

Insok Ko

Korrespondenz und Komplementarität

*ihre Rolle für Theoriendynamik und
wissenschaftlichen Fortschritt*

Dissertation der Universität Konstanz
Datum der mündlichen Prüfung: 25.9.1997

Referent: Prof. Dr. Paul Hoyningen-Huene
Referent: Prof. Dr. Gereon Wolters

Konstanz 1997

Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Paul Hoyningen-Huene, meinem Doktorvater, der durch seine Lehrveranstaltungen (vor allem das traditionsreiche Mittwochskolloquium), eigene Publikationen, Kritik an meiner Arbeit, Ratschläge und viele anregende Gespräche diese Arbeit betreute. Es war mein großes Glück, daß ich bei ihm sechs Jahre lang *lernen* konnte. Ich danke Herrn Prof. Dr. Gereon Wolters, der sich gerne die Mühe der Begutachtung meiner Dissertation nahm. Von seinem ausführlichen Gutachten profitierte ich viel. Ich danke ihm auch dafür, daß er durch seine Seminare mein Interesse an der Philosophie der Biologie erweckt und systematisch ausgebildet hat.

Reinhart Brüning, Martin Eisvogel, Ludwig Fahrbach, Dunja Jaber, Corinna Kammerer, und Pastor Klaus Ulrich Ruof haben jeweils ein Teil dieser Arbeit Korrektur gelesen, und Dr. Christian Funke hat die gesamte Arbeit nochmals sprachlich verbessert. Für diese Hilfe danke ich ihnen herzlich. Natürlich bin ich allein für den Inhalt und für die verbliebenen sprachlichen Unzulänglichkeiten verantwortlich.

Die philosophisch vielfältige, offene und kommunikative, und auch sehr internationale Atmosphäre an der Fachgruppe Philosophie der Universität Konstanz bot mir ausgezeichnete Arbeitsbedingungen, die ich sehr vermissen werde. Ich möchte u.a. Eva-Maria Engelen, Hans Rott, Christiane Schildknecht, Dieter Teichert, und Frau Klauschke dafür danken, daß mir ihre freundliche und freundschaftliche Hilfsbereitschaft wichtige Rahmenbedingung für produktiven Aufenthalt auf G6 war, den ich jeden Tag genoß. Ich möchte Hanne Andersen und Eric Oberheim danken, die mit mir das Arbeitszimmer teilten und mir sowohl durch Debatten über philosophische Themen als auch durch Gespräche im Alltag zu frischen Ideen verhalfen.

Ich danke dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für seine langjährige finanzielle Unterstützung, ohne die meine Promotion in Konstanz wahrscheinlich nicht möglich gewesen wäre. Meine Eltern haben diesen Weg auch teilweise finanziell und vor allem mit ständiger Fürbitte für ihren großgewordenen Sohn unterstützt. Dafür danke ich ihnen herzlich. Ich widme diese Arbeit den drei Personen, die mir in den letzten sechs Jahren unheimlich viel Liebe und volles Vertrauen schenkten und mich dadurch stetig zum Erreichen des Zieles ermutigten: Eui-Jun, Eui-Soh und meiner Frau.

Konstanz, Oktober 1997

Insok Ko

Inhalt

Danksagung	2
INHALT	3
EINLEITUNG	5
1. DAS KORRESPONDENZPRINZIP	9
1.1. Korrespondenzprinzip in der frühen Quantenmechanik — die Entstehung	11
1.1.1. Das Atommodell (Bohr 1913)	12
1.1.2. Korrespondenzprinzip als Heuristik (Bohr 1917/1920)	17
1.2. Entwicklung, Erweiterung, und Versagen	27
1.2.1. Korrespondenzprinzip als ein quantentheoretisches Gesetz (Bohr 1923)	28
1.2.2. BKS Paper (1924), die Hoffnung und das Versagen	30
1.3. Die Geschichte danach	39
1.3.1. Korrespondenzprinzip nach dem BKS Projekt	39
1.3.2. Quantenchaos - eine Rehabilitierung des Korrespondenzprinzips	41
1.4. Das Korrespondenzprinzip aus einem kritischen Rückblick gesehen	47
1.4.1. Entwicklung des Korrespondenzprinzips in Verbindung mit der Quantenmechanik	47
1.4.2. Problem der Begründung für das Korrespondenzprinzip	51
2. DAS ALLGEMEINE KORRESPONDENZPRINZIP	56
2.1. Post (1971): Das allgemeine Korrespondenzprinzip zeigt, daß die Wissenschaft ein rationales Unternehmen ist.	56
2.2. Fadner (1985): Korrespondenz in <i>operational equations</i>	63
2.3. Radder (1991) und eine kritische Zusammenfassung	68
2.4. Relata in der Korrespondenzrelation	71
1) Wissenschaftliche Termini und Begriffe	72
2) Numerische Werte	73
3) Mathematische Formel, insbesondere Gleichungen	74
4) Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien	76
5) Probleme	78
2.5. Das AKorr als Heuristik und als wissenschaftstheoretische Rekonstruktion	80
2.6. Kritische Diskussion des AKorr	84
3. KOMPLEMENTARITÄT	91

3.1. Ein Blick in die Hintergrundsituation: Heisenbergs Matrixmechanik und Schrödingers Wellenmechanik	93
3.2. Komplementarität in der Quantenmechanik	99
3.2.1. Bohrs Como Vortrag, wo es sich nicht nur um einen Überblick, sondern auch um eine Versöhnung handelte	99
3.2.2. Sachlage von besonderer Art; Unzulänglichkeit und Unverzichtbarkeit der klassischen physikalischen Begriffe	102
3.2.3. Die erste Version der Komplementarität (Como Vortrag)	109
3.3. Komplementaritätsbegriff: Sich-Ausschließen und Sich-Ergänzen	113
3.4. Analyse drei weiterer Fälle der Komplementarität	119
3.4.1. Wellen- und Korpuskularcharakter des Lichts	119
3.4.2. Heisenbergsche Quantenmechanik und Schrödingersche Wellenmechanik	124
3.4.3. Klassische Mechanik und Quantenmechanik	128
4. KONTINUITÄT UND DISKONTINUITÄT IN DER THEORIENDYNAMIK	131
4.1. (Dis-)Kontinuität in der Theoriendynamik und das Korrespondenzprinzip	131
4.2. Triviale Kontinuität und Nichttrivialität der Korrespondenzrelation	139
4.3. Korrespondenz, nicht global, sondern lokal	144
4.3.1. Lokal im Sinne von ‘im Berührungsmodus’	145
4.3.2. Lokal im Sinne von ‘nicht transitiv’	147
5. FORTSCHRITT IN DER WISSENSCHAFT, UND ZUSAMMENSPIEL VON KORRESPONDENZ UND KOMPLEMENTARITÄT	151
5.1. Ein in der Tat sehr problematisches Thema: Fortschritt in der Wissenschaft	154
5.1.1. Wissenschaftsfortschritt bei Kuhn: Fortschritt ohne Ziel, Evolution ohne <i>Telos</i>	158
5.1.2. ‘Fortschritt’ bei Feyerabend: eine Alternative?	173
5.1.3. Zusammenfassung: Kuhn und Feyerabend über den Fortschritt	184
5.2. Korrespondenz und Komplementarität; die komplementäre Rolle in der Theoriendynamik	186
5.2.1. Rückblick auf einen Fall: Quantentheorie als Verallgemeinerung klassischer Theorie der Physik	187
5.2.2. Die Rolle der Korrespondenz in einem Komplementaritätszusammenhang	190
5.3. Zwischen dem Trivialen und dem Dogmatischen — ein Versuch, den wissenschaftlichen Fortschritt zu evaluieren	197
ZUSAMMENFASSUNG	206
LITERATURVERZEICHNIS	208

Einleitung

Die Physik hat mit Anfang dieses Jahrhunderts einen tiefgreifenden Wandel erlebt. Relativitätstheorie und Quantenmechanik sind die zwei wichtigsten Aspekte, die diesen Wandel charakterisieren. Die vorliegende Arbeit stellt den Versuch dar, einen dieser Aspekte, den Übergang von klassischer zu quantenmechanischer Physik, näher zu betrachten und zu zeigen, daß er als ein wissenschaftlicher Fortschritt gelten kann.

Eine solche These ist nicht trivial, wie das vielleicht im ersten Augenblick erscheinen könnte. Der Grund dafür liegt darin, daß dem Fortschrittsbegriff das Problem der Perspektive immanent ist. In jeder Situation, in der ein Fortschritt bewertet werden soll, kann man eine Perspektive konstruieren, aus der heraus sich die Situation nicht als Fortschritt, sondern vielmehr als ein Rückschritt darstellt.

Unter den unzähligen möglichen Perspektiven treten zwei Perspektiven mit vorrangiger Bedeutung auf, wenn man sich auf das Thema Fortschritt durch Theoriewechsel konzentriert: die Perspektive der Siegertheorie und die Perspektive der Verlierertheorie. Mit „Siegertheorie“ wird die (neue) Theorie bezeichnet, die bei einem Theoriewechsel die alte Theorie ersetzt, mit „Verlierertheorie“ die dadurch ersetzte alte Theorie. Aus der Siegerperspektive ist es trivial, daß der gerade durchgeführte Theoriewechsel einen Fortschritt bedeutet. (Hier besteht die Möglichkeit einer Redundanz dieses Begriffs.) Die Bewertung aus der Verliererperspektive sieht auf jeden Fall problematischer aus.

Wenn ein Theoriewechsel bedeuten würde, daß die Leistungen der alten Theorie vollständig aufgegeben worden sind, so wäre der Fortschritt durch diesen Theoriewechsel aus der Perspektive der aufgegebenen Theorie nur als eine Kapitulation zu deuten. Was sich jedoch im Fall des quantenmechanischen Wandels in der Physik dieses Jahrhunderts beobachten läßt, paßt nicht zu dieser Darstellung: „Der Sieger erobert den Verlierer, und der Verlierer kapituliert.“ Klassische Mechanik und Elektrodynamik bestehen als unerläßliche Bestandteile der heutigen Physik. Sie stehen als bewährte (Teil-) Disziplinen neben den quantenmechanischen Lehren.

Im Bereich der Atomphysik erwiesen sich die klassischen Theorien der Physik als unzulänglich. Aus ihrer Sicht waren die Phänomene im atomaren Bereich unverständlich und unerklärbar. In dieser Situation entstand die Quantenmechanik und zeigte die Grenze der klassischen Elektrodynamik und Mechanik auf. Die klassische Physik ist aber dadurch weder gänzlich widerlegt worden, noch in ihrem Geltungsumfang geschrumpft. Was ist geschehen: Nur die Grenzlinie des Geltungsumfangs ist sichtbar geworden, die vor der Entwicklung der Quantenmechanik nicht sichtbar war.

Es handelt sich hier meines Erachtens um einen allgemeinen Aspekt in der Theoriedynamik. Die Grenzlinie des Anwendbarkeitsbereichs einer Theorie wird nicht von *der* Theorie definitiv gezeichnet. Diese Grenzlinie wird erst durch diejenigen neuen Theorien sichtbar, die (auch) jenseits dieser Grenze Geltung besitzen.

In welchem Zusammenhang stehen die beiden Theorien, die klassische und die quantenmechanische Physik? Die vorliegende Arbeit analysiert zwei Begriffe, Korrespondenz und Komplementarität, mit denen dieser Zusammenhang charakterisiert werden soll. Der Ursprung beider Begriffe in dem Sinne, in dem sie in dieser Arbeit betrachtet werden, ist auf Niels Bohrs Beitrag zurückzuführen. Bohr hat jeweils 1920 und 1927 das Korrespondenzprinzip und den Komplementaritätsbegriff in die damalige Atomtheorie eingeführt.

In dieser Arbeit sollen diese zwei Begriffe betrachtet werden, Korrespondenz und Komplementarität, mit deren Hilfe versucht werden soll, ein verallgemeinertes Schema der Theoriedynamik zu skizzieren, insbesondere das eines Theoriwechsels. Diese beiden Begriffe sollen zunächst mit Verweis auf einen Abschnitt der Physikgeschichte dieses Jahrhunderts ausgewiesen werden, in dem man in der Tat ihre Einführung in die Physik, und demnach möglicherweise auch in die Wissenschaftstheorie beobachten kann. Ich werde einen nicht trivialen Korrespondenzbegriff für den Theoriwechsel allgemein aufstellen, in Verallgemeinerung des von Niels Bohr formulierten (sogenannten Quanten-) Korrespondenzprinzips. Die bereits in der Wissenschaftstheorie vertretenen Auffassungen des sogenannten allgemeinen, oder verallgemeinerten, Korrespondenzprinzips scheinen jedoch nicht zufriedenstellend und in verschiedener Hinsicht Begrenzungsbedürftig zu sein.

Im ersten Kapitel wird das Korrespondenzprinzip betrachtet. Die Einführung und die Entwicklung dieses Prinzips werden im Zusammenhang mit der Entwicklung der Quantentheorie am Bohrschen Wasserstoffatommodell von 1913 bis zum Projekt von Bohr, Kramers, und Slater von 1924 dargestellt. Dabei wird zu beobachten sein, daß das Korrespondenzprinzip durch die Entwicklung der Quantentheorie auch einer Bedeutungsentwicklung unterlag. Danach wird ein Blick auf ein aktuelles Forschungsthema der Physik geworfen, das Quantenchaos, in dem das Korrespondenzprinzip, noch wesentlich im Sinne von Bohrs Auffassung, in einem Forschungsbereich der heutigen Physik als Leitprinzip fungiert. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die *phasenweise* Entwicklung der Bedeutung bzw. der Rolle des Korrespondenzprinzips im Zusammenhang mit den Entwicklungsphasen der Quantenmechanik dargestellt. Dieses Schema ließe sich auch allgemein in der Konstruktion einer neuen Theorie anwenden, für den Fall, daß das Korrespondenzprinzip über die Quantenmechanik hinaus verallgemeinert werden könnte.

Im zweiten Kapitel werden einige Auffassungen des verallgemeinerten Korrespondenzprinzips vorgestellt. In diesen Auffassungen ist allgemein das Problem zu erkennen, daß der Diskontinuitätsaspekt in der Theoriendynamik, der eigentlich ein notwendiges Element in der Theoriendynamik zu sein scheint, nicht in gerechtem Maße ins Auge gefaßt wird. Ein Grund für diese einseitige Hervorhebung des Kontinuitätsaspekts wäre, daß das Korrespondenzprinzip bei diesen Autoren ausschließlich als heuristisches Prinzip für die Konstruktion einer neuen Theorie betrachtet wird. Schließlich sind die heuristische Betonung des Kontinuitätsaspekts in der Theoriekonstruktion und der Aspekt der Diskontinuität zwischen Vorgängertheorie und Nachfolgertheorie kompatibel. In diesem Kapitel setze ich mich noch mit einer Frage auseinander, die mir für ein konkretes Verständnis dieses Kontinuitätsaspektes unvermeidbar erscheint: Welche sind die Relata für ein allgemeines Korrespondenzprinzip?

In Kapitel 3 werde ich zur Analyse des zweiten zentralen Begriffs dieser Arbeit kommen, des Begriffs der Komplementarität. Die Einführung des Komplementaritätsbegriffs wird auch im historischen Zusammenhang der damaligen Situation in der Physik dargestellt: nämlich der Entstehungsphase der über die Bohr-Sommerfeldsche Quantentheorie hinausgehenden Quantenmechanik (1925-1927). Es wird untersucht, aus welcher Problemlage heraus der Komplementaritätsbegriff entstand. Daraufhin wird der Begriff der Komplementarität analysiert, wobei einige begriffliche Probleme diskutiert werden. Im letzten Abschnitt sollen drei Fälle des Komplementaritätszusammenhangs in Betrachtung gezogen werden: Wellen- und Teilchencharakter des Lichts, Heisenbergsche Quantenmechanik und Schrödingersche Wellenmechanik sowie klassische Mechanik und Quantenmechanik. Im Verlauf der Untersuchung dieser Fälle wird die Möglichkeit einer Komplementarität zwischen zwei Theorien analysiert, die anschließend im 4. und 5. Kapitel diskutiert werden.

In Kapitel 4 werde ich zunächst über die Kontinuität und Diskontinuität in der Theoriendynamik sprechen. Die Verbindung zwischen dem Korrespondenzprinzip und dem Kontinuitätsaspekt in einem Theoriewechsel wird analysiert, ferner argumentiert, daß ein über die natürliche Mehr-oder-weniger-Bedingtheit in der Genese einer Theorie wesentlich hinausgehender Kontinuitätsaspekt mit Hilfe eines nichttrivialen Korrespondenzprinzips gesichert werden kann.

