern sich vornehmlich anhand der verschiedenen Interpretationsvarianten der Theorie auf. Dies wird im folgenden Abschnitt angesprochen. In vielen Fällen spielt heute das Konzept der *Dekohärenz* eine zentrale Rolle. Die Idee ist, dass durch Kopplung des Systems an die Umgebung mit ihrer praktisch unendlichen Anzahl an Freiheitsgraden die Interferenzterme und mithin die typisch quantenmechanischen Korrelationen zwischen Messgerät und Messobjekt praktisch zum Verschwinden gebracht werden können – und dies zumeist auf exponentieller Zeitskala. „For all practical puposes" (FAPP) – nach einem bekannten Slogan von John Bell (1990) – liegt dann eines der möglichen Messergebnisse vor. Insofern nun einerseits klar ist, dass Dekohärenz ein wichtiges, vermutlich notwendiges Element zur Lösung des Messproblems darstellt, so ist andererseits keineswegs klar, ob damit auch das begriffliche Problem gelöst wurde; denn auch wenn die Korrelationen FAPP verschwinden, so erlaubt dies noch lange nicht die Anwendung der Ignoranzinterpretation. Die Debatte um das Messproblem ist also weiterhin offen.

3.2 Ontologie und Interpretationen der Quantentheorie

Zu den zentralen Kennzeichen der Quantentheorie zählen die Nicht-Separabilität, also die Verschränktheit von Quantensystemen, und die Nicht-Lokalität. Beide Eigenschaften der Theorie sind in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder eindrucksvoll durch experimentelle Tests bestätigt worden. Zu nennen sind hier die Messungen von EPR-Bell-Korrelationen und ihre theoretischen Verschärfungen durch die Argumente von Kochen und Specker sowie Greenberger, Horn und Zeilinger (GHZ). Auch die noch junge Quanteninformationstheorie zeitigt Resultate von ontologischer Bedeutung wie etwas das „No cloning"-Theorem, das die Einzigartigkeit und Nicht-Kopierbarkeit von Quantenzuständen belegt. Es gilt daher, eine Ontologie zu entwickeln, die diesen Eigentümlichkeiten der Quantentheorie Rechnung trägt.

Die Zahl der Deutungsversuche der Quantentheorie ist Legion: Bohmsche Mechanik, Theorien verborgener Parameter, Everettsche oder Viele-Welten-Interpretation, Kollapstheorien, Modal-Interpretation, konsistente Historien – um nur die vielleicht bekanntesten zu nennen. Die Kopenhagener Interpretation als die historisch erste wird dabei heute vielfach als inakzeptabel angesehen. Als ein Sammelsurium vor allem der Vorstellungen Bohrs und Heisenbergs wurde diese Deutung niemals kodifiziert oder festgeschrieben. Viele moderne Kommentatoren lesen (vornehmlich aus den Äußerungen Bohrs) die Kopenhagener Deutung als die Behauptung einer Trennung zwischen dem Bereich der Messapparate, der klassisch ist, und dem Bereich der Quantensysteme – also als die unplausible Behauptung einer gemischten Ontologie. Zum zweiten macht die Kopenhagener Deutung die Einflussnahme des Beobachters auf das zu messende System geltend (wenngleich dies nicht automatisch gleichbedeutend mit einer Bewusstseinsinterpretation im Sinne von London, Bauer und Wigner sein muss, die das Bewusstsein von der physikalischen Beschreibung ausnimmt und somit einen Leib-Seele-Dualismus konstatiert).

Beide Annahmen werden von den Vertretern der realistischen Seite zurückgewiesen.

Die Mehrzahl der Interpreten der Quantentheorie versucht ohne das Konzept des Beobachters auszukommen, und beansprucht schon in dieser Hinsicht das vieldeutige Etikett „realistisch“. Dabei werden auch ontologische aufwendige Lösungen wie etwa die Everettsche Viele-Welten-Interpretation in Kauf genommen. Manche Vorschläge zur „Interpretation“ der Quantentheorie sind faktisch Abänderungsvorschläge, wie etwa die Theorie des spontanen Kollaps' nach Ghirardi, Rimini und Weber (GRW). Diesem Ansatz zufolge ist die Quantenmechanik um einen zusätzlichen spontanen Lokalisierungsprozess zu erweitern, der auf einer geeignet angepassten Zeitskala das Verschmieren der Wellenfunktion verhindern und so makroskopische klassische Teilchenbewegungen herbeiführen soll.