Im fünften und letzten Kapitel werde ich auf das Thema „wissenschaftlicher Fortschritt“ kommen. Kuhn und Feyerabend, die beide den Diskontinuitätsaspekt in der Theoriendynamik in ihrer Wissenschaftstheorie hervorgehoben haben, stellen sich meines Erachtens grundsätzlich nicht gegen die Idee eines wissenschaftlichen Fortschritts. Die Perspektivität in der diesbezüglichen Bewertung bleibt jedoch bei beiden als wesentliche Komponente, so

daß man nicht sinnvoll darüber sprechen kann, ob ein bestimmter Wandel in der Wissenschaft *wirklich* einen Fortschritt bedeutet oder nicht. Ich werde in diesem Kapitel den wissenschaftlichen Fortschritt als *divergenten* Zuwachs des gesamten Anwendbarkeitsbereichs darstellen, wobei Korrespondenzrelationen zwischen den komplementären Theorien einen Kontinuitätsaspekt darstellen werden. Ein solcher Fortschrittsbegriff wird eine Alternative zu dem gebräuchlichen Fortschrittsbegriff bieten können, der auf der Idee einer *Konvergenz* auf einen idealen Punkt hin beruht.

1. Das Korrespondenzprinzip

Niels Bohr, eine Hauptfigur unter denen, die den turbulenten Wandel in der Physik Anfang dieses Jahrhunderts vollzogen, führte zwei Begriffe in die Geschichte der Physik ein. Es waren das Korrespondenzprinzip und die Komplementarität. Auffallend ist, daß die Komplementarität in den wissenschaftshistoriographischen und wissenschaftsphilosophischen Studien über Bohr und die Quantenmechanik häufiger und ausführlicher diskutiert worden ist als das Korrespondenzprinzip.¹ Dagegen taucht in den meisten Lehrbüchern und Einführungen in die Quantenmechanik das Korrespondenzprinzip auf, während der Komplementaritätsbegriff deutlich seltener erwähnt wird.

Das Korrespondenzprinzip und der Begriff der Komplementarität spielten in der Geschichte der Quantentheorie eine unterschiedliche Rolle. Popper bewertete jedoch wie folgt: Das Prinzip der Komplementarität „*has remained completely sterile within physics*“, während das Korrespondenzprinzip dort außerordentlich fruchtbar gewesen sei². Wenn es auf den ersten Blick nicht klar ist, was genau mit ‘Fruchtbarkeit’ gemeint ist, so ist zumindest klar: Das Korrespondenzprinzip spielte eine entscheidende Rolle in der Entwicklung der Quantentheorie.

Albert Einstein kommentierte die Komplementarität wie folgt: „Bohr’s principle of complementarity, a sharp formulation of which [...] I have been unable to attain despite much effort which I have expended on it.“ (Einstein (1949b), 674) Nicht nur Einstein sondern auch Bohr selbst hätte offensichtlich auch diesen pessimistischen Blick geteilt³. Die Physiker ließen jedoch nicht die Komplementarität außer acht. Für viele von ihnen wurde aber der Komplementaritätsgedanke nach dem Como Kongreß 1927 ein Schlüsselwort, und das nicht nur im Kopenhagener Camp. Knapp zusammengefaßt ließe sich vergleichend sagen: Während sich das Korrespondenzprinzip auf den quantitativen, mathematischen Aspekt der Quantentheorie bezog, war das Prinzip der Komplementarität auf der Ebene der *Interpretation* der Quantenmechanik⁴ wichtig. Das Korrespondenzprinzip konnte ein Physiker zum Beispiel auch dann anwenden, wenn er nicht an die Vollständigkeit der Quantenme-

¹ Siehe Darrigol (1992), 350.

² Popper (1989), 101.

³ Bohr in einem Interview: „I think that it would be reasonable to say that no man who is called a philosopher really understands what is meant by the complementary descriptions.“ Siehe Folse (1985), 9.

⁴ Im Moment soll die Untersuchung ausschließlich auf das Problemgebiet der Quantentheorie beschränkt bleiben.

chanik glaubte.⁵ Während das Korrespondenzprinzip in der Quantenmechanik auf der Ebene von quantitativen Aussagen argumentiert werden kann, wird beim Komplementaritätsbegriff die Ebene der Interpretation notwendigerweise miteinbezogen. Die Relation zwischen der mathematischen Struktur einer physikalischen Theorie und dessen Interpretation bildet ein weiteres Thema. Zumindest klar erscheint, daß für die Quantenmechanik nicht nur eine einzige Deutung sondern mehrere Deutungen möglich sind und in der Tat auch mehrere bestehen. Neben der einflußreichsten Kopenhagener Deutung konkurrieren zum Beispiel noch die Bohrsche *hidden-variables* Theorie und Everetts *Many-World* Interpretation. Die Relation zwischen Theorie als mathematische Struktur und dessen Interpretation ist nicht unbedingt 1-zu-1 Korrespondenz, sondern plurale Interpretationen sind möglich.

Auf der mathematischen Seite der Quantenmechanik, also auf der Seite des interpretationslosen Aussagensystems, ist man zufrieden, wenn man mit hoher Genauigkeit eine Voraussage machen kann. Dagegen fragt man sich auf der Interpretationsebene, wie man die Theorie *verstehen* soll.⁶ Der Komplementaritätsbegriff spielte in der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik eine zentrale Rolle. Er übernahm damit die Rolle des zentralen Leitprinzips von dem langsam ausscheidenden Korrespondenzprinzip.

Die Geschichte, die Rolle und wissenschaftstheoretische Bedeutung des Korrespondenzprinzips ist meines Erachtens bisher nicht ausreichend beachtet worden. Anknüpfend an Meyer-Abichs ausführliche Studie, *Korrespondenz, Individualität, Komplementarität* (1965), haben etliche Leute das Korrespondenzprinzip von Bohr thematisch behandelt⁷. Das wesentliche Defizit der bisherigen Forschung zum Thema Korrespondenzprinzip ist, daß diese nicht die Entwicklung des Korrespondenzprinzips parallel zur Entwicklung der Quantenmechanik phasenweise differenzierend dargestellt haben.

Der Zusammenhang von Korrespondenz und Komplementarität wurde angeblich ein Thema in Stolzenburg (1977) und D'Agostino (1985). Aber in ihren Betrachtungen hielten sie sich nur im historiographischen Kontext auf. Es fehlt bei ihnen die Überlegung über den begrifflichen Zusammenhang zwischen Korrespondenz und Komplementarität, und auch die wissenschaftsphilosophische Implikation beider in Bezug auf die Theoriendynamik im allgemeinen. Diese Punkte sollen in vorliegender Arbeit diskutiert werden.

⁵ Wie sich diese Frage in der Debatte zwischen Einstein/ Podolski/ Rosen (1935) und Bohr (1935) sichtbar werden ließ.

⁶ Auch der Begriff vom „Verstehen“ ist hier problematisch, wird aber in dieser Arbeit nicht weiter vertiefend diskutiert. Für weitere Ansätze siehe Weizsäcker (1985) und Heisenberg (1969).

⁷ Siehe Darrigol (1992), 350f. Darrigol (1992) bietet außerdem eine jedoch nicht sehr umfassende Liste dieser Arbeiten. Radder (1991) gibt in einem kurzen, klar strukturierten Artikel einen kompakten Überblick über die Debatte um das Korrespondenzprinzip.

1.1. Korrespondenzprinzip in der frühen Quantenmechanik — die Entstehung

In der gesamten vorliegenden Arbeit ist der Übergang von nicht-quantenmechanischer, oder vor-quantenmechanischer Physik, zur quantenmechanischen Physik von zentralem Interesse. Diese Wende wurde historisch von dem Korrespondenzprinzip stark beeinflusst, dies zwar nicht nur, jedoch vor allem in der frühen Phase der Entwicklung der Quantentheorie. Um nachvollziehen zu können, wie die Wissenschaftler damals, beziehungsweise die wissenschaftliche Gemeinschaft, diesen Theoriewechsel selbst erlebt haben, ist es notwendig, das Korrespondenzprinzip näher zu betrachten.

Heuristisch spielte das Korrespondenzprinzip für die Entwicklung der Quantenmechanik eine bedeutsame Rolle. Es hatte gewisse zwingende Kraft, der die neue Entwicklung unterliegen mußte. In den späteren Kapiteln wird dafür argumentiert werden, daß das Korrespondenzprinzip nicht nur im Sinne einer Heuristik, sondern auch als ein allgemeines Phänomen innerhalb der Theoriendynamik, als ein sinnvoller Ausgangspunkt für die Theoriekonstruktion fungiert. Dieses Prinzip steht in Einklang mit einer allgemeinen konservativen Haltung, derzufolge innerhalb eines Theoriewandels möglichst wenig verändert werden soll. Im Anschluß daran soll die Entstehung und die Entwicklung des Korrespondenzprinzips sowie dessen Probleme diskutiert werden. Dadurch werden die wissenschaftsphilosophischen Implikationen der Korrespondenzrelation in der Theoriendynamik deutlich, nämlich, wie sie mit der Kontinuität in der Theoriendynamik verknüpft ist.

Das Korrespondenzprinzip entstand im Kontext der *Quantentheorie*.⁸ Es wurde dann eine Zeit lang in der Forschung erfolgreich angewandt⁹, obwohl es nicht einmal in kanonischer Form präzisiert wurde. Es scheint mir dennoch nicht der Fall zu sein, daß das Korrespondenzprinzip in der Entwicklung der Quantenmechanik über den Zeitraum zwischen 1913 und 1927 eine einzige, eindeutige Bedeutung besaß. Die Geschichte des Korrespondenzprinzips wird in diesem Kapitel so dargestellt, daß es eine variierende Rolle in verschiedenen Entwicklungsphasen der neuen Theorie gespielt hat.

⁸ Die 'Quantentheorie', die heute eher als eine umfassende Bezeichnung für die große Zahl der physikalischen Theorien, bei denen quantenmechanische Berücksichtigung grundlegend ist, verwendet wird, hieß um 1925 hauptsächlich die Bohr-Sommerfeldsche Atomtheorie, während 'Quantenmechanik' damals die durch den Beitrag von Heisenberg, Born, Jordan (und später auch Dirac) frisch entwickelte Theorie hieß. Heisenberg et al. sahen in ihrer Quantenmechanik eine wesentlich neuere Theorie als die herkömmliche Quantentheorie.

⁹ Im engeren Sinne bis um 1925, nämlich, bis kurz nach BKS Paper (1924).

Das Korrespondenzprinzip wurde 1920 in einem Bohrschen Vortrag „Über die Serienspektren der Elemente“ zum ersten Mal in der Öffentlichkeit zum Ausdruck gebracht. Es ist jedoch schwierig festzustellen, wo historisch die Wurzel des Bohrschen Korrespondenzgedankens liegt. Es gibt gute Gründe dafür¹⁰, die Geschichte des Korrespondenzprinzips bis 1913 zurückzuverfolgen. In diesem Jahr formulierte Bohr in seiner sogenannten ‘Trilogie’ sein erstes Atommodell.

1.1.1. Das Atommodell (Bohr 1913)

Daß ein Stück Materie aus Teilen besteht, und daß man das Wesentliche der Materie erreichen würde, indem man sie solange teilt, bis es nicht weiter geht, meinten nicht nur die Atomisten in der griechischen Antike. Diese Annahme gehört vielleicht zu den am weitesten akzeptierten Annahmen im Punkt Materieforschung allgemein. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts tauchte die Struktur des Atoms in der Physik thematisch auf. Als die physikalische Wissenschaft über die naiven Vorstellungen der Antike hinaus wiederum zum Begriff der Bausteine der Materie gelangte, hatte die Entdeckung des Elektrons eine wichtige Implikation. Ein Atom als Unteilbares soll dann eine Struktur und damit selber Teile haben.

Erst Ende des letzten Jahrhunderts bekam das Elektron in der Physik einen Platz als Entitätenbegriff. J.B. Perrin 1895 zeigte mit einem Experiment mit Kathodenstrahlen, daß es sich um negativ geladene Teilchen handele, und nachdem es J.J.Thomson in Cambridge gelang, das Verhältnis e/m experimentell zu bestimmen, wobei jedoch die einzelnen Werte von e und m nicht bekannt waren, bekam das *Elektron als Teilchen mit negativer Ladung* einen einigermaßen sicheren Status. Eine genauere Messung der elektrischen Ladung eines Elektrons erfolgte erst 1910 in Millikanschem Öltropfen-Experiment, nämlich 3 Jahre vor dem Bohrschem Atommodell.

Was Rutherford im Zeitraum 1909-1911 mit seiner Gruppe in Manchester leistete, bedurfte einer tiefgreifenden Innovation in der Physik. Das Ergebnis des Experiments mit α -Teilchen war überraschend¹¹, und Rutherford baute darauf seine Theorie über die Struktur des Atoms auf, die aus einem positiv geladenen Atomkern und aus darum herumkreisenden Elektronen mit negativer Ladung besteht. Alle physikalischen Implikationen dieses Modells wurden jedoch nicht sofort durchschaut.

¹⁰ Diese Gründe werden im nächsten Abschnitt dargestellt.

¹¹ Das Experiment wurde hauptsächlich von dem jungen Mitarbeiter Marsden durchgeführt. Wilson (1983) berichtet diesbezüglich:

Rutherford always declared it was the most surprising result he had known, and he coined a graphic phrase which, again, he often used: „It was as though you had fired a fifteen-inch shell at a piece of tissue paper and it had bounced back and hit you.“ (291)

Bohr veröffentlichte 1913 seine Trilogie: „On the Constitution of Atoms and Molecules“, die in drei Teilen jeweils in Juli, September und November 1913 in *Philosophical Magazine* erschien. Dort stellte er sein Modell des Wasserstoffatoms dar, das im Rutherford'schen Atommodell seinen Ausgangspunkt hatte.

Im allgemeinen beruht eine neue Theorie immer auf einem bereits bestehenden Problembereich, der von den Vorgängern auf diesem Gebiet aufgebaut wurde ist. Dies gilt auch für bahnbrechende neue Theorien, die in ihrer Genese *lokal* auf den vorherigen Theorien beruhen¹². Eine vorhergehende Theorie als Ausgangspunkt zu nehmen ist dabei von der Frage unabhängig, ob diese zwei Theorien miteinander verträglich oder ob sie inkompatibel sind. Diese Unabhängigkeit läßt den Raum zu, daß man gewisse ‘Kontinuität’ in Theoriedynamik sicherstellen kann, wo auch Vorgänger- und Nachfolgertheorie miteinander inkompatibel erscheinen.

Er begann auf dem Rutherford'schen Modell; aber zugleich zeigte er dessen fatalen Schwachpunkt auf, nämlich die offensichtliche Instabilität des Elektronensystems im Rutherford'schen Modell. Wenn ein elektrisch geladenes Teilchen eine beschleunigte Bewegung (alle Bewegungen außer linearen Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit) macht, dann sollte es elektromagnetische Strahlung aussenden. Aufgrund des damit hergehenden Energieverlusts kann die Elektronenbewegung im Atom nicht stabil erfolgen, sondern muß sich unter Aussendung von Strahlung auf einer spiralförmigen Bahn dem Atomkern nähern und schließlich mit diesem kollabieren. Zu erklären, daß das Atom von dieser Schlußfolgerung abweichend stabil bleibt, war die eigentliche Hauptmotivation des neuen Atommodells¹³.

Der Weg, den Bohr 1913 gewählt hatte, ist aus seinen zwei Postulaten ersichtlich.

- 1) That the dynamical equilibrium of the systems in the stationary states can be discussed by help of the ordinary mechanics, while the passing of the systems between different stationary states cannot be treated on that basis.
- 2) That the latter process is followed by the emission of a *homogeneous* radiation, for which the relation between the frequency and the amount of energy

¹² Beachtet werden soll, daß ich argumentiere für „können“ und nicht „müssen“. Vgl. auch die Diskussion über allgemeines Korrespondenzprinzip in Kapitel 2.

¹³ Im Memoire von Heisenberg sagt Bohr; „für mich war der Ausgangspunkt die Stabilität der Materie, die ja vom Standpunkt der bisherigen Physik aus ein reines Wunder ist. Ich meine mit dem Wort Stabilität, daß immer wieder die gleichen Stoffe mit den gleichen Eigenschaften auftreten, daß die gleichen Kristalle gebildet werden, die gleichen chemischen Verbindungen entstehen usw. Das muß doch bedeuten, daß auch nach vielen Veränderungen, die durch äußere Wirkungen zustande kommen mögen, ein Eisenatom schließlich wieder ein Eisenatom mit genau den gleichen Eigenschaften ist.“ (Heisenberg (1969), 60)

emitted is the one given by Planck's theory. (Bohr (1913), 7, Hervorhebung im Original)

Bohr schrieb damals, die erste Annahme *seems to present itself*, denn im dynamischen Gleichgewicht eines stationären Zustands sei nicht zwischen der wirklichen Bewegung und deren *Mittelwert* zu unterscheiden. Währenddessen bezeichnet er die zweite Annahme als offensichtlichen Gegensatz gegenüber '*ordinary ideas*', aber zugleich als für die Explikation experimenteller Tatsache *notwendig*.