Eine empirische äquivalente Interpretation der Quantenmechanik gegenüber der Kopenhagener Deutung ist etwa die Bohmsche Mechanik (wenigstens in ihrer ursprungsfassung). Sie beansprucht, sowohl realistisch als auch deterministisch zu sein. Hierbei ist genau zu prüfen, inwieweit es der Bohmschen Theorie tatsächlich gelingen kann, das Versagen der Ignoranzinterpretation zu unterwandern. Im positiven Falle läge in der Tat ein Beispiel für die TUD-These vor, allerdings mit der für die Praxis relevanten Einschränkung, dass der Bohmsche Formalismus (bislang) auf keine lorentzinvariante Quantenfeldtheorie führt. Dies könnte sich in Zukunft als manifester Nachteil der Bohmschen Variante erweisen, und sie aufgrund des Metakriteriums der Vereinheitlichung aussondern.

4 Epilog

Leider kann in einem kurzem Einführungsartikel wie diesem nur ein Bruchteil der Fragen der heutigen Philosophie der Physik angesprochen und dann auch nur in Ansätzen dargestellt werden. Viele wichtige und interessante Probleme mussten ungenannt bleiben. So lassen sich natürlich schon für die klassische Mechanik wesentliche Fragen diskutieren (vgl. Kamlah (2002)) – etwa nach dem Trägheitsbegriff oder Newtons absolutem Raum. Eigene Begründungsprogramme sind in Deutschland vor allem die Protophysik (vgl. Böhme (1976), Janich (1980), Tetens (1987), Janich (1989)) und strukturalistische Auffassungen der Physik (Balzer et al. (1987), Ludwig (1978), Scheibe (1997), Stegmüller (1979)). Besonders zu erwähnen sind auch Fragestellungen in Verbindung mit Thermodynamik und Statistik – etwa Fragen nach dem Wahrscheinlichkeitsbegriff oder dem zweiten Hauptsatz und der damit verbundenen Zeitstruktur (vgl. Ben-Menahem und Pitowsky (2001), Sklar (1993) und speziell Leff und Rex (1990) zum Maxwellschen Dämon). Benachbart hierzu sind auch Untersuchungen über nichtlineare Dynamik, komplexe Systeme und Chaos (vgl. Mainzer (1994), Mainzer und Schirmacher (1994), Weingartner und Schurz (1996)). Fast offenkundig verweist auch die Kosmologie auf zahlreiche philosophische Probleme (vgl. Audretsch und Mainzer (1989), Kanitscheider (1984), Earman (1995)). In jüngerer Zeit wächst in der Wissenschaftstheorie endlich auch das Interesse an modernen Feldtheorien (vgl. Auyang (1995), Butterfield und Pagonis (1999), Cao (1997)), speziell Quantenfeldtheorien (vgl. Brown und Harré (1988), Cao (1999), Cushing (1990), Kuhlmann et al. (2002), Teller (1995)) und weiterführenden Entwicklungen etwa in Richtung auf Quantengravitation ((Callender und Huggett 2001)).

Es mag nun sein, dass viele der von mir hier vorgestellten Fragestellungen dem einen oder anderen Leser aus der physikalischen Praxis eher entlegen vorkommen, und gewiss sind theoretisch-philosophische Überlegungen aufgrund ihrer Anwendungsferne nicht jedermanns Sache. Das

Hauptanliegen physik-philosophischer Betrachtungen liegt zunächst darin, die Konsequenzen physikalischer Theorien sehr radikal zu durchdenken und auszubuchstabieren. Das Fragemotiv lautet dabei immer: „Wie wäre die Welt beschaffen, falls unsere besten Theorien im wörtlichen Sinne wahr sind?“ Eine solche Betrachtungsweise kann dann durchaus auch für den „working physicist“ lohnenswert sein, insofern es lehrreich ist, genaue Rechenschaft über den konzeptionellen Aufbau und die Struktur physikalischer Theorien abzulegen.