Das erste Postulat spricht jedoch nicht über eine selbstverständliche Sache. Es taucht zum Beispiel die Frage auf, wie das dynamische Gleichgewicht von einem stationären Zustand überhaupt möglich ist. Denn die beschleunigte Bewegung des Elektrons sollte eigentlich durch die elektromagnetische Strahlung einen Energieverlust bedeuten. Eine andere Frage ist, warum nur bestimmte räumliche Entfernungen zwischen Atomkern und einem Elektron als stationäre Gleichgewichtszustände vorkommen. Wenn die Existenz dieser Eigenschaften einfach hypothetisch, axiomatisch angenommen würden, dann läßt sich eine neue Theorie relativ mühelos aufbauen. Dabei wird es jedoch vorausgesetzt, daß sich ein Elektron in einem stationären Zustand bewegt, ohne elektromagnetische Strahlung auszusenden. Dies widerspricht der Maxwellschen Elektrodynamik. Jedoch die Strahlung eines Übergangs zwischen stationären Zuständen mit scharf bestimmbarer Schwingungszahl ist meßbar, wenn man die scharfen Linien auf dem Spektrum im Rahmen der Atomstruktur mit Elektronen in stationären Zuständen interpretiert.

In der frühen Quantenmechanik ergab sich nach dem Bohrschen Atommodell des Wasserstoffs (1913) eine Diskrepanz zwischen dem neuen Modell und dem klassischen Bewegungsbegriff. Der Begriff der Bewegung gehört zum Fundament der Physik und ist in jeglicher Form für eine physikalische Theorie unerläßlich. Bei Bohr galt dies auch für viele andere Begriffe der klassischen Physik. In seinem Atommodell von 1913 gibt es keinen Platz für den Begriff der Bewegung eines Elektrons. Die beiden Grundthesen seines Modells beinhalten nicht nur keinen Bewegungsbegriff, sondern die Einführung eines solchen Begriffs scheint innerhalb seines Modells prinzipiell schwierig.

Dies liegt erstens daran, daß ein Quantensprung sich nicht mit Worten der Bewegung analysieren läßt. Vereinfacht beschrieben, sieht man bei einem Quantensprung genau genommen keinen *Sprung*, sondern nur die Zustände *vor* und *nach* dem Sprung. Der Versuch, herauszubekommen, was zwischen dem Zustand vorher und dem Zustand nachher geschehen ist, ist vergeblich. Wie wirklich der Sprung stattfindet, läßt sich schwer veranschaulichen. Ich möchte diesen Punkt einen Schritt weiter verfolgen.

Wenn man den Quantensprung als Bewegung betrachten würde, dann könnte man theoretisch den Weg von vor bis nach dem Sprung in einzelne Teile aufteilen. Der Bewe-

gungsbegriff beinhaltet offenbar den Kontinuitätsbegriff. Dies läßt sich für eine physikalische wohl definierte Bewegung wie folgt definieren: Für jede mögliche Aufteilung des Zeitraums von ‘unmittelbar vor (t_v)’ bis ‘unmittelbar nach (t_n)’ der Bewegung durch n Zeitpunkte $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ($t_v < a_k < t_n$) soll die folgenden Gleichungen für alle k gelten:

$$\lim_{t \rightarrow a_k^-} X(t) = X(a_k) = \lim_{t \rightarrow a_k^+} X(t),$$

wobei $X(t)$ verschiedene physikalische Quantitäten symbolisieren kann, zum Beispiel, den Ort eines Elektrons.

Warum ist der Quantensprung dennoch mit dem Bewegungsbegriff schwer vereinbar? Die Begründung dafür ist, daß in der oben vorgenommenen Zerlegung des Prozesses die 1-zu-1 Korrespondenz der Zeit und des Ortes implizit zumindest als eine Möglichkeit vorausgesetzt ist. Dagegen läßt sich über die Position zu einem Zeitpunkt t ($t_v < t < t_n$) in einem Quantensprung keine sinnvolle Aussage machen. Nehme man zum Beispiel einen Zeitpunkt $t = (t_v + t_n)/2$, dann werden alle diese drei Glieder in der obigen Gleichung schlecht definiert.

Als zweites Argument für die Schwervereinbarkeit des Quantensprungs mit dem Bewegungsbegriff wird auf die Relation zwischen dem Quantensprung und der dabei entstehenden Strahlung Bezug genommen. Es ist schwer zu beantworten, *wann* genau die Strahlung ausgesandt wird, beziehungsweise zu welchem Zeitpunkt die Frequenz der Strahlung bestimmt wird. Die Strahlung und der Quantensprung sind so eng miteinander verbunden, daß sie als zwei Seiten ein und desselben Prozesses aufzufassen sind. Wenn Strahlung zu einem Zeitpunkt (mit einer bestimmten Schwingungszahl) ausgesandt wird, wird derjenige sagen, der den Quantensprung mit Bewegungsbegriff verbindet, das Elektron habe begonnen, sich von einem Energiezustand zu einem anderen zu bewegen. Eine Möglichkeit wäre, den ganzen Prozeß als eine nicht weiter zu analysierende Einheit aufzufassen. Damit wäre die Bestimmung der Frequenz mit dem nicht weiter analysierbaren Prozeß des Quantensprungs eng verbunden. Diese Auffassung wurde in der Tat von Bohr vertreten, und Meyer-Abich (1965) charakterisiert diese Situation mit dem Begriff der Individualität eines quantenmechanischen Phänomens.

Nicht nur der Quantensprung sondern auch die Elektronenbewegung in *einem* stationären Zustand sind in dem Bohrschen Atommodell problematisch. In einem stationären Zustand bewegt sich offenbar das Elektron ständig. Dabei ist die spannende Frage: Wie, beziehungsweise nach welcher Regularität oder nach welchem Gesetz, bewegt es sich? Das Bohrsche Atommodell mit seinen zwei Grundpostulaten leistet zu diesem Punkt keine Erklärung. Es bietet keine quantitative Aussage, mit welcher Geschwindigkeit und Frequenz das Elektron um den Kern kreist. Offensichtlich fungierte das Rutherford'sche Atommodell, bei dem sich die Elektronen wie Planeten um den Atomkern bewegen, als eine Vorstufe des Bohrschen Modell.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß das Bohrsche Atommodell allein keine Erklärung für die Elektronenbewegung im Atom bieten kann, wenn es auf die Hilfe der klassischen Theorien der Mechanik und Elektrodynamik verzichtet. Das Bohrsche Atommodell allein kann zum Beispiel keine quantitativen Aussagen über die Elektronenbewegung machen. Manche der quantitativen Beschreibungskomponenten der Elektronenbewegung verloren in der weiteren Entwicklung der Quantenmechanik ihre Bedeutung und gingen in eine probabilistische Beschreibungsweise über. Auf der Grundlage der bisherigen Diskussion scheint folgende Schlußfolgerungen möglich. Erstens wurde bereits in der frühen Phase des Bohrschen Atommodells die Korrespondenzrelation zwischen der quantentheoretischen Vorstellung des Atoms und der ‘ordinary laws of mechanics’ deutlich erkannt. Zweitens war die Korrespondenzrelation in der frühen Phase deutlich weil die Strahlungsfrequenz und die Drehzahl der Ellipsenbewegung des Elektrons zwei grundsätzlich verschiedene Sachverhalte sind. Innerhalb des Bohrschen Atommodells gibt es keinen Grund dafür, die Umlaufzahl des Elektrons in das Modell miteinzufügen. Dennoch handelt es sich bei dieser *ad-hoc* Einfügung nicht um einen zufälligen Gedankengang eines einzelnen Physikers, sondern es gehört zu Forschungsstrategie, die später noch thematisiert werden wird.

Es kann durchaus sein, daß in einer späteren Phase der Theoriebildung, das vorher noch *ad hoc* erscheinende Zusammenfügen von v und ω dann nicht mehr als *ad hoc* erscheint, sondern vor dem fertig entwickelten theoretischen Hintergrund nun durchaus verständlich und sogar als eine zwingende Verbindung anzusehen ist.

Lakatos (1970) betont in diesem Zusammenhang, daß das Bohrsche ‘Programm’ von 1913 für die Atomstruktur auf einer nicht zu ignorierenden inkonsistenten Grundlage aufgebaut wurde. Diese Inkonsistenz bestehe zwischen den Bohrschen Grundannahmen einerseits und der Maxwellschen Elektrodynamik andererseits. Er charakterisiert die Situation mit dem Ausdruck „Aufpfropfung“ (*graft*). Nach seiner Ansicht wurde das Korrespondenzprinzip Bohrs für diese Aufpfropfung vom Bohr-Modell auf die Maxwellsche Basis dafür benutzt, um diese Mängel — das heißt die Inkonsistenz — unsichtbar zu machen.

Bohr selbst sah jedoch auch diese Problematik und diskutierte sie in seinen Arbeiten, einschließlich Bohr (1913), wiederholt in expliziter Weise. Bohr (1923a) gibt im voraus eine Antwort auf die Kritik von Lakatos; er habe mit dem Korrespondenzargument die Inkonsistenz in seinem Programm zu verhüllen versucht:

[D]as Korrespondenzprinzip [muß als] ein rein quantentheoretisches Gesetz betrachtet werden, *das in keiner Weise den Kontrast zwischen den Postulaten und der elektrodynamischen Theorie zu vermindern mag.* (Bohr (1923a), 143, Hervorhebung von I.Ko)

Nicht nur in den Schriften der 1920er Jahre, sondern auch in seinen Abhandlungen der späteren Jahre findet man immer wieder in variierender Form deutliche Formulierungen über den grundsätzlichen Bruch zwischen beiden Vorstellungen. Quantentheorie und nicht quantenmechanische Theorie seien grundsätzlich so verschieden, daß sie beide nicht in eine konsistente Gesamtheorie zusammenzufügen sind.

Dennoch gab sich Bohr mit diesem grundsätzlichen Bruch nicht zufrieden. Er sah die Notwendigkeit einer „in sich zusammenhängenden“ Theorie, was schließlich zur Formulierung seines Korrespondenzprinzips im Jahr 1920 führte:

Ungeachtet des fundamentalen Unterschiedes zwischen dieser Auffassung und den üblichen mechanischen und elektrodynamischen Vorstellungen werden wir jedoch sehen, daß es möglich ist, die Zeugnisse, welche die Spektren ablegen, in rationeller Weise in Verbindungen mit den erwähnten Anschauungen über den Atombau auszuwerten. Es hat sich nämlich ergeben, daß, obwohl wir annehmen müssen, daß die Mechanik nicht bei einer Beschreibung der Übergänge zwischen stationären Zuständen angewandt werden kann, es doch möglich ist, eine in sich zusammenhängende Theorie dieser Zustände aufzubauen. (Bohr (1920), 426-7, Hervorhebungen von I.Ko)

1.1.2. Korrespondenzprinzip als Heuristik (Bohr 1917/1920)

In dem Vortrag „Om Brintspektret“ (Über das Hydrogenspektrum), der von Bohr im Dezember 1913 in Kopenhagen gehalten wurde¹⁴, erwähnt er die Übereinstimmung zwischen Quantentheorie und klassischer Elektrodynamik hinsichtlich der Voraussage über die Strahlungsfrequenzen von langsamen Oszillationen¹⁵. Dort schließt sich der Korrespondenzgedanke an eine Kalkulationsmöglichkeit der Strahlung auf klassischer Basis an, was als ein Ansatz der heuristischen Nutzung der Korrespondenzrelation anzusehen ist.

You understand, of course, that I am by no means trying to give what might be ordinarily be described as an *explanation*; nothing has been said here about how or why the radiation is emitted. On one point, however, we may expect a connection with the ordinary conceptions; namely, that it will be possible to *calculate* the emission of slow electromagnetic oscillations on the basis of the classical electrodynamics. ((1914), 12-13, Hervorhebung von I.Ko)

Hier ist interessant, daß Bohr die Möglichkeit des Kalküls erwähnt, indem er deutlich macht, daß es sich dort um keinerlei *Erklärung* handele. Auf den Status des Korrespon-

¹⁴ Bohr (1914).

¹⁵ Nach Meyer-Abich (1965, 77), meinte Bohr in einem späteren Schreiben im Jahr 1922, daß er selbst den frühen Keim seines Korrespondenzprinzips in dieser Arbeit finden würde.

denzprinzips Bezug nehmend läßt sich wie folgt argumentieren: Die vorrangige Bedeutung des Korrespondenzprinzips lag damals in seiner heuristischen Funktion. Von daher erwartete man von ihm auch keine Erklärungen sondern vielmehr praktische Ergebnisse, für die Formulierung der neuen Theorie. 1914 war die Zeit noch nicht reif für die Formulierung eines Korrespondenzprinzips.

Im April 1920 stellte Bohr in einem Vortrag vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zum erstenmal seine Gedanken über Korrespondenzrelation zwischen Quantentheorie und klassischer Mechanik bzw. Elektrodynamik vor, und erwähnte damit zum ersten Mal das Korrespondenzprinzip. Das Manuskript von dem Vortrag wurde 1920 unter dem Titel „Über die Serienspektren der Elemente“ publiziert¹⁶. Bei diesem Vortrag handelte es sich vornehmlich um die Analyse der Linienspektren des Wasserstoffs, zu der das Korrespondenzprinzip im Zusammenhang des quantenmechanischen Interpretationsproblems der Linienspektren hinzukam.

Spektroskopie war schon seit Kirchhoff und Bunsen in den späten 50er Jahren des 19. Jahrhunderts als eine wichtige Methode der Erforschung der Materie ein bedeutsames Gebiet in der Chemie. Sie war zur Identifizierung zahlreicher Substanzen nützlich. Dabei erzeugt jedes Element ein eigentümliches Liniemuster auf dem Linienspektrum. Diese Methode kann bereits bei sehr kleinen Mengen für die Identifizierung einer Substanz mit hoher Genauigkeit angewendet werden. Man konnte jedoch bis Anfang dieses Jahrhunderts nicht erklären, warum die Linien immer ein charakteristisches Spektrum mit bestimmter Frequenz, Intensität, und Polarisation aufweisen. Erst um die Jahrhundertwende begann man diese Fragen im Kontext der Atomtheorie zu formulieren. Die Pionierarbeit leisteten dabei die Forschungsgruppen um Thomson und Rutherford, die das Phänomen der Linienspektren im Zusammenhang mit der inneren Struktur der Atome zu verstehen versuchten. Alle Erklärungsversuche blieben jedoch erfolglos, bis Bohr 1913 einen Beitrag zu diesem Thema veröffentlichte.

Rein quantitativ machte jedoch bereits Balmer im Jahre 1885 den Vorschlag einer Formel¹⁷, um die Frequenzen der Linien auf dem Wasserstoffspektrum zu erklären. Die Balmer Formel erwies sich als die empirisch erfolgreichste Formel einer ganzen Reihe von Versuchen, die Spektrallinien quantitativ systematisch zu behandeln¹⁸. Bereits ab 1910 gehörte diese Bemühung, das Phänomen der Linienspektren in Verbindung zur Struktur des Atoms zu erklären, zu den Schwerpunkten der Bohrschen Forschung.

¹⁶ Bohr (1920).

¹⁷ Siehe Balmer (1885).

¹⁸ Siehe Pais (1991), 139ff.

Da die Einführung des Korrespondenzprinzip in Bohrs Aufsatz (1920) nicht sein Hauptanliegen war, wird dieses Prinzip dort nicht systematisch entwickelt. Die erste Textstelle, in der sich überhaupt der Ausdruck 'Korrespondenzprinzip' findet, lautet:

[W]ir wollen jetzt zeigen, wie eine solche Bestimmung durch einen einfachen Vergleich zwischen dem emittierten Spektrum und den Bewegungen in den stationären Zuständen erreicht werden kann; ein Vergleich, der uns zugleich zum *obenerwähnten Korrespondenzprinzip* führen wird. ((1920b), 429. Hervorhebung von I.Ko)

Dem entsprechend muß das Korrespondenzprinzip bereits vorher erwähnt worden sein. Es ist jedoch nicht eindeutig, auf welche Stelle er sich hier bezieht. Wenn überhaupt eine Textstelle dafür in Frage kommt, dann die Folgende:

[Es hat] sich nichtsdestoweniger gezeigt, daß zwischen den verschiedenen Typen der möglichen Übergänge zwischen diesen Zuständen einerseits und den verschiedenen harmonischen Komponenten, in welche die Bewegung des Systems zerlegbar ist, andererseits eine weitgehende *Korrespondenz* stattfindet. (427, *italics* von Bohr)

Bohr zeigt hier die Verbindung zwischen den Linienspektren und seinem Atommodell des Wasserstoffs, indem er folgende Relation ableitet:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \nu = \omega.$$

Aufgrund des grundsätzlichen Unterschiedes der beiden Theorien sei die obengenannte Verbindung eine, die man „nur *hoffen*“ könne.

Die Korrespondenz bezieht sich im obigen Kontext auf die Verbindung der verschiedenen möglichen Übergänge zwischen stationären Zuständen mit den Komponenten der Elektronenbewegung im Atom. Die Verbindung von Übergängen (zwischen stationären Zuständen) einerseits und der Bewegung (in einem stationären Zustand) andererseits wurde durch die asymptotische Übereinstimmung von ν und ω demonstriert. Dies fungierte als einzige Begründung der Korrespondenzrelation in (1920b).¹⁹

Die Verbindung zwischen Energieübergängen und Bewegung ist von daher problematisch, weil die beiden in quantitative Übereinstimmung gebrachten Größen physikalisch gesehen völlig unabhängig von einander sind. Dieses Problem wird noch größer, da die Übereinstimmung erst bei einer Hauptquantenzahl von $n=1000$ einen Fehler von 0,15% er-

¹⁹ Siehe auch die Diskussion in Abs. 1.4.3.

reicht. Ein solcher Energieübergang von $n=1000$ zu $n=999$ ist jedoch bereits physikalisch uninteressant.²⁰

n	$v_{n \rightarrow n-1}$ (Sek ⁻¹)	ω_n (Sek ⁻¹)	Fehler ²¹
2	$24,6 \times 10^{14}$	$8,20 \times 10^{14}$	0,67
10	$7,72 \times 10^{12}$	$6,57 \times 10^{12}$	0,14
100	$6,677 \times 10^9$	$6,578 \times 10^9$	0,015
1000	$6,5878 \times 10^6$	$6,5779 \times 10^6$	0,0015
10000	$6,5789 \times 10^3$	$6,5779 \times 10^3$	0,00015

1925 verzichtete man im Atommodell auf die Idee der kreisförmigen beziehungsweise elliptischen Bahnen der Elektronenbewegung. Damit verlor auch die Übereinstimmung von v und ω ihre ursprüngliche Bedeutung. Bohr (1920b) schreibt aber weiter:

Wenn wir nun nach einer *tiefere Bedeutung der nachgewiesenen Korrespondenz* fragen, werden wir naturgemäß erstens dazu geführt, zu erwarten, daß die Korrespondenz nicht nur in einer Übereinstimmung der nach den beiden Methoden bestimmten Schwingungszahlen der Spektrallinien bestehen wird, sondern auf für ihre Intensitäten Geltung haben wird. (431, Hervorhebung im Original ignoriert, Hervorhebung von I.Ko addiert)

Erstens ist hier auffällig, daß er stillschweigend voraussetzt, die Korrespondenzrelation sei bereits nachgewiesen. Zweitens spricht er über deren tiefere Bedeutung und der mit ihr verbundenen Erwartung, die Korrespondenz auch für weitere ähnliche Anwendungen verwenden zu können. Was genau meinte er mit 'tieferer Bedeutung' der Korrespondenz? Eine mögliche Antwort auf diese Frage läßt sich im Bohrschen Sinne aus dessen Artikel „On the Quantum Theory of Line-Spectra“ (1918) rekonstruieren. Dort schreibt er:

[T]he effect of that part of the electrodynamical forces which is connected with the emission of radiation will at any moment be very small in comparison with the effect of the simple electrostatic attractions or repulsions of the charged particles corresponding to Coulomb's law. (Bohr (1918), 98)

Das von Rutherford vorgestellte System ist zwar streng genommen nicht stabil, aber der dafür verantwortliche elektrodynamische Effekt ist so klein, daß man das Elektronensystem

²⁰ Der durchschnittliche Radius für die Elektronenbewegung im Zustand $n=1000$ beträgt 10^6 mal Bohr-Radius, oder $5,29 \times 10^{-5}$ m. Dies bedeutet, ca. 2×10^9 Wasserstoffatome befinden sich in Volume von 1 l., oder $4,5 \times 10^{10}$ in 22,4 l, etwa in Größenordnung 10^{-13} von Avogadrozahl.

²¹ Fehler = $(\omega - v) / v$

für eine beschränkte Zeit näherungsweise mit ausschließlich elektrostatischen Überlegungen behandeln kann.

[I]t is therefore a natural assumption, that it is possible in such cases to obtain a close approximation in the description of the motion in the stationary states, by retaining only the latter [Coulomb] forces. (*op.cit.*, 98f)

Dadurch wird der Sinn des ω 's bewahrt, jedoch nicht der Sinn der Verbindung von ω und ν . Um diese verstehen zu können, muß man auf den damaligen Stand der Theorie näher eingehen. Während Rutherford in einem ersten Schritt die Spektroskopie und die innere Struktur der Atome in Verbindung brachte, war Bohrs Leistung, daß er in einem nächsten Schritt zu dieser Kombination noch das Plancksche Wirkungsquantum h als das dritte Element hinzufügte. Dieses Element der Diskontinuität war ursprünglich von Planck im Kontext der Wärmestrahlungstheorie eingeführt worden. Auf der Basis der klassischen Elektrodynamik war für Planck die Relation 'Strahlungsfrequenz ν = Schwingungszahl ω ' die einzige mögliche Erklärung für die Strahlungsfrequenzen²², und die Plancksche Strahlungstheorie war für die Bohrsche Atomtheorie eine Basistheorie.

Es erscheint plausibel, daß Bohr den entscheidenden Hinweis aus dem Bereich der Wärmetheorie für die Entwicklung seiner Theorie bekam. Im Bereich niedriger Schwingungszahlen brachte das hauptsächlich aus klassischen Annahmen abgeleitete Rayleigh-Jeans-Gesetz gute Ergebnisse.²³

[F]rom the fact that it has been possible by means of ordinary mechanics and electrodynamics to account for the phenomenon of temperature-radiation in the limiting region of slow vibrations, we may expect that any theory capable of describing this phenomenon in accordance with observations will form some sort of natural generalisation of the ordinary theory of radiation. (99)

Die alte Theorie zeigt (noch) gute Leistungen in einem beschränkten Bereich, und zwar im Grenzbereich mit hoher Quantenzahl. *Demzufolge* wäre zu erwarten, daß *jede* Theorie, die in diesem alten Problembereich erfolgreich ist, als eine Verallgemeinerung der alten Theorie angesehen werden kann.

Durch das Bohrsche Korrespondenzargument ist erstens die Verbindung zwischen dem Gegenstandsbereich einer Theorie und der Theorie selbst zum Ausdruck gebracht worden. Dabei bedeutet die Erweiterung des Gegenstandsbereichs linear eine Verallgemeinerung der Theorie. Eine wissenschaftstheoretisch interessante Implikation des Bohrschen

²² In der Planckschen Theorie wird es als selbstverständlich angenommen, daß die Schwingungszahl der vom Oszillator emittierten und absorbierten Strahlung seiner eigenen Schwingungszahl gleich ist, eine Annahme, die wir auch wie folgt schreiben können: $\nu = \omega$. (Bohr (1920), 425)

²³ Gasiorowicz (1974), Chap.1.

Korrespondenzprinzips findet man in dieser Verbindung. Die neue Theorie zeigt sich dann als eine Verallgemeinerung der alten Theorie, indem sie an den erfolgreichen Anwendungsbereich der alten Theorie *anschließend* ihren Anwendungsbereich bietet, in dem nicht die alte Theorie, sondern nur sie erfolgreich vorkommt.

Zweitens steht bei Bohr der Gedanke im Hintergrund, eine bewährte alte Theorie nicht einfach fallen zu lassen, auch wenn man sie bis in neue Gegenstandsbereiche hinein erweitern muß, in denen sie keine gute Leistung mehr erzielt. Dieser Korrespondenzgedanke von Bohr beinhaltet keine allgemein verpflichtende normative Regel, sondern ist eher als ein mögliches heuristisches Instrument aufzufassen.

Was aber hat Bohr 1920 zur Formulierung des Korrespondenzprinzips gebracht? Ein Hinweis zur Beantwortung dieser Frage findet sich in Bohr (1920b), wo er den Ausdruck „in sich zusammenhängende Theorie“ verwendet.²⁴ Rutherford schreibt am 20. März 1913 an Bohr einen Brief, nachdem er den ersten Teil der Bohrschen Trilogie gelesen hatte.

Your ideas as to the mode of origin of the spectrum of hydrogen are very ingenious and seems to work out well; but the mixture of Planck's ideas with the old mechanics make it very difficult to form a physical idea of what is the basis of it.²⁵

Obwohl die Bohrsche Idee 1913 gut zu funktionieren scheine, sehe Rutherford in ihr eher eine wenig harmonische Mischung der Planckschen Idee mit der klassischen Mechanik. Daraus könne keine konsistente konzeptuelle Basis entstehen. Dies war nicht allein die Meinung Rutherfords, auch Bohr selbst war das Problem der inneren Zerrissenheit seines Modells bekannt.

Eine gravierende Schwierigkeit im Bohrschen Atommodell, so schreibt Rutherford im selben Brief, sei die Frage, wie das Elektron entscheiden könnte, mit welcher Schwingungszahl es oszillieren soll, wenn es einen Sprung von einem zum anderen stationären Zustand macht. In dem Moment, in dem der *Quantensprung* bereits begonnen hat, und das System (oder das Elektron) eine Strahlung mit scharf definierter Frequenz aussendet, ist nach den Bohrschen Grundpostulaten ($E' - E'' = h\nu$) der Endzustand des Elektronensystems bereits festgelegt. Wie ist es zu erklären, daß das Elektron in diesem Moment schon genau *weiß*, wie es diesen Vorgang abschließen wird? Auf diese Schwierigkeit, die mit dem Kausalitätsproblem zusammenhängt, wird im Kapitel 3 dieser Arbeit über den Komplementaritätsbegriff zurückgekommen werden.

²⁴ „...in sich zusammenhängende Theorie dieser Zustände aufzubauen auf der Annahme, daß die Bewegung in den stationären Zuständen durch Anwendung der gewöhnlichen Mechanik beschrieben werden kann.“ (427)

²⁵ Wilson (1983), 331.

Trotz dieser Schwierigkeit war der Vorteil des Bohrschen Atommodells zusammen mit den Grundpostulaten der Quantentheorie so offenbar, insbesondere bei der Erklärung der Spektrallinien, daß man auf diese frühe Quantentheorie wegen dieser Schwierigkeiten nicht verzichtete, sondern sich weiter darum bemühte, der Quantentheorie *nachträglich* die innere Harmonie zu besorgen. Dies ist ein wichtiger Grund dafür, daß es 1920 zur Formulierung des Korrespondenzprinzips kam.

Die Annahme, daß die Elektronbewegung in einem stationären Zustand aufgrund der klassischen Theorie (Coulombsches Gesetz) näherungsweise beschrieben werden könne, war in Bohrs Trilogie 1913 bereits enthalten. Im Jahre 1920, als das Korrespondenzprinzip formuliert wurde, war diese Annahme nichts Neues. Der neue Aspekt 1920 war, daß Bohr die damalige Atomtheorie durch das Korrespondenzprinzip zu einer in sich zusammenhängenden Theorie machen wollte. 1913 fehlte seiner Atomtheorie noch diese innere Konsistenz. In Pais (1991) werden die Reaktionen der Physiker nach der Veröffentlichung der Bohrschen Trilogie 1913 lebhaft geschildert²⁶: Das Bohrsche Modell wurde von den meisten Physikern einschließlich Einstein offenbar schnell angenommen; zu den wenigen Ausnahmen gehörten unter anderen Sir Rayleigh und J.J. Thomson. Wesentlichen Anteil an diesem positiven Echo hatte der Erfolg dieses Modells bei der Erklärung der Spektroskopie des ionisierten Heliums.

Bemerkenswert ist, daß Bohr selbst offenbar von Anfang an mit seinem Modell nicht glücklich war. Seiner Meinung nach war dringend eine verbesserte Version erforderlich. An dieser Stelle soll nun wieder zur Frage zurückgekehrt werden, in welchem Sinne Bohr 1920 die Korrespondenz bereits für nachgewiesen gehalten hat. Der Text legt nahe, daß er mit dem Nachweis der Korrespondenz die asymptotische Übereinstimmung von ν und ω für hohe Hauptquantenzahlen n gemeint hat. Problematisch ist hierbei jedoch, daß diese Übereinstimmung keine ausreichende Basis für weitere heuristische Anwendungen des Korrespondenzprinzips darstellt, mit der man zum Beispiel das Problem der Intensität und der Polarisation der Strahlung lösen könnte. Auch wenn die Übereinstimmung von ν und ω nicht als die Begründung für heuristische Anwendung dieses Prinzips fungieren kann, leistet sie die Funktion einer Brücke zwischen den beiden Theorien. Aber man hat hier keine Garantie dafür, daß die zwei Theorien durch diese Brücke global 1-zu-1 übereinstimmen werden. Man hat keine Hinweise darüber, wie weitreichend die Wirkung dieser Brücke sein wird.

Jetzt kommen wir auf das Problem der „tieferen Bedeutung“ der Korrespondenz. Mir ist nicht gelungen, aufgrund seiner Texte klar zu erkennen, was er genau damit meinte. Jedoch steht diese tiefere Bedeutung offensichtlich im engen Zusammenhang mit dem

²⁶ Pais (1991), 152-155.

„Nachweis“ der Korrespondenz. Ich versuche, die „tiefere Bedeutung“ so zu verstehen. Es scheint zunächst nicht so, daß Bohr die Übereinstimmung von zwei in verschiedener Weise eingeführter und gerechneter physikalischer Quantitäten sah, und dann von dieser Übereinstimmung ausgehend, an die weitergehende heuristische Anwendung eines Prinzips dachte. Vor allem zu beachten ist, daß er die Notwendigkeit, eine „in sich zusammenhängende Theorie“ zu formulieren, sah ohne die weder eine in sich zusammenhängende Erklärung noch ein Verstehen der Bausteine der Materie zu erreichen ist.

In dem Aufsatz „On the Quantum Theory of Line-Spectra“(1918) erläuterte Bohr den damaligen Stand und weitere Aufgaben der Atomforschung. Die Verbindung der Theorie der Atomstruktur mit der Spektroskopie bleibt weiterhin zentral innerhalb des Bohrschen Projekts. Als er dort seine zwei Grundannahmen von 1913 nochmals niederschreibt, stellt sich für ihn die Situation wie folgt dar:

Now on the basis of a vast amount of experimental evidence, we are forced to assume that an atom or molecule consists of a number of electrified particles in motion, and, since the above fundamental assumptions imply that no emission of radiation takes place in the stationary states, we must consequently assume that *the ordinary laws of electrodynamics cannot be applied* to these states without radical alterations. ((1918), 98, Hervorhebung von Bohr)

Die schwierigste Aufgabe war, die Stabilität des Atoms, des Bausteins der Materie, zu erklären. Das Atom besteht aus den Teilchen mit elektrischer Ladung, die sich im Atom ständig bewegen. Weil von der Maxwellschen Elektrodynamik ein solches Atom keine dauerhafte Stabilität besitzen kann, ist es offensichtlich, daß ohne eine radikale Veränderung „the ordinary laws of electrodynamics cannot be applied“. Das Bohrsche Projekt versucht jedoch nicht nur die Stabilität eines Atoms, sondern befaßte sich auch mit der Dynamik der Elektronenbewegung im Atom. Die Beschreibung der inneratomaren Elektronenbewegung war nämlich eine Aufgabe, die sich die Atomtheorie bereits früh gestellt hatte.

Röseberg (1992) und Fischer (1987) datieren die Entstehung des Korrespondenzprinzips auf das Jahr 1917, und nicht auf 1920. Sie nehmen dabei Bezug auf Bohr (1918), einen Artikel, der 1917 geschrieben wurde²⁷. Dies läßt sich durchaus nachvollziehen, denn Bohr schreibt in der Einleitung zu diesem Werk:

[I]t will be shown that it seems possible to throw some light on the outstanding difficulties by trying to trace the analogy between the quantum theory and the ordinary theory of radiation as closely as possible. (Bohr (1918), 97)

²⁷ Nur Röseberg macht diese Bezugnahme deutlich.

Hier läßt sich die Taktik erkennen, daß man die schwierigen Aufgaben in der Theoriekonstruktion mit Hilfe der Analogie zur alten Theorie zu bewältigen versucht. Was in diesem Zusammenhang „Analogie“ heißen soll, wird nicht deutlich. Offenbar hat Bohr zu diesem Zeitpunkt noch keine klaren Konturen dafür im Kopf. Dennoch scheint klar, daß er umfangreiche Teilbereiche der alten Theorie auf die neu aufzubauende Theorie zu übernehmen gedenkt. Meyer-Abich (1965) wurde auf diesen Aspekt des Korrespondenzprinzips aufmerksam, und beschrieb das Prinzip in erster Linie als Ausdruck für die Bestrebungen, von der klassischen Physik her jeden möglichen Zug zum Aufbau einer neuen Theorie zu verwerten. Zu recht charakterisierte er das Bohrsche Korrespondenzprinzip als unbestimmt:

Das Korrespondenzprinzip ist eine noch nicht vollständig bestimmte Form der noch nicht vollständig bestimmten Analogie zwischen der noch nicht vollständig bestimmten Quantentheorie und der bestimmten klassischen Theorie. (Meyer-Abich (1965), 86. Der ganze Satz wurde im Original hervorgehoben gedruckt.)