Die Philosophie der Physik kann und will keine Belehrung der praktisch betriebenen Physik darstellen. Ich sehe sie eher als Beitrag zu der sokratischen Frage: „Verstehen wir, was wir tun, wenn wir Physik betreiben?“ In diesem Sinne wäre es ein wünschenswertes Ziel dieses Artikels, Interesse für physik-philosophische Fragen befördert oder geweckt zu haben. Und soweit dies Ziel ein wenig erreicht wurde, mögen die nachfolgenden Hinweise und Literaturangaben zur weiteren Umsetzung dieses Interesses nützdienlich sein.

5 Weitere Hinweise

5.1 Allgemeine Literaturangaben

Monographien zur Philosophie der Physik: Cushing (1998), Kosso (1997), Lange (2002), Mittelstaedt (1963), Redhead (1995), Sklar (1992), Torretti (1999), Weizsäcker (1985)

Einführungen in die Naturphilosophie: Bartels (1996), Böhme (1989), Drieschner (2002), Esfeld (2002), Janich (1997), Kanitscheider (1996), Lyre (2002), Salmon et al. (1992)

Lexika und Nachschlagewerke: Audi (1995), Hügli und Lübcke (1991), Mittelstrass (1980)

Zeitschriften:

- *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*
- *Philosophy of Science*
- *The British Journal for the Philosophy of Science*
- *International Studies in the Philosophy of Science*
- *Philosophia Naturalis*
- *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*
- *Foundations of Physics*
- *Synthese*
- *Erkenntnis*

5.2 Arbeitsgruppen an Universitäten

Hier eine Liste derzeitiger Arbeitsgruppen und ihrer Mitglieder, die im deutschsprachigen Raum aktiv im Bereich der Philosophie der Physik arbeiten (geordnet von Nord nach Süd; die Leiter der Arbeitsgruppen sind jeweils unterstrichen):

- Universität Bremen: M. Kuhlmann, M. Stöckler
  http://www.philosophie.uni-bremen.de
- Universität Bielefeld: M. Carrier, A. Hüttemann, M. Stöltzner
  http://www.uni-bielefeld.de/philosophie
- Universität Bochum: M. Drieschner
  http://www.ruhr-uni-bochum.de/philosophy
- Universität Dortmund: B. Falkenburg, R. Huber
  http://philosophie.fb14.uni-dortmund.de
- Universität Bonn: D. Bailer-Jones, A. Bartels, H. Lyre
  http://www.philosophie.uni-bonn.de
- Universität Giessen: B. Kanitscheider, B. Suchan
  http://www.uni-giessen.de/ gm1001/homepage.htm
- Universität Marburg: P. Janich
  http://www.uni-marburg.de/philosophie/
- Universität Augsburg: T. Leiber, K. Mainzer
  http://www.philso.uni-augsburg.de/lehrstuehle/philosophie2.php
- Universität München: C. U. Moulines
  http://www.philosophie.lmu.de
- Universität Freiburg: C. Held
  http://www.philosophie.uni-freiburg.de/

- Emeriti:
  U. Hoyer (Münster), A. Kamlah (Osnabrück), P. Mittelstaedt (Köln), E. Scheibe (Hamburg), C. F. v. Weizsäcker (Starnberg)

Zu den wichtigsten internationalen Arbeitsgruppen zählen:

- Pittsburgh: Department of History and Philosophy of Science
  http://www.pitt.edu/∼hpsdept/
- Oxford: Philosophy of Physics Group
  http://users.ox.ac.uk/∼ppox/
- Utrecht: Institute for History and Foundations of Science (Foundations of Physics Section)
  http://www.phys.uu.nl/∼wwwgrnsl/homec.html - foundations

5.3 Weitere Informationsquellen im Internet

- PhilSci Archive
  http://philsci-archive.pitt.edu
- Stanford Encyclopedia of Philosophy
  http://plato.stanford.edu

Literatur

Albert, D. (1994). *Quantum mechanics and experience*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Audi, R. (1995). *The Cambridge Dictionary of Philosophy*. Cambridge University Press, Cambridge.

Audretsch, J. und K. Mainzer, Hrsg. (1988). *Philosophie und Physik der Raum-Zeit*. B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Audretsch, J. und K. Mainzer, Hrsg. (1989). *Vom Anfang der Welt: Wissenschaft, Philosophie, Religion, Mythos*. Beck, München.