Diese Eigenschaft des Bohrschen Korrespondenzprinzips wird später noch erörtert werden.²⁸ Die noch vorhandene Unbestimmtheit der Korrespondenzrelation, wie sie hier konstatiert wird, sollte jedoch nicht zu einer voreiligen negativen Bewertung dieses Prinzips führen. Die Konkretion, mit der dieses Prinzip formuliert wird, scheint sich zum Umfang seiner Anwendungsmöglichkeiten komplementär zu verhalten.

In Bohrs Artikel von 1918 sind in diesem Zusammenhang zwei Passagen von besonderem Interesse. In der ersten mußte sich Bohr dem Problem stellen, die Bewegung in einem stationären Zustand zu beschreiben:

Even if the theory of radiation must be completely altered, it is therefore a natural assumption that it is possible in such cases to obtain a close approximation in the description of the motion in the stationary states. (98f)

Zweitens erachtete er es für notwendig, in seinem Modell eine kontinuierliche mechanische Verbindung zwischen den stationären Zuständen herzustellen, denn:

we possess no means of defining an energy difference between two states if there exists no possibility for a continuous mechanical connection between them. (102)

Damit soll die Notwendigkeit irgendeiner kontinuierlichen mechanischen Verbindung zwischen den stationären Zuständen dargestellt werden. Ohne eine solche könnte man nicht den Energieunterschied zwischen den Energiezuständen konsequent definieren. Doch eine solche Kontinuität kann das Bohr-Modell mit seinen zwei Grundhypothesen nicht

²⁸ Siehe noch Abs. 1.4.

leisten. Aus dieser Perspektive besteht die Gefahr, daß stationäre Zustände mit einem Energieunterschied unerklärlich sind.

Daraus folgt für Bohr (1918) die Aufgabe, in seiner Theorie eine solche Verbindung zur mechanischen Beschreibung herzustellen. Es ist also ersichtlich, daß sich das Korrespondenzprinzip in seiner Einführung nicht direkt auf die Beziehung von klassischer Theorie und Quantentheorie bezog, wie in manchen Lehrbüchern der Physik dargestellt. Vielmehr zielt es in dieser Phase auf die Verbindung zwischen der neu entstehenden Strahlungstheorie mit dem (klassisch-)mechanischen Zugang zum Problem der Elektronenbewegung. Es ging also darum, für die Quantentheorie wieder den Anschluß an die aufgegebenen klassische Mechanik herzustellen. Dabei soll eine Schwachstelle in der Quantentheorie verbessert werden, indem das inneratomare Bewegungsproblem gelöst wird. In (1918) schreibt Bohr in diesem Sinne:

In the following we shall therefore, as in all the papers mentioned in the introduction, for the present *calculate the motions of the particles in the stationary states as the motions of mass-points according to ordinary mechanics* including the modifications claimed by the theory of relativity. (99, Hervorhebung im Original)

Auffällig ist bei Bohrs Arbeiten zwischen 1917 und 1920²⁹ die wiederholte Formulierung ‘rationelle Verallgemeinerung’. Daneben benutzt er auch den Ausdruck ‘natürliche Verallgemeinerung’, ohne jedoch der unterschiedlichen Bedeutung Aufmerksamkeit zu widmen. Er betont in diesen Jahren, daß die neue Theorie so konstruiert werden müsse, daß sie als Erweiterung bzw. Verallgemeinerung der klassischen Theorie angesehen werden kann.

Der in diesem Zusammenhang zentrale Begriff der Verallgemeinerung soll anhand eines Beispiels konkreter aufgegriffen werden. In gewisser Hinsicht läßt sich die Newtonsche Mechanik als Verallgemeinerung des Galileischen Fallgesetzes auffassen. Damit ist jedoch nicht gemeint, daß es möglich sei, ausgehend vom Galileischen Fallgesetz *durch einen Verallgemeinerungsprozeß* auf die Theorie der Newtonschen Mechanik zu schließen. Zwischen Newtonscher Theorie und Galileischem Gesetz besteht jedoch eine gewisse Inkompatibilität, und die letztere Theorie läßt sich streng genommen von der ersteren nicht ableiten. Würde man beispielsweise in einem Experiment planen, von der Spitze des Turms zu Pisa eine Metallkugel herabfallen zu lassen und dabei berechnen, nach wieviel Sekunden die Kugel den Boden erreichen wird, ergeben die Theorien zwei unterschiedliche Lösungen.

Diese Inkompatibilität ist jedoch kein schwerwiegendes Problem, weil die Newtonsche Theorie als eine Verallgemeinerung des Galileischen Gesetzes angesehen werden kann. Der Unterschied in den Vorhersagen beim Kugelexperiment kommt daher, daß der Galilei-

²⁹ Auch bis zu den späteren Arbeiten, wie zum Beispiel Bohr (1923a,b), (1928d,e).

sche Satz die Erdschwerebeschleunigung g als konstant annimmt, während sie aus der Perspektive der Newtonschen Mechanik nicht konstant ist, sondern während des Fallens ständig variieren soll, weil sie von dem Abstand zwischen der Kugel und der Erde abhängig ist. Mit Hilfe der Newtonschen Mechanik als der späteren Nachfolgertheorie läßt sich bestimmen, wo die frühere Theorie weniger genau und wo sie exakte Aussage gemacht hat. Die Nachfolgertheorie ist in der Lage zu beschreiben, worin genau die Ungenauigkeit liegt, und in welchen Situationen die frühere Theorie sinnvoll als eine Näherung im Sinne der Newtonschen Mechanik aufgefaßt werden kann. Auf diese Weise können auch die Lösungen oft weit einfacher berechnet werden. Daher darf ein Physiker, oder Physikstudent, in bestimmten Problemsituationen sinnvollerweise die Schwerebeschleunigung als Konstante annehmen, obwohl man weiß, daß dies genau genommen nicht korrekt ist. Die Toleranz wirkt hier nicht symmetrisch. Aus der Perspektive der Newtonschen Mechanik kommt das Fallgesetz als ein Grenzfall vor, der in beschränkten Situationen zu tolerieren ist. Aber aus der Perspektive des Galileischen Fallgesetzes würde es schlicht inakzeptabel erscheinen, daß g mit der Zeit, oder nach dem Abstand zwischen Kugel und Erde variiert.

1.2. Entwicklung, Erweiterung, und Versagen

Nachdem Bohr 1920 das Korrespondenzprinzip in die Atomtheorie eingeführt hatte, wurde es zu dem wichtigsten heuristischen Leitprinzip im Bereich der Atomphysik. Es wirkte sowohl als positive als auch als negative Heuristik. Mit positiver Heuristik ist gemeint, daß für die neue Theorie mit Hilfe dieses Prinzips aus der alten Theorie ein Vorschlag für das bisher unbekanntes Verhältnis zwischen zwei theoretischen Termen abgeleitet wird. Dabei ist darauf zu achten, daß der durch das heuristische Korrespondenzprinzip neu gewonnene Zusammenhang noch keinen Gültigkeitsanspruch besitzt. Das Korrespondenzprinzip als negative Heuristik fungiert als eine Vorschrift zur Prüfung eines neu gebildeten Teils der Atomtheorie. Ein Vorschlag oder ein neuer Versuch in der Theoriekonstruktion sollte diesem Prinzip Genüge tun.

In dem Geleitwort zu *N. Bohr: Abhandlungen über Atombau; aus den Jahren 1913-1916* (1921) schreibt Bohr, daß er sich auf dem neuen Gebiet der Quantentheorie, deren zentrale Elemente, wie die Übergangsprozesse zwischen zwei stationären Zuständen, prinzipiell nicht mit Hilfe der „gewöhnlichen“ Mechanik zu beschreiben sind und wo man „kein [anderes] Mittel an die Hand“ bekam, weitgehend auf folgende Überlegung stützte:

[D]aß in dem Grenzgebiet, wo die stationären Zustände nur wenig voneinander abweichen, die Quantentheorie zu Ergebnissen führen *muß*, die denjenigen ent-

sprechen, welche man bei Anwendung von gewöhnlichen mechanisch-statistischen Betrachtungen finden würde. (vii, Hervorhebung von I.Ko)³⁰

Weiter hinten im selben Geleitwort bringt Bohr etwas Interessantes zum Ausdruck. Es sei ein nützlicher Fingerzeig für ihn gewesen, daß man in der Quantentheorie nach einem asymptotischen Anschluß an die klassische Strahlungstheorie sucht. Obwohl erst im Jahre 1921 geschrieben, läßt sich aufgrund dieses Geleitwortes folgern, daß der Korrespondenzgedanke bei Bohr schon in den Jahren von 1913 bis 1916 als Leitprinzip präsent war.

Erstmals zeigte sich das Korrespondenzprinzip als heuristisch wirksam bei den Problemen der Polarisation und der Intensität der spektralen Strahlungen des Atoms. Wie schon in Abs. 1.1. erwähnt, konnte die Bohrsche Atomtheorie allein diese zwei Probleme nicht behandeln, obwohl sie auf die zwei Hauptfragen der Atomtheorie Anfang dieses Jahrhunderts Antwort geben konnte. Sie konnte sowohl die Stabilität des Atoms als auch die Verbindung der Spektrallinien zur Atomstruktur erklären. Nachdem Bohr diese Verbindung zwischen Spektroskopie und Atomstruktur hergestellt hatte, wurde sie zum Hauptthema in der Atomtheorie, wobei insbesondere versucht wurde, die Feinstruktur der Spektrallinien und den Starkeffekt zu erklären.

Nach Kramers (1920) war für ihn das Bohrsche Korrespondenzprinzip unverkennbar das Leitprinzip, das sein Herangehen an diese Probleme ermöglichte. Seit seiner Dissertation war er einer der Hauptfiguren in der praktischen Anwendung des Korrespondenzprinzips in der Atomphysik. Der von Kramers eingeschlagene Weg erreichte mit seiner Dispersionstheorie um 1924 seinen Höhepunkt. Für Kramers war das Korrespondenzprinzip etwas, „dessen Konsequenzen sich in gewissem Umfang haben prüfen und bestätigen lassen“ (1923, 551).

1.2.1. Korrespondenzprinzip als ein quantentheoretisches Gesetz (Bohr 1923)

In dem Aufsatz „Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau“ (1923) ist eine Fußnote hinsichtlich des Korrespondenzprinzips von besonderem Interesse:

In Q.d.L.³¹ wird diese Bezeichnung [„Korrespondenzprinzip“] noch nicht benutzt, sondern der Inhalt des Prinzips ist dort als eine formale Analogie zwischen Quantentheorie und klassischer Theorie bezeichnet. Eine solche Ausdrucksweise könnte jedoch Mißverständnisse veranlassen, da ja — wie wir im

³⁰ Reprint in: *NBCW* 3, [311].

³¹ „On the Quantum Theory of Line-Spectra“ (1918-1922).

folgenden sehen werden — das *Korrespondenzprinzip als ein rein quantentheoretisches Gesetz* betrachtet werden muß, das in keiner Weise den Kontrast zwischen den Postulaten und der elektrodynamischen Theorie zu vermindern vermag. (142-143, Fußnote, Hervorhebung von I.Ko)

Das Korrespondenzprinzip muß als ein rein quantentheoretisches Gesetz betrachtet werden, und nicht bloß als eine neutrale Brücke, die zwischen der klassischen Theorie und der Quantentheorie eine analoge Verbindung herstellt. Anhand des Bohrschen Textes ist es schwer, einen klaren Hinweis darauf zu finden, was mit einem „rein quantentheoretischen Gesetz“ genau gemeint ist. Die heuristische Anwendung des Korrespondenzprinzips hat sich zwischen 1920 und 1923 im wesentlichen nicht verändert. Bohrs interessante Bemerkung, das Korrespondenzprinzip als ein quantentheoretisches Gesetz aufzufassen, wird erst deutlich, wenn man sich die Geschichte der Quantentheorie vor Augen hält.

Gegen Ende 1922, als dieser Aufsatz geschrieben wurde, waren bereits die ersten Ergebnisse der Quantentheorie sichtbar geworden, die mit dem Bohrschen Atommodell zusammen mit dessen Quantenpostulaten ihren Anfang genommen hatten. Zu diesem Zeitpunkt war auch schon deutlich geworden, daß die klassische Theorie außer dem Wasserstoffatom und dem He^+ -Ion nicht einmal für das Heliumatom eine angemessene Beschreibung zu bieten vermochte. Aus diesem Grund ist eine Analogie zur klassischen Theorie nur im begrenzten Maße sinnvoll.³² Währenddessen war die Quantentheorie innerhalb von knapp zehn Jahren nach dem Erscheinen der Bohrschen *Trilogie* (1913) zu einer ‘in sich geschlossenen’ selbständigen Theorie gewachsen. In diesem Stadium der Quantentheorie hatte die klassische Theorie ihre Rolle als *global* maßgebende Referenz verloren. Sie blieb nur noch in beschränktem Sinne als Referenz übrig, und zwar dort, wo aus der Sicht der Quantentheorie dafür noch Bedarf bestand. In Bohr (1923a) war das Korrespondenzprinzip das Werkzeug dafür, die grundlegenden Unzulänglichkeiten der klassischen Physik für die Atomtheorie deutlich zu machen und die Quantentheorie zu vervollständigen. Eine Passage aus Bohr (1924b) verdeutlicht nochmals den Gedanken des obigen Zitats.

It must be emphasised, however, that here we have by no means to do with a gradual disappearance in this limit of the fundamental difference between the quantum theory and the classical theory. (*Reprint in: NBCW 3, [577]*)

Es geht um *zwei* prinzipiell voneinander unabhängige Theorien, die an einigen Stellen fundamental gegensätzlich sind.

³² J.R.Nielsen schreibt in der *Introduction to Part I, NBCW 3*: „[B]y failing to obtain agreement with the observed ionization potential, it demonstrated very clearly the inability of classical mechanics.“

Dieser Auffassung zufolge wurde die klassische Elektrodynamik und Mechanik *nicht* allgemein, *sondern* für den speziellen Gegenstandsbereich der Atomtheorie verworfen. Die klassischen Theorien wurden also lediglich für die Phänomene auf der [sub-]atomaren Ebene als ungeeignet bezeichnet. Der Wandel im Verhältnis zur klassischen Theorie zwischen 1913 und 1923 innerhalb der Physik war also kein Theoriewechsel im wörtlichen Sinne, sondern die Erkenntnis über die begrenzte Gültigkeit einer Theorie und das Entstehen einer neuen Theorie, die anfangs nur für einen bestimmten beschränkten Phänomenbereich konzipiert wurde. Diese Konzeption läßt sich nicht als globale Substitution auffassen, sondern eher als lokale Beschränkung des Gültigkeitsumfanges der alten Theorie. Im Endeffekt erfährt jedoch die Summe des Gültigkeitsumfanges des Disziplinbereichs, nämlich der Physik, eine globale Erweiterung, wenn man dort die neue Theorie miteinbezieht.

1.2.2. BKS Paper (1924), die Hoffnung und das Versagen

In der Dispersionstheorie von Kramers (1923/1924), sowie in der Theorie der Strahlung, die sich aus der Zusammenarbeit von Bohr, Kramers und Slater ergab, war in den 1920er Jahren ein Höhepunkt der heuristischen Anwendung des Korrespondenzprinzips. Das ambitionierte Projekt von Bohr, Kramers, und Slater, das 1924 in den sogenannten BKS [Bohr-Slater-Kramers] Aufsatz³³ mündete, wurde jedoch bereits nach knapp einem Jahr als untauglich verworfen. Der Grund dafür war eine Versuchsanordnung, die Bothe und Geiger³⁴ in Charlottenburg noch in dem selben Jahr zu Überprüfung der Thesen des BKS Aufsatzes vorschlugen. Im nächsten Jahr wurde von Bothe und Geiger ein weiterer Beitrag, „Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung“, publiziert, in dem die von ihnen vorgeschlagene Prüfung vorgenommen wurde und zu einem für die BKS Theorie negativen Resultat führte³⁵. Auch ein Beitrag von Compton und Simon³⁶ in *Physical Review* legte einige Monate später das selbe negative Ergebnis zur BKS Theorie vor.

³³ Bohr et al.(1924). Auch in deutsch erschienen: „Über die Quantentheorie der Strahlung“, *Zeitschrift für Physik* 24.

³⁴ Bothe et al.(1924).

³⁵ Paulis Worte klingen hart, als er an Kramers schrieb (27. Juli 1925): „Ich halte es überhaupt für ein ungeheures Glück, daß die Auffassung von Bohr, Kramers und Slater durch die schönen Experimente von Geiger und Bothe sowie die kürzlich erschienenen von Compton so schnell widerlegt worden sind.“ (Brief vom 27. Juli 1925, *Reprint* in: Hermann et al.(1979), 233) ‘Hermann et al.(1979)’ wird im folgenden als ‘*PauliWB*’ bezeichnet.

³⁶ Compton et al.(1925b).

Hermann/ Meyenn/ Weisskopf (1979) beschreiben die Problemsituation zu Beginn des BKS Projekts wie folgt:

Die Schwierigkeiten in der Strahlungstheorie wurde in aller Deutlichkeit sichtbar, als man versuchte, die Erhaltung von Energie und Impuls mit der Bohrschen Frequenzbedingung in Einklang zu bringen. (144)

Diese Schwierigkeiten waren nicht neu. Sie waren bereits vorhanden, als Bohr 1913 sein Atommodell vorstellte und damit die Spektrallinien zu erklären versuchte. Bereits hier war es problematisch, mechanisch zu erklären, wie ein Übergang zwischen stationären Zuständen, also ein Quantensprung des Elektrons, vor sich geht. In Abs. 1.1. wurden bereits die Schwierigkeiten diskutiert, die Quantensprünge mit dem Schema der klassischen Mechanik und Elektrodynamik zu erklären. In dieser Problemsituation tauchte ein junger amerikanischer Physiker J.C. Slater mit einem Vorschlag auf, der einen Ausweg aus dieser Situation verhiess. Slater nahm an, daß die Atome in einem angeregten Energiezustand, d.h. in einem stationären Zustand mit $n \geq 2$, *ständig* Wellen aller Frequenz abstrahlen, die die Bohrsche Frequenzbedingung erlaubt, ohne jedoch damit Energie zu transportieren³⁷. Slater bezeichnete diese Welle bzw. dieses Strahlungsfeld als „virtuell“ in dem Sinne, daß damit keine Energie transportiert wird. Diese Idee Slaters zog sofort das Interesse von Bohr und Kramers in Kopenhagen auf sich. Sie sahen in Slaters Idee die Möglichkeit, die Quantentheorie und die Wellentheorie des Lichtes in Einklang zu bringen, und so zu einer dem Korrespondenzprinzip entsprechenden Strahlungstheorie zu gelangen. Der Aufsatz von BKS entstand dann sehr schnell. Slater kam 1923 kurz vor Weihnachten in Kopenhagen an, und der Aufsatz wurde bereits im Laufe des Januars 1924 fertiggestellt.

Der Gedanke der Strahlungstheorie von Bohr, Kramers und Slater läßt sich in vier Punkten zusammenfassen:

- (1) Das Atom wird als ein ‘virtueller’ Oszillator angesehen.
- (2) Wenn sich das Atom in einem stationären Zustand mit $n \geq 2$ befindet, dann emittiert es *ständig* virtuelle, sphärische Wellen mit Frequenzen $\nu = \Delta E/h$, wobei ΔE die unterschiedlichen Energieabstände zwischen E_1 , d.h. die Energie im untersten stationären Zustand, und E_n mit $n \geq 2$ sind.
- (3) Diese Welle und andere solcher sphärischen Wellen der Nachbaratomen bilden ein elektromagnetisches Feld, das die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs des Energiezustands bestimmt.
- (4) Das Strahlungsfeld ist jedoch bloß *virtuell*, das heißt, durch dieses wird keine Energie übertragen.

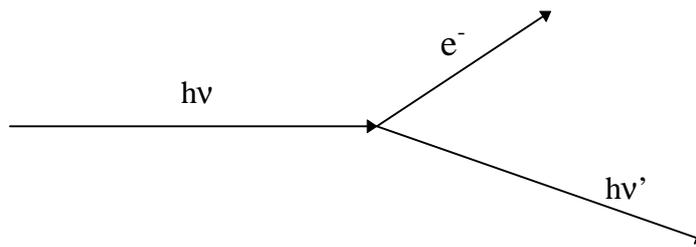
³⁷ Vgl. *PauliWB*, 144f.

Eine problematische Folge der BKS Theorie war, daß ihre Beschreibung des Quantensprungs das Energieerhaltungsprinzip verletzt und damit auch das Kausalprinzip³⁸. Der Quantensprung finde nämlich ohne Energieübertragung statt, das heiße, er sei eine Wirkung ohne zugehörige Ursache. Aber die Virtualität des Feldes oder der Welle in (2) sei ein wesentliches und unerläßliches Element in der BKS Theorie. Wenn die Emission der Welle nicht 'virtuell' ist sondern durch sie in der Tat eine Energieübertragung stattfindet, dann würde ein einzelnes Atom ständig an Energie verlieren. Ohne den Energieerhaltungssatz zu verletzen könnte es dann nicht stabil bleiben. BKS betonen, daß sie auf die Energieerhaltung als einen Kernsatz der physikalischen Wissenschaften nicht einfach verzichten wollen, sondern ihn weiterhin als gültig ansehen, jedoch nur statistisch.

Die BKS Theorie befindet sich damit in einer direkten Konfrontation gegenüber der Einsteinschen Theorie. Nach Einstein (1917) soll die Energieübertragung unter den Atomen einen Energieübergang im Atom hervorrufen. Das heißt, der Austausch der Energie in Form von Photonen ist die direkte Ursache der Übertragung. Dieser Streitpunkt zwischen Bohr, Kramers und Slater einerseits und den Physikern andererseits, die die Einsteinsche Vorstellung favorisierten und gegen die BKS Theorie Stellung nahmen, war empirisch zu überprüfen. In der BKS Theorie ereignet sich der Quantensprung, oder der Übergang von einem zu einem anderen Energiezustand, nicht spontan, sondern wird von dem virtuellen Feld angeregt, das aufgrund der virtuellen Oszillationen von den Atomen zustande kommt. Diese Anregung läßt sich jedoch nicht als eine direkte kausale Wirkung bezeichnen. Das virtuelle Feld bestimmt lediglich die Wahrscheinlichkeit des Übergangs. Folglich gibt es auch keine Zeitkorrelation zwischen den verschiedenen Übergängen der benachbarten Atome. Wenn nämlich in einem isolierten System zugleich in mehreren Atomen der Übergang von E_2 zu E_1 ($E_2 > E_1$) stattfinden würde, was nach der Bohrschen Atomtheorie bedeutet, daß diese Atome die Energie in Form von Photonen emittieren müssen, kann man nicht erwarten, daß die mit einem Energieverlust einhergehenden korrelierten Quantensprünge von einem niedrigen zu einem höheren Zustand in einer starken Zeitkorrelation zu beobachten sind. An diesem Punkt greift das Experiment sowohl von Bothe und Geiger (1924) als auch Compton und Simon (1925) an, mit dem sie die BKS Theorie überprüfen wollen. Bothe und Geiger (1925) ist es gelungen, eine scharfe zeitliche Korrelation festzustellen, die in der BKS Theorie aufgrund von (4) ausgeschlossen wurde.

In Bothe und Geiger (1924) wird zu Beginn der experimentellen Prüfung der BKS Theorie eine einfache Darstellung des Comptoneffekts gegeben.

³⁸ Die Frage der Geltung der Energieerhaltung und der Kausalität auf der atomaren Ebene stellte sich bei Bohr schon seit 1922 (Vgl. Bohr (1923b)). Deswegen war die genannte *problematische* Implikation der BKS Theorie für Bohr selbst kein Problem, das beseitigt werden mußte, sondern sie war möglicherweise das neue Fundament für die physikalische Theorie auf dieser Ebene.



Sie stellen sich die Frage, ob zwischen der Bewegung des gestoßenen Elektrons e^- und der Strahlung $h\nu'$ Gleichzeitigkeit bzw. eine scharfe Zeitkorrelation festzustellen ist.

Bringt man in den Weg von $h\nu'$ und e je eine quantitativ arbeitende Zählvorrichtung, so müssen beide stets gleichzeitig ansprechen. Nach den neuesten Anschauungen von Bohr, Kramers und Slater könnte ein solcher zeitlicher Zusammenhang nicht bestehen. (Bothe/Geiger (1924), 44)

Dieser Weg zu einer experimentellen Widerlegung der BKS Theorie erwies sich als erfolgreich, wie Bothe und Geiger (1925) berichteten.

Es gibt noch einen weiteren Hintergrund des Streits zwischen BKS Theorie und ihren Gegnern. Dies ist die ablehnende Haltung Bohrs gegenüber der Idee des Photons und damit gegenüber der korpuskularen Theorie des Lichts.³⁹ In der Einleitung ihres Aufsatzes schildern Bohr, Kramers und Slater das Problem der Wechselwirkungsmechanismen zwischen der Materie und Strahlung, und dem damaligen Stand der Diskussion über dieses Thema. Bemerkenswerterweise beschreiben sie die Wellentheorie des Lichts und die Einsteinsche Theorie der Lichtquanten als miteinander konkurrierende Gegensätze:

Although the great heuristic value of this hypothesis [of light-quanta] is shown by the confirmation of Einstein's predictions concerning the photoelectric phenomenon, still the theory of light-quanta can obviously not be considered as a satisfactory solution of the problem of light propagation. (Bohr et al.(1924), 161)

Was war es, das Bohr an der Lichtquantentheorie nicht gefiel?⁴⁰ Bohrs Problem bestand darin, daß er damals die Photonentheorie und die Wellentheorie des Lichtes als zwei nicht

³⁹ Interessanterweise beleuchtete Bohr bis 1925, wo die BKS Idee widerlegt wurde, und auch noch später, bis er zu seiner Idee der Komplementarität kam, das Lichtphänomen ausschließlich von dem Wellenaspekt her, und wollte den korpuskularen Charakter des Lichts nicht berücksichtigen. In *PauliWB* wird Bohr als ein 'entschiedener Anhänger der Wellentheorie des Lichtes' (144) beschrieben. In der Tat bezeichnete Bohr auch sich selbst als einen Mann 'for whom the wave theory is a creed'. (Brief an Rutherford, 9. Jan. 1924, Reprint in: *NBCW* 5, [487])

⁴⁰ Eigentlich wurde in der Idee des virtuellen Oszillators von Slater, die das BKS Projekt in Gang gebracht hatte, die Idee des Photons nicht ausgeschlossen. Erst in Kopenhagen überzeugten Bohr und Kramers Slater von der Meinung, auf dieses Konzept zu verzichten. In einem Brief an seine Eltern schrieb Slater am

miteinander harmonisierbare Gegensätze ansah. In einem Brief Bohrs an Rutherford kommt dies noch zum Ausdruck, wenn er über Compton schreibt:

[He] takes views simply horrifying for a man who spend[s] his life in studying the most refined interference phenomena and for whom the wave theory is a creed. (Brief vom 9. Jan. 1924, *Reprint* in: *NBCW* 5, [487])

Ein Hauptproblem für Bohr war es, den Mechanismus der Quantensprünge zwischen den stationären Zuständen zu beschreiben. Für dieses Problem wäre seiner Ansicht nach mit der Theorie des Photons keine zufriedenstellende Erklärung zu erreichen gewesen⁴¹. In diesem Zusammenhang spielten auch die Bohrschen Bemühungen eine wichtige Rolle, aus seiner Atomtheorie eine in sich geschlossene Theorie zu machen, die über die Zusammenkopplung von Atomstruktur mit den Frequenzen der Spektrallinien hinaus weiter auch die Erklärung für Intensität und Polarisation dieser Linien liefern könnte. Wie im letzten Abschnitt erläutert, bestand das Bohrsche Programm in der Verknüpfung der Übergänge zwischen den stationären Zuständen mit der Bewegung des Elektrons. Diese Verknüpfung wurde in seinem Programm mit Hilfe des 'Korrespondenzprinzips' systematisch etabliert⁴².

Ein weiterer Streitpunkt, der auch mit dem ersten verbunden ist, war die Frage, ob die Energie- bzw. Impulserhaltung auch im atomaren Phänomenbereich strenge Gültigkeit besitzt. In der BKS Theorie tritt der Erhaltungssatz der Energie nur statistisch sinnvoll auf, und zum Beispiel in der BKS'schen Deutung des Quantensprungs kann man offensichtlich nicht streng den Satz der Energieerhaltung anwenden. Im Gegensatz dazu spielen die Erhaltungssätze im Comptoneffekt eine so wesentliche Rolle, daß ihre Gültigkeit in keiner Weise abgeschwächt betrachtet werden darf.⁴³ Auch hier vertreten Bohr und Einstein hin-

18. Jan. 1924, „I have finally become convinced that the way they [Bohr und Kramers] want things, *without the little lumps* carried along on the waves, but *merely the waves* which carry them, is better.“ (Hervorhebungen von I.Ko)

⁴¹ Im Gegensatz dazu kam ihm die Slatersche Idee mit dem virtuellen Feld in dieser Hinsicht sehr attraktiv vor.

⁴² Das Korrespondenzprinzip '*postulates a general conjugation of each of the various possible transitions between stationary states with one of the harmonic oscillation components in which the electrical moment of the atom, considered as a function of the time*' (Bohr et al.(1924), 163).

⁴³ In den beiden Aufsätzen von Bothe und Geiger (1924/1925) wurde dieser Gegensatz klar sichtbar. „In ihrer neuen Theorie über das Wesen der Strahlung weichen Bohr, Kramers und Slater bei der Deutung des Comptoneffekts von der ursprünglichen Vorstellung von Compton und Debye ab, indem sie dem Energie- und Impulssatz nur statistische Gültigkeit zuerkennen.“(Bothe et al.(1925), 639)

„Ergibt sich [in dem konzipierten Experiment] mit Sicherheit eine Abhängigkeit zwischen den beiden Zählreihen, so dürfte sich eine statistische Auffassung des Energie- und Impulssatzes kaum aufrecht erhalten lassen.“ (Bothe et al.(1924), 44)

Zum Schluß schrieben Compton und Simon in dem Aufsatz Compton et al.(1925b); „These results do not appear to be reconcilable with the view of the statistical production of recoil and photo-electrons proposed

sichtlich der Strenge der Kausalität gegensätzliche Positionen. Einstein schrieb in einem Brief an Hedwig und Born:

Bohr's opinion about radiation is of great interest. But I should not want to be forced into abandoning *strict causality* without defending it more strongly than I have so far. (29. 4. 1924, *Reprint* in: *NBCW* 5, [26], Hervorhebung von I.Ko)

Ein zentraler Punkt in der Debatte um die BKS Theorie war die Gültigkeit der Kausalität im atomaren Phänomenbereich. Wenn man die Diskussionen nach der Bekanntgabe des Ergebnisses des Bothe-Geiger-Experiments betrachtet, wird deutlich, daß der Gegensatz zwischen den Verfechtern der BKS Theorie und ihren Gegnern hauptsächlich in folgenden Fragen bestand: Sind die Vorgänge in atomarer Ebene kausal gekoppelt oder nicht? Ist die Energie- bzw. Impulserhaltung streng oder nur statistisch gültig?

Die BKS Theorie wurde nach den Entscheidungsexperimenten recht schnell aufgegeben, obwohl es Unterschiede bei der Interpretation der experimentellen Ergebnisse gab.⁴⁴ Auf eine Weiterführung des BKS Projekts wurde nach 1925 schließlich verzichtet. Was bedeutete das Scheitern des BKS Projekts für das Bohrsche Korrespondenzprinzip und den weiteren Werdegang der Quantentheorie (bzw. Quantenmechanik)?

BKS Projekt war der Höhepunkt in der heuristischen Anwendung des Korrespondenzprinzips in der Entwicklung der Quantentheorie. In dem BKS Paper wird mehrmals deutlich, daß das Korrespondenzprinzip dem zentralen Gedanken dieses Projekts zugrunde lag.⁴⁵ Die Autoren schrieben im Abstrakt dieses Aufsatzes, daß sie dort versuchen wollen, eine Strahlungstheorie vorzulegen, „[o]hne von dem klassischen Gesetz der Strahlungsförpflanzung abzuweichen“. Außerdem würden sie durch das Heranziehen virtueller Oszillatoren mit Hilfe des Korrespondenzprinzips Zuordnungen in dem Problembereich bekommen.

Die Beziehung zwischen dem BKS Aufsatz und dem Korrespondenzprinzip wäre in zwei Hinsichten zu betrachten. Erstens ergibt sich dadurch eine Verknüpfung von *Strahlung* mit der *Bewegung* innerhalb des Atoms. Das BKS Projekt ging von der Idee aus, daß die Strahlung der Linienspektren vom Standpunkt der inneratomaren Bewegung des Elek-

by Bohr, Kramers and Slater. They are, on the other hand, in direct support of the view that energy and momentum are conserved during the interaction between radiation and individual electrons.“ (299)

⁴⁴ In einem Brief an Bohr, vom 15. Jan. 1925, bringt Born einen Einwand gegenüber der Interpretation des Bothe-Geiger Experiments zur direkten Unterstützung der Idee des Lichtquantums vor. Siehe auch *NBCW* 5, [75]ff.