Audretsch, J. und K. Mainzer, Hrsg. (1990). *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?* B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Auyang, S. Y. (1995). *How is Quantum Field Theory Possible?* Oxford University Press, New York.

Balzer, W., C. U. Moulines und J. D. Sneed, Hrsg. (1987). *An Architectonic for Science*. Kluwer, Dordrecht.

Bartels, A. (1986). *Kausalitätsverletzungen in allgemeinrelativistischen Raumzeiten*. Duncker & Humblot, Berlin.

Bartels, A. (1994). *Bedeutung und Begriffsgeschichte*. Schöningh, Paderborn.

Bartels, A. (1996). *Grundprobleme der modernen Naturphilosophie*. Schöningh, Paderborn. (UTB 1951).

Baumann, K. und R. U. Sexl (1984). *Die Deutungen der Quantentheorie*. Vieweg, Braunschweig. (3., überarbeitete Auflage 1987).

Baumann, P. (2002). *Erkenntnistheorie*. Metzler, Stuttgart.

Bell, J. S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Bell, J. S. (1990). *Against 'Measurement'*. Physics World, 8:33–40. Deutsche Übersetzung in Phys. Bl. 48 (1992) Nr. 4.

Ben-Menahem, Y. und I. Pitowsky, Hrsg. (2001). *Special Issue: The Conceptual Foundations of Statistical Physics*. Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 32(4).

Böhme, G., Hrsg. (1976). *Protophysik*. Suhrkamp, Frankfurt a. M.

Böhme, G., Hrsg. (1989). *Klassiker der Naturphilosophie*. Beck, München.

Brown, H. R. und R. Harré, Hrsg. (1988). *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*. Clarendon Press, Oxford.

Bub, J. (1997). *Interpreting the Quantum Theory*. Cambridge University Press, Cambridge.

Butterfield, J. und C. Pagonis, Hrsg. (1999). *From Physics to Philosophy.* Cambridge University Press, Cambridge.

Callender, C. und N. Huggett, Hrsg. (2001). *Physics meets Philosophy at the Planck Scale.* Cambridge University Press, Cambridge.

Cao, T. Y. (1997). *Conceptual Developments of 20th Century Field Theories.* Cambridge University Press, Cambridge.

Cao, T. Y., Hrsg. (1999). *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory.* Cambridge University Press, Cambridge.

Carrier, M. (1994). *The Completeness of Scientific Theories.* Kluwer, Dordrecht.

Chalmers, A. F. (1986). *Wege der Wissenschaft : Einführung in die Wissenschaftstheorie.* Springer, Berlin.

Curd, M. und J. A. Cover, Hrsg. (1998). *Philosophy of Science.* Norton & Company, New York.

Cushing, J. T. (1990). *Theory Construction and Selection in Modern Physics: the S Matrix.* Cambridge University Press, Cambridge.

Cushing, J. T. (1998). *Philosophical Concepts in Physics.* Cambridge University Press, Cambridge.

D'Espagnat, B. (1965). *Conceptions de la physique contemporaine.* Hermann, Paris. (Deutsche Ausgabe: *Grundprobleme der gegenwärtigen Physik*, Vieweg, Braunschweig, 1971).

Dickson, M. (1998). *Quantum Chance and Nonlocality.* Cambridge University Press, Cambridge.

Drieschner, M. (1979). *Voraussage - Wahrscheinlichkeit - Objekt. Über die begrifflichen Grundlagen der Quantenmechanik.* Lecture Notes in Physics 99. Springer, Berlin.

Drieschner, M. (2002). *Moderne Naturphilosophie. Eine Einführung.* mentis, Paderborn.

Earman, J. (1989). *World Enough and Space-Time.* MIT Press, Cambridge, Mass.

Earman, J. (1995). *Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks.* Oxford University Press, New York.

Earman, J. und J. Norton (1987). *What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Story.* The British Journal for the Philosophy of Science, 83:515–525.

Esfeld, M. (2002). *Einführung in die Naturphilosophie.* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Falkenburg, B. (1994). *Teilchenmetaphysik.* B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Friedman, M. (1983). *Foundations of Space-Time Theories.* Princeton University Press, Princeton.

Gabriel, G. (1993). *Grundprobleme der Erkenntnistheorie.* Schöningh, Paderborn. (UTB 1743).

Grünbaum, A. (1963). *Philosophical Problems of Space and Time.* Knopf, New York. (Second, enlarged edition 1973, Reidel, Dordrecht).

Healey, R. (1989). *The Philosophy of Quantum Mechanics.* Cambridge University Press, Cambridge.

Held, C. (1999). *Die Bohr-Einstein-Debatte.* mentis, Paderborn.

Huber, R. (2000). *Einstein und Poincaré.* mentis, Paderborn.

Huber, R. (2002). *Natur-Erkenntnis, Band I: Naturphilosophie von der Antike bis zu Descartes.* mentis, Paderborn.

Hughes, R. I. G. (1989). *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics.* Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Hügli, A. und P. Lübcke, Hrsg. (1991). *Philosophielexikon.* Rowohlt, Reinbek.

Hüttemann, A. (1997). *Idealisierungen und das Ziel der Physik.* de Gruyter, Berlin.

Janich, P. (1980). *Die Protophysik der Zeit.* Suhrkamp, Frankfurt a. M.

Janich, P. (1989). *Euklids Erbe: Ist der Raum dreidimensional?* Beck, München.

Janich, P. (1992). *Grenzen der Naturwissenschaft.* Beck, München.

Janich, P. (1997). *Kleine Philosophie der Naturwissenschaften.* Beck, München.

Kamlah, A. (2002). *Der Griff der Sprache nach der Natur.* mentis, Paderborn.

Kanitscheider, B. (1971). *Geometrie und Wirklichkeit.* Duncker & Humblot, Berlin.

Kanitscheider, B. (1981). *Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaft.* de Gruyter, Berlin.

Kanitscheider, B. (1984). *Kosmologie.* Reclam, Stuttgart.

Kanitscheider, B. (1996). *Im Innern der Natur: Philosophie und moderne Physik.* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Kosso, P. (1992). *Reading the Book of Nature: An Introduction to the Philosophy of Science.* Cambridge University Press, Cambridge.

Kosso, P. (1997). *Appearance and Reality: An Introduction to the Philosophy of Physics.* Oxford University Press, Oxford.

Krüger, L. und B. Falkenburg, Hrsg. (1995). *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaften.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Kuhlmann, M., H. Lyre und A. Wayne, Hrsg. (2002). *Ontological Aspects of Quantum Field Theory.* World Scientific, Singapore.

Künne, W. (1980). *Abstrakte Gegenstände: Semantik und Ontologie.* Suhrkamp, Frankfurt a.M.

Ladyman, J. (2002). *Understanding Philosophy of Science.* Routledge, London.

Lambert, K. und G. G. Brittan (1970). *An Introduction to the Philosophy of Science*. Prentice Hall, Englewood Cliffs. (Deutsche Ausgabe: *Eine Einführung in die Wissenschaftsphilosophie*, de Gruyter, Berlin, 1991).

Lange, M. (2002). *An Introduction to the Philosophy of Physics*. Blackwell, Oxford.

Leff, H. S. und A. F. Rex, Hrsg. (1990). *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing*. Princeton University Press, Princeton.

Leiber, T. (1996). *Kosmos, Kausalität und Chaos. Naturphilosophische, erkenntnistheoretische und wissenschaftstheoretische Perspektiven*. Ergon, Würzburg.

Ludwig, G. (1978). *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie*. Springer, Berlin.

Lyre, H. (1998). *Quantentheorie der Information*. Springer, Wien, New York.

Lyre, H. (2002). *Informationstheorie. Eine philosophisch-naturwissenschaftliche Einführung*. Fink, München. (UTB 2289).

Mainzer, K. (1988). *Symmetrien der Natur*. de Gruyter, Berlin.

Mainzer, K. (1994). *Thinking in Complexity*. Springer, Berlin. (4. erw. Aufl. 2003).

Mainzer, K. und W. Schirmacher, Hrsg. (1994). *Quanten, Chaos und Dämonen*. B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Malament, D. (1977). *Causal Theories of Time and the Conventionality of Simultaneity*. Noûs, 11:293–300.