⁴⁵ „On the correspondence principle it seems nevertheless possible, as it will be attempted to show in this paper, to arrive at a consistent description of optical phenomena by connecting the discontinuous effects occurring in atoms with the continuous radiation field in a somewhat different manner from what is usually done.“(159) Siehe auch S.163, 164, 165, 168, 170, wo das Korrespondenzprinzip als Leitprinzip dieser Theorie ausdrücklich erwähnt wird.

trons zu verstehen wäre. Hierbei wird das Atom als ein Oszillator verstanden. Dies entspricht genau dem, was die klassische Strahlungstheorie, aufgrund der klassischen Elektrodynamik und Mechanik, über die Spektroskopie besagt. Wegen der Elektronenbewegung auf der kreisförmigen [bzw. elliptischen] Bahn ist die innere Bewegung eines Atoms als eine Oszillation [oder als die Summe von verschiedenen Oszillationen] zu deuten. Wenn ein Atom eine Strahlung emittieren sollte, dann wird dessen Schwingungszahl nicht anders als die [oder eine von den] Schwingungszahl[en] jenes Atom-Oszillators [oder jener Oszillatoren] sein. Bohr ließ sich von dieser Idee auch in seinem revolutionären Atommodell 1913 grundsätzlich nicht abbringen, sondern integrierte sie mit Hilfe des Korrespondenzprinzips in seine Atomtheorie.

Über die Verbindung der BKS Theorie mit dem Korrespondenzprinzip schreibt Born in seinem Artikel „Über Quantenmechanik“⁴⁶:

Die Fruchtbarkeit dieser [BKS] Ideen hat sich auch darin gezeigt, daß es Kramers gelungen ist, eine Dispersionsformel aufzustellen und zu begründen, die allen *Anforderungen der Quantentheorie, vor allem dem Korrespondenzprinzip*, genügt. (379, Hervorhebung von I.Ko)

Und weiter:

Unser Versuch einer Quantenmechanik der Kopplung scheint viele Züge an sich zu tragen, die man für eine Darstellung der Atomeigenschaften braucht: Stabilität, Resonanz für die Sprungfrequenzen, *Erfüllung des Korrespondenzprinzips* usw. (381, Hervorhebung von I.Ko)

In diesen Zitaten wird das Korrespondenzprinzip als eine Anforderung an die Quantentheorie dargestellt. Korrespondenz heißt in diesem Sinne nicht bloß eine Relation, die von Bohr entdeckt wurde, sondern ist darüber hinaus eine Bedingung, die von einer Theorie erfüllt werden *soll*. Aus dieser Perspektive ist die BKS Theorie eine erfolgreiche Theorie, die die Bedingung des Korrespondenzprinzips erfüllt. Daß die BKS so schnell und unwiderruflich einen Gegenschlag bekam und sich so als Irrtum erwies, bedeutete auch für das Korrespondenzprinzip an sich einen harten Schlag. Logisch betrachtet, bedeutet das Versagen des BKS Projekts nicht notwendigerweise einen schwerwiegenden Schaden für das Korrespondenzprinzip. Die heuristischen Prinzipien, die zu einer Theorie geführt haben, können das Zugrundegehen dieser Theorie überleben. Jedoch hieß das Versagen des BKS Projekts damals praktisch so viel wie das Versagen eines vom Geist des Korrespondenzprinzips durchgeführten Projektes.

⁴⁶ Born (1924).

In diesem Zusammenhang ist die Reaktion Paulis auf diese Geschichte um die BKS Theorie interessant. Wolfgang Pauli, der eigentlich zu einem der treuen Befürworter des Kopenhagener Lagers zu zählen ist, nahm gegenüber der Idee von Bohr, Kramers und Slater 1924 von Anfang an eine deutlich kritische Position ein.⁴⁷ In einem Brief an Sommerfeld schrieb er den folgenden Satz, in dem seine Stellung gegenüber der BKS Theorie zum Ausdruck kommt:

Ihr „freimütiges ‘non liquet’“ ist mir tausend Mal lieber als die zurecht konstruierte, künstliche Scheinlösung des Problems von Bohr, Kramers und Slater (*selbst wenn der Versuch von Geiger und Bothe im Sinne dieser Theorie ausfallen sollte*).⁴⁸ (Brief vom 6. Dez. 1924, *Reprint in: PauliWB*, 183f, Hervorhebung von I.Ko)

Nachdem die Ergebnisse des Bothe-Geiger-Experiments zu Ungunsten der BKS Theorie ausfielen, schrieb Pauli an Kramers in bewegten Worten:

Ich halte es überhaupt für ein ungeheures Glück, daß die Auffassung von Bohr, Kramers und Slater durch die schönen Experimente von Geiger und Bothe sowie die kürzlich erschienenen von Compton so schnell widerlegt worden sind. Es ist zwar natürlich richtig, daß Bohr selbst, auch wenn diese Experimente nicht gemacht worden wären, nicht mehr an dieser Auffassung festgehalten hätte. Aber viele ausgezeichnete Physiker (wie z.B. Ladenburg, Mie, Born) hätten daran festgehalten, und *diese unglückselige Abhandlung von Bohr, Kramers und Slater wäre vielleicht für lange ein Hemmnis des Fortschrittes der theoretischen Physik geworden!* (Brief vom 27. Juli 1925, *Reprint in: PauliWB*, 233, Hervorhebung von I.Ko)

Wenn Pauli sogar unabhängig von dem Ausgang von Bothe-Geigers Experiment gegen die BKS Theorie Stellung bezog, stellt sich die Frage, *worin* die Ablehnung Paulis begründet liegt. In diesem Zusammenhang ist ein Brief von Pauli von Interesse:

Daß das Korrespondenzprinzip nicht nur auf mehrfach periodische Systeme begrenzt ist, sondern auch für alle Atome in irgend einer Form Geltung besitzen wird, ist ja nicht zu bezweifeln. Wir dürfen uns aber nicht darüber hinwegtäu-

⁴⁷ „Wir haben damals über so manche physikalischen Fragen viel diskutiert und insbesondere über die in der Arbeit von Ihnen, Kramers und Slater dargestellte Auffassung der Strahlungserscheinungen. Es ist Ihnen damals gelungen, mein wissenschaftliches Gewissen, das sich gegen diese Auffassung stark auflehnte, durch Ihre Argumente zum Schweigen zu bringen. Dies war aber nur kurze Zeit der Fall und, wie Kramers Ihnen schon berichtet haben wird, stehe ich heute dieser Auffassung der Strahlungserscheinungen als Physiker vollkommen ablehnend gegenüber.“ (Paulis Brief an Bohr, 2. Okt. 1924, *Reprint in: PauliWB*, 163)

⁴⁸ Man kann hier merken, daß die Ergebnisse des Geiger-Bothe Experiments zum Zeitpunkt des Briefschreibens noch nicht bekannt waren.

schen, daß wir für Nicht-Periodizitätssysteme eine genaue Formulierung dieses Prinzips noch nicht besitzen, daß vielmehr eine solche Formulierung erst *zu suchen* ist. Wir müssen deshalb mit Schlüssen aus dem Korrespondenzprinzip bei Atomen mit mehr als einem Elektron mit einer gewissen Vorsicht verfahren. (Paulis Brief an Bohr, vom 12. Dez. 1924, *Reprint* in: *PauliWB*, 188, Hervorhebung von Pauli)

Pauli stellte offenbar nicht das Korrespondenzprinzip an sich in Frage, spricht jedoch mit „Vorsicht mit dem Korrespondenzprinzip!“ eine deutliche Warnung aus, das Korrespondenzprinzip nicht in beliebig erweitertem Umfang einzusetzen. Man sei noch nicht im Besitz der genauen Formulierung des Korrespondenzprinzips für nicht periodische Systeme. Das Korrespondenzprinzip besäße zwar in der Atomtheorie „in irgend einer Form“ Geltung, jedoch würde nicht in jeder Situation sofort klar, wie dieser Geltungsanspruch geltend gemacht werden könne. Die Verbindung von Bewegung und Strahlung, auf der das Korrespondenzprinzip bis 1924 eigentlich basierte, war theoretisch betrachtet kein notwendiger Zug. Sie stützte sich auf eine Relation, die sich nur näherungsweise auf einem Grenzgebiet ergab.

Bohr entgegnet Paulis Kritik über die Erweiterung des Korrespondenzprinzips in der BKS Theorie in einem Brief an ihn:

Vielleicht sollte ich auch ein schlechtes Gewissen im Hinblick auf die Strahlungsprobleme haben; aber *wenn es auch von einem logischen Standpunkt aus vielleicht ein Verbrechen ist*, muß ich gestehen, daß ich nichtsdestoweniger davon überzeugt bin, *daß der Schwindel des Vermischens der klassischen Theorie und der Quantentheorie sich noch auf viele Weisen beim Aufspüren der Geheimnisse der Natur als fruchtbar erweisen wird*. (11. Dez. 1924, *Reprint* in: *PauliBW* [73], Hervorhebungen von I.Ko)

Bohr sah das BKS Projekt als ein Paradebeispiel für die heuristische Anwendung des Korrespondenzprinzips an. Das BKS Projekt war eine hochentwickelte Form, die vom Standpunkt der heutigen Quantenmechanik nicht notwendig erscheint sondern eher als eine irreführende Verknüpfung zwischen Elektronenbewegung und spektraler Strahlung anzusehen ist. Dennoch war für Bohr und die Physiker in den Jahren 1913-1923 eine solche Verknüpfung in praktischer Hinsicht unverzichtbar. Die klassische Theorie der Mechanik und Elektrodynamik war zu diesem Zeitraum immer noch die einzige systematisch aufgebaute Theorie in der Physik, an die sie anknüpfen konnten.

Die Zeit war offenbar reif für eine Wende, und Heisenberg schaffte mit seinen Beiträgen zu Atomtheorie den entscheidenden Schub in die Quantenmechanik.⁴⁹ Das Jahr 1925 hat eine große Bedeutung in der Geschichte der Quantenmechanik. Es wird als das Geburtsjahr der Quantenmechanik bezeichnet.⁵⁰ Die Bezeichnung Quantenmechanik als die Folgetheorie der Quantentheorie und auch als ein entgegengesetzter Begriff zur klassischen Mechanik⁵¹ tauchte erstmals in Heisenbergs Beitrag über die neue Quantenmechanik (Heisenberg (1925c)) auf.

Aus der Perspektive des Korrespondenzprinzips ist es interessant, daß um 1925 letztlich auf den Bahnbegriff verzichtet wurde. Der Wegfall des Bahnbegriffs hatte für das Korrespondenzprinzip gravierende Auswirkungen, insbesondere für dieses Prinzip in der Darstellung Bohrs aus dem Jahr 1920. Es verlor nämlich seine ursprüngliche Grundlage, denn es stützte sich in Bohr (1920) auf die Übereinstimmung von quantentheoretischer Schwingungszahl ν und klassisch berechneter Schwingungszahl ω , und dadurch auch auf die Idee der Elektronenbahn im Atom.⁵² Noch deutlicher wird der Bedeutungsverlust für das Korrespondenzprinzip, wenn man noch berücksichtigt, daß ein Leitsatz Bohrs in dieser frühen Phase die ‘Verknüpfung der (spektralen) Strahlung mit der (Elektronen-) Bewegung’ war. Dabei wurde letztere als eine Bewegung auf einer Ellipsenbahn verstanden. Dieser Bedeutungsverlust war jedoch nicht zugleich das Ende des Korrespondenzprinzips. Dessen Geschichte setzt sich als die eines heuristischen Werkzeugs fort.

1.3. Die Geschichte danach

1.3.1. Korrespondenzprinzip nach dem BKS Projekt

Das Versagen des BKS Projekts, in dem man eine mögliche Erweiterung der Anwendung des Korrespondenzprinzips verfolgte, bedeutete jedoch nicht zugleich das Ende des Korrespondenzprinzips an sich. Denn die BKS Theorie ist keine *unvermeidbare* Schlußfolgerung aus dem Korrespondenzprinzip, sondern nur eine *mögliche* Anwendung von diesem. Diese Differenzierung nimmt auch Pauli vor, der sich in seinem Kommentar zwar gegen die BKS Theorie jedoch nicht gegen das Korrespondenzprinzip wendet. De facto ging jedoch mit

⁴⁹ Heisenberg war jedoch nicht der einzige Akteur, der diesen Phasenwechsel vollzog, leistete jedoch einen entscheidenden Beitrag dazu. Vgl. Dirac (1926b).

⁵⁰ Obwohl der Ausdruck ‘Quantenmechanik’ schon in Born (1924) benutzt wurde.

⁵¹ Das heißt, nicht als eine Erweiterung der klassischen Theorie.

⁵² Die Schwingungszahl ω wird aufgrund des klassischen Bildes der Kreis- bzw. Ellipsenbahn der Elektronenbewegung berechnet und verliert ohne den Bahnbegriff ihre eigentliche Bedeutung.

der Geiger-Bothes Widerlegung und dem Scheitern des BKS Projektes der Höhepunkt eines aktiven Einsatzes des Bohrschen Korrespondenzprinzips zu Ende. Dennoch blieb das Korrespondenzprinzip ein weiterhin allgemein akzeptiertes Prinzip, das auch im weiteren Werdgang der Quantenmechanik berücksichtigt wurde.

In dem wichtigen Aufsatz von Born, Heisenberg, und Jordan (1926) über die Quantenmechanik schreiben sie:

Der Fall der zeitlich veränderlichen äußeren Kräfte scheint uns deshalb ein bemerkenswertes Beispiel für den korrespondenzmäßigen Übergang der quantentheoretischen Kinematik in die klassische. (570)

Hier wird die Korrespondenz interessanterweise als ein Übergangsprinzip zwischen zwei (schon konstruierten) kinematischen Theorien verwendet. Insbesondere ist vom Übergang *der quantentheoretischen zur klassischen* Kinematik die Rede. Auch in einem anderen für die innerhalb der Geschichte der Quantenmechanik bedeutsamen Aufsatz, Dirac (1926), spielt das Korrespondenzprinzip eine Rolle:

In a recent paper⁵³ Heisenberg puts forward a new theory which suggests that it is not the equations of classical mechanics that are in any way at fault, but that the mathematical operations by which physical results are deduced from them require modification. *All* the information supplied by the classical theory can thus be made use of in the new theory. (*Reprint* in: van der Waerden (1967), 307, Hervorhebung im Original)

Die Korrespondenz, die hinter diesem *'make use of'* der klassischen Theorie liegt, beruhe aber gerade nicht auf der asymptotischen Übereinstimmung im Grenzbereich, also für die Bedingung $h \rightarrow 0$:

The correspondence between the quantum and classical theories lies not so much in the limiting agreement when $h \rightarrow 0$ as in the fact that the mathematical operations on the two theories obey in many cases the same laws. (*op.cit.*, 315, italics im Original)

In den Veröffentlichungen nach 1925 ist in der Physik der Trend zu beobachten, daß das Korrespondenzprinzip nicht mehr so intensiv heuristisch angewendet wurde. Das Korrespondenzprinzip verlor also nach 1925 allmählich seinen Status als zentrales Leitprinzip im Aufbau der Quantenmechanik. Das Scheitern der BKS Theorie war jedoch nicht der eigentliche Ansatz für das Schwinden der Bedeutung des Korrespondenzprinzips. Um dies zu erklären ist vielmehr eine Analyse der Entwicklung des Korrespondenzprinzips im Kontext

⁵³ Heisenberg (1925c).

der Entwicklung der Quantenmechanik vorzunehmen. Nachdem die neue Theorie als Quantenmechanik (1925-1926) ein solides Zwischenergebnis erreicht hatte, war die Aufgabe des Korrespondenzprinzips als Heuristik im wesentlichen erfüllt. So war die Phase der aktiven Heuristik um 1925 zum wesentlichen Teil vorbei. Teller (1991) faßt die Geschichte des Hochgehens und des Untergangs vom Korrespondenzprinzip wie folgt zusammen:

People developed Bohr's ideas. They had the correspondence principle and data. The data, the spectra of atoms and molecules, the laws of chemistry, constituted an overwhelming body of material. The correspondence principle seemed dreadful, it was shaky and ill-defined. When, after a dozen years, a consistent mathematical solution was found, most people turned their backs on the correspondence principle. (141f)

Mit der weiteren Entwicklung der Quantenmechanik verlor das Korrespondenzprinzip immer mehr seine Bedeutung als Heuristik. Es konnte jedoch nicht endgültig hinter die Bühne verschwinden, solange die Quantenmechanik nicht die alte Theorie wirklich auf allen Punkten eliminierend ersetzen konnte. Solange solche globale Substitution noch nicht vollzogen worden ist, bleibt dem Korrespondenzprinzip immer noch die Möglichkeit, in den Zusammenhang zwischen klassischer und Quantenmechanik zu einer Anwendung zu kommen. Und tatsächlich erlebt man nach vielen Jahren ein Ereignis, in dem das Korrespondenzprinzip wieder die Physiker interessiert.