Maudlin, T. (1994). *Quantum non-locality and relativity*. Blackwell, Oxford.

Mittelstaedt, P. (1963). *Philosophische Probleme der modernen Physik*. B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim. 7. Auflage 1989.

Mittelstaedt, P. (1998). *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*. Cambridge University Press, Cambridge.

Mittelstrass, J., Hrsg. (1980). *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Metzler, Stuttgart. 4 Bände, 1980-1986.

Mühlhölzer, F. (1983). *Der Zeitbegriff in der Speziellen Relativitätstheorie*. Peter Lang, Frankfurt a.M.

Putnam, H. (1993). *Von einem realistischen Standpunkt*. Rowohlt, Reinbek.

Quine, W. V. (1953). *From a Logical Point of View*. Harvard University Press, Cambridge, Mass. (Second revised edition 1961; deutsche Ausgabe: *Von einem logischen Standpunkt*, Kohlhammer, Stuttgart, 1973).

Rédei, M. und M. Stöltzner, Hrsg. (2001). *John von Neumann and the Foundations of Quantum Physics*. Kluwer, Dordrecht.

Redhead, M. (1987). *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*. Clarendon Press, Oxford.

Redhead, M. (1995). *From Physics to Metaphysics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Reichenbach, H. (1927). *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre.* de Gruyter, Berlin.

Runggaldier, E. und C. Kanzian (1998). *Grundprobleme der analytischen Ontologie.* Schöningh, Paderborn. (UTB 2059).

Salmon, M. H., J. Earman, C. Glymour, J. G. Lennox, P. Machamer, J. E. McGuire, J. D. Norton, W. C. Salmon und K. F. Schaffner, Hrsg. (1992). *Introduction to the Philosophy of Science.* Prentice-Hall, Englewood-Cliffs.

Sarkar, S. und J. Stachel (1999). *Did Malament Prove the Non-Conventionality of Simultaneity in the Special Theory of Relativity?* Philosophy of Science, 66:208–220.

Scheibe, E. (1997). *Die Reduktion physikalischer Theorien.* Springer, Heidelberg. 2 Bände, 1997-1999.

Scheibe, E. (2001). *Between Rationalism and Empiricism: Selected Papers in the Philosophy of Physics.* Springer, Heidelberg. (Ed. by B. Falkenburg).

Sexl, R. U. (1983). *Die Hohlwelttheorie.* Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 36(8):453–460.

Sklar, L. (1974). *Space, Time, and Spacetime.* University of California Press, Berkeley.

Sklar, L. (1992). *Philosophy of Physics.* Westview, Boulder.

Sklar, L. (1993). *Physics and Chance.* Cambridge University Press, Cambridge.

Sklar, L., Hrsg. (2000). *The Philosophy of Science: A Collection of Essays.* Garland, New York. (6 volumes).

Stegmüller, W. (1979). *The Structuralist View of Theories. A possible Analogue of the Bourbaki Programme in Physical Science.* Springer, Berlin.

Stöckler, M. (1984). *Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik.* Duncker & Humblot, Berlin.

Stöckler, M. (1987). *Philosophische Probleme der Elementarteilchenphysik.* Habilitationsschrift, Fachbereich Physik der Justus-Liebig-Universität Gießen.

Suchan, B. (1999). *Die Stabilität der Welt. Eine Wissenschaftsphilosophie der Kosmologischen Konstante.* mentis, Paderborn.

Teller, P. (1995). *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory.* Princeton University Press, Princeton.

Tetens, H. (1987). *Experimentelle Erfahrung.* Meiner, Hamburg.

Torretti, R. (1983). *Relativity and Geometry.* Pergamon Press, Oxford. (New edition, Dover, New York 1996).

Torretti, R. (1999). *The Philosophy of Physics.* Cambridge University Press, Cambridge.

Weingartner, P. und G. Schurz, Hrsg. (1996). *Law and Prediction in the Light of Chaos Research.* Springer, Berlin.

Weizsäcker, C. F. von (1971). *Die Einheit der Natur*. Hanser, München.

Weizsäcker, C. F. von (1985). *Aufbau der Physik*. Hanser, München.

Weizsäcker, C. F. von (1992). *Zeit und Wissen*. Hanser, München.