1.3.2. Quantenchaos - eine Rehabilitierung des Korrespondenzprinzips

Mit dem sogenannten 'Quantenchaos' gibt es eine Anwendung des Korrespondenzprinzips in der aktuellen Physik. Seit etwa Anfang der 70er Jahre begannen Physiker Interesse für Phänomene zu entwickeln, die unter dem Begriff 'Chaos' zusammengefaßt wurden. In der Astronomie war man sich schon seit den 30er Jahren solcher Phänomene bewußt.⁵⁴ Prosen (1994, L569) berichtet über ein „*rapidly developing field of quantum chaos*“, in dem bereits viele Fragen über die statistischen Eigenschaften des Quantensystems beantwortet seien, dessen klassisches Gegenstück chaotisch ist.⁵⁵

Was hat die Chaosforschung in heutiger Physik mit dem Korrespondenzprinzip zu tun? Es gibt mehrere Verbindungen zwischen dem Korrespondenzprinzip und der heutigen Chaosforschung. Zunächst zu erwähnen ist, daß die Phänomene eines chaotischen Systems prinzipiell nur im Rahmen der klassischen Physik beobachtet und erklärt werden können, wo

⁵⁴ Gutzwiller (1990), 2.

⁵⁵ Siehe auch Prosen/ Robnik (1994) und Chu/ José (1992), wo auch über die Errungenschaft der Quantenchaostheorie berichtet wird.

der klassische Bahnbegriff vorhanden ist. In der Quantenmechanik dagegen, in der die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation eine grundlegende Rolle spielt, verliert der Bahnbegriff seine physikalische Bedeutung. Die Geschichte des Quantenchaos fängt dort an, wo Physiker dies nicht hinnehmen wollen und meinen: „Dennoch muß aber das klassische Chaos in irgendeiner Weise in der Quantenmechanik seine Fingerabdrücke hinterlassen.“⁵⁶ So wurde die Suche nach „*quantum manifestations of classical chaos*“ (Chu/ José (1992), 153), oder „*the search in quantum systems for manifestations of chaos in the classical limit*“ (Bayfield (1991), 213) die Grundrichtung in der Quantenchaosforschung.

Nachdem das Verhalten chaotischer Systeme ein Forschungsgebiet der Physik bildete, haben sich die Leute für die Frage nach der Möglichkeit interessiert, daß Chaos, oder chaotischer Vorgang auch innerhalb der Quantenmechanik gefunden werden kann.⁵⁷ In diesem Sinne steht als eine Grundlagenfrage in der Quantenchaologie (*quantum chaology*): Wie ist das Chaos in der Quantenmechanik überhaupt zu *definieren*?

In fact, there is very little agreement about whether chaos in quantum mechanics even exists. In part this is because there is apparently no generally accepted *definition* of what chaos in quantum mechanics could be. (Batterman (1993a), 50, Hervorhebung von I.Ko)

Eine weitgehend akzeptierte notwendige Bedingung⁵⁸ für das chaotische Phänomen ist die große Empfindlichkeit des [Verlaufs eines] Systems gegenüber seinen Anfangsbedingungen⁵⁹. Eine solche hohe Empfindlichkeit bzw. Instabilität kommt von der Nichtlinearität in der Eigenschaft des Systems. So betrachtet, hat die Quantenmechanik zumindest zwei grundlegende Schwierigkeiten, chaotische Phänomene zu integrieren. Erstens ist eine minimale Variation in der Anfangsbedingung in der Quantenmechanik begrenzt, und zwar durch die Unbestimmtheitsrelation. Wie man in dem Verzicht auf den Bahnbegriff nach 1925 sieht, macht ein quantenmechanischer Zustand mit bestimmtem Ort und Impuls keinen Sinn.

Der quantenmechanische Phasenraum hat also für einen physikalischen Zustand eines Systems nicht eine beliebig feine Skala, sondern eine, mit einer Minimalfläche von $h/2\pi$. Man kann physikalisch nicht die zwei noch abstrakt voneinander zu nehmenden Punkte auf einem Fleck mit einer Fläche $h/2\pi$ im Phasenraum mit Orts (x)- und Impuls (p)-Achse von-

⁵⁶ Stöckmann (1993), 203.

⁵⁷ Batterman (1993a), 50.

⁵⁸ Ob es nur eine notwendige oder auch eine hinreichende Bedingung für das Chaos ist, ist noch zu debattieren.

⁵⁹ Die hohe Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen heißt wiederum die Instabilität des Systems. Meridith (1992) charakterisiert in diesem Sinne das Chaos als „instability with respect to initial conditions“. Siehe auch Batterman (1991), und Kellert (1993).

einander unterscheiden. Solche Unterscheidung ist physikalisch sinnlos. Da beliebig kleine Variationen in der Quantenmechanik nicht gestattet sind, hat das Chaos in diesem Bereich keinen Platz.

Zweitens ist die Integration des Chaos in die Quantenmechanik problematisch, weil der zeitliche Ablauf eines Quantensystems der zeitabhängigen Schrödinger-Gleichung folgt und die Lösungen dieser Gleichungen linear sind.⁶⁰ Die Linearität der Zustandsfunktion $\Psi(t)$, als eine Lösung der Schrödinger-Gleichung, schließt die Möglichkeit prinzipiell aus, daß $\Psi(t)$ in kurzer Zeit eine unberechenbare Entwicklung zeigt.

Es ist deswegen prinzipiell schwierig, eine plausible Definition von Chaos in der Quantenmechanik vorzulegen, weil für ein quantenmechanisches System nicht sinnvoll eine so hohe Empfindlichkeit erwartet werden kann. Es läßt sich die Möglichkeit eines quantenmechanischen Chaos von vornherein ausschließen, weil eine notwendige Bedingung nicht erfüllbar ist. Dazu schreibt Joseph Ford in seinem Aufsatz 'Quantum Chaos, Is There Any?' (1988):

[E]ither quantum mechanics is a true theory which can eventually be made to expose its deterministic randomness [i.e. chaos], or more likely, contemporary quantum mechanics is a flawed theory which can be modified to include chaos.
(132)

Entweder befinde sich die Quantenmechanik in solcher Lage, in der sie Quantenchaos darlegen kann, und zwar, obwohl die Physiker noch nicht den Weg von Quantenmechanik zum Chaos gefunden hätten, *oder*, wahrscheinlicher, ist die jetzige Quantenmechanik eine fehlerhafte Theorie, die geändert und verbessert werden kann. Diese Alternativen scheinen durch das Korrespondenzprinzip beeinflusst. Dabei wird das Korrespondenzprinzip als ein heuristisches Prinzip verstanden, nach dem die Quantenmechanik so aufgebaut werden muß, daß „in the limit classical mechanics should be recoverable from quantum mechanics“ (Batterman (1993a), 51).

Dieses Konzept läßt sich bei Mark Stone und Joseph Ford betrachten. Sie wollen das Chaos mittels inhärenter Unvorhersagbarkeit beziehungsweise Unberechenbarkeit charakterisieren. In ihrer Darstellung des Chaos kommt wegen der Instabilität, die als Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen gedeutet wird, noch die Unvorhersagbarkeit bzw. Unberechenbarkeit (*randomness*) hinzu, und dies bedeutet wiederum chaotischen Verlauf in der Dynamik. Batterman (1993a, 1993b) kritisiert dieses Konzept, weil die Unberechenbarkeit im Verhalten (*randomness in behavior*) oder die Unvorhersagbarkeit keine hinreichende sondern lediglich eine notwendige Bedingung bzw. eine Folge des Chaos seien.

⁶⁰ Die sogenannte nichtlineare Schrödinger Gleichung ist in den letzten Jahren zu einem Thema in der Physik geworden. Sie wird jedoch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Im Anschluß seiner Kritik versucht er, die Frage nach der Möglichkeit von Quantenchaos anders zu beantworten. Seine vier Basisthesen in Batterman (1991) stützen sich auf das Korrespondenzprinzip:

- (1) Die Tatsache, daß Chaos im klassischen System existiert, aber ohne direktes Analogon in der Quantenmechanik ist, bedeutet nicht, daß das Korrespondenzprinzip falsch ist.
- (2) Diese Tatsache impliziert auch nicht, daß die Quantenmechanik falsch, fehlerhaft, oder änderungsbedürftig ist.
- (3) Das Korrespondenzprinzip impliziert ein '*substantive claim*'.
- (4) Nach diesem '*substantive claim*' ist eine plausible Definition des Quantenchaos zu erhalten.

Die von Batterman vorgeschlagene Methodologie für die Quantenchaosforschung bietet einen interessanten Hinweis auf die Fortsetzung der Geschichte des Korrespondenzprinzips. Sein erstes Ziel im Quantenchaosproblem ist, erst einmal eine brauchbare Definition des Quantenchaos zu geben. Dies läßt sich jedoch nicht durch eine direkte Analogie zum klassischen Chaos erzielen. In Batterman (1993a) verwendet er die sogenannte semiklassische Mechanik, die im Grenzbereich für $\hbar \rightarrow 0$ gültig ist.

Um einige Implikationen dieser Problemsituation näher zu erörtern, soll erst einmal angenommen werden, daß sich das sogenannte Quantenchaos in der Physik doch letztendlich als unbegründet erweisen würde, während die Chaosforschung auf dem Bereich der klassischen Physik als durchführbar und interessant erscheint. Dies würde zu einem Urteil führen, daß die Quantenmechanik in diesem Punkt versagt, den Bereich der klassischen Mechanik abzudecken. Interessanterweise läßt sich eine solche Situation nicht nach dem Schema des 'Kuhn-Verlusts' beschreiben. Denn nach diesem Schema soll der Kuhn-Verlust ein Teil der Errungenschaften der alten Theorie sein, der durch den Theoriewechsel weggefallen und verloren gegangen ist, und in der neuen Theorie als ein Scheinproblem bzw. als eine Scheinerklärung, oder für das Gebiet als irrelevant angesehen werden und damit schnell in Vergessenheit geraten ist. Dieses Schema trifft hier erstens deshalb nicht zu, weil das 'klassische Chaos' erst nach der Entwicklung der Quantenmechanik zu einem Thema in der Physik wurde.⁶¹ Dies geschah auch unabhängig von der Quantenmechanik, und damit nicht als ein Grenzfall der quantenmechanischen Phänomene.⁶² Zweitens ist auch zu beachten, daß dieses Problem des Quantenchaos nicht als ein Scheinproblem verworfen und in Ver-

⁶¹ Obwohl man Ernst F.F. Chladni zu Anfang des 19. Jahrhunderts und Poincaré gegen Ende desselben Jahrhunderts als wichtige Figuren in der Geschichte der Chaosforschung bezeichnet, findet sich die erste theoretische Behandlung solcher Phänomene im Bereich der Physik bei Martin Gutzwiller in den 1970er Jahren.

⁶² Diese Unabhängigkeit wird auch bei Holland (1996) betont.

gessenheit geraten, sondern erneuert ein aktuelles Thema auf dem Gebiet geworden ist. Aber dies spricht nicht *gegen* die These von Kuhn-Verlust. Vielmehr liegt folgende Deutung nahe, daß sich klassische Mechanik und Quantenmechanik zueinander nicht wie ein vergangenes und ein diesem nachfolgendes Paradigma verhalten.

In der Battermanschen Bemühung um die Definition des Quantenchaos kommt der Idee des Korrespondenzprinzips eine Schlüsselrolle zu. Bei ihm wird interessanterweise die Korrespondenzrelation nicht entdeckt, sondern konstruiert. Auch wenn nicht klar vorgegeben ist, wie man eine solche Korrespondenzrelation aufbauen soll, ist die Quantenchaosforschung ein aktuelles Gebiet der Physik, in dem das Korrespondenzprinzip als ein Leitprinzip fungiert.⁶³ Eine andere Frage ist, ob, oder wie weit, ein vom Korrespondenzprinzip geleiteter Versuch des Theorieaufbaus Erfolg haben würde. Durch das Korrespondenzprinzip wird gefordert, *daß* die Quantentheorie unter geeigneten Grenzbedingungen mit der klassischen Physik annähernd übereinstimmen soll. *Wie* diese Übereinstimmung erzielt wird und insbesondere *wo* sie genau stattfinden soll, wird jedoch nicht festgelegt. Genau dieses Problem wurde auch beim Konflikt zwischen Pauli und Heisenberg bezüglich der Frage deutlich, an welcher Stelle der klassischen Theorie die neue Theorie im Sinne des Bohrschen Korrespondenzprinzips verankert werden soll. Im nächsten Kapitel wird dieses Problem weiter diskutiert werden, wenn unterschiedliche Möglichkeiten der Relata der Korrespondenzrelation betrachtet werden.

Auch Martens (1992) macht deutlich, daß die sogenannte Quantenchaologie ein aktuelles Forschungsgebiet in der heutigen Physik ist, bei dem das Korrespondenzprinzip eine grundlegende Rolle spielt:⁶⁴

A qualitative study of *classical* dynamics and phase space structure thus can give useful information about the corresponding *quantum* dynamics and eigenstates of the system. (234-5, Hervorhebungen im Original)

Weiter schreibt er, daß solch ein qualitativer Zugang zur Quantenmechanik eines Systems mit nichtlinearer Dynamik „key ingredient in continuing work directed at *extending the correspondence principle to nonintegrable and chaotic system*“ sei. (235, Hervorhebung von I.Ko) In diesem Zusammenhang ist interessant, daß O'Connor (1992) und O'Connor et al.(1992) die Quantentheorie in der vor-quantenmechanischen Phase mit dem Bohrschen Korrespondenzprinzip als die ursprüngliche Form einer semiklassischen Physik bezeichnen.

Dank der 'chaotischen' Phänomene scheint die klassische Mechanik derzeit eine Renaissance zu erleben, wie Holland (1996) berichtet. Durch die aktuelle Debatte um das

⁶³ Persönliche Mitteilung von Prof. Stöckmann (Marburg/ Physik).

⁶⁴ Siehe Bayfield (1991), Wintgen/ Friedrich (1991), Chu/ José (1992), O'Connor (1992), O'Connor et al.(1992), Martens (1992), Meredith (1992), Stöckmann (1993), und Prosen/ Robnik (1994).

Quantenchaos wird der Zusammenhang von klassischer und quantenmechanischer Dynamik erneut auf den Tisch der aktuellen Forschungen gebracht. Damit tritt auch das Korrespondenzprinzip der vor-quantenmechanischen Phase der Quantentheorie wieder als ein Leitprinzip auf. Es ist interessant, daß hier nicht die Quantenmechanik sondern die klassische Dynamik mit Hilfe des Korrespondenzprinzips bestimmt, wie die Theorie entwickelt werden soll. Durch dieses Prinzip wird das klassische Chaos mit seinem quantenmechanischen Analogon durch den Begriff 'semiklassisch' verknüpft. Dieser Begriff der aktuellen Physik bedarf einer eigenen Untersuchung, die jedoch im Rahmen vorliegender Arbeit nicht geleistet werden kann. In einer solchen Arbeit müßte untersucht werden, in welcher Weise die semiklassische Physik halb klassisch und zugleich auch halb nichtklassisch, das heißt quantenmechanisch, ist. Durch solche Analyse könnte der Zusammenhang von klassischer Physik und Quantenmechanik besser beleuchtet werden.

Zur semiklassischen Physik möchte ich zuletzt darauf hinweisen, daß die frühe Quantentheorie als die früheste Form der semiklassischen Physik angesehen wird.⁶⁵ Auch auf das Chaosproblem kann die frühe Quantentheorie einen direkten Bezug bekommen, und zwar im folgenden Sinne: „The hydrogen atom in a uniform magnetic field is a prototype example for an atomic system whose classical dynamics show a transition from regular integrable to irregular chaotic motion. A question of special interest in current research is whether, and, if so, how, the corresponding quantum system undergoes a comparable transition. This is the subject of „Quantum Chaology“. (Wintgen/ Friedrich (1991), 267) Damit scheint der Anschluß des Korrespondenzprinzips an die heutige Quantenchaologie als eine Fortsetzung dessen Anwendung im Kontext der frühen Quantentheorie.

Durch die Chaosthematik ist deutlich geworden, daß die klassische Mechanik trotz ihrer begrenzten Gültigkeit keine vergangene Theorie, sondern immer noch ein aktuelles und innerhalb der Physik unverzichtbares Gebiet ist. Das selbständige Bestehen der klassischen Mechanik wird auch dadurch gerechtfertigt, daß diese Theorie das Thema (Quanten-) Chaos auf einem Niveau behandelt, das die Quantenmechanik noch längst nicht erreicht hat. O'Connor (1992) („[t]he recent resurgence of interest in classical mechanics“) und Holland (1996) („The chaotic phenomena of classical mechanics, which have led to a renaissance of that subject, ...“) berichten von der heute mit Bezug auf die physikalische Chaosforschung zu beobachtenden Renaissance der klassischen Mechanik, die auch eine Rehabilitierung des Korrespondenzprinzips impliziert.

⁶⁵ Siehe Wintgen/ Friedrich (1991), O'Connor (1992), und O'Connor et al.(1992).

1.4. Das Korrespondenzprinzip aus einem kritischen Rückblick gesehen

1.4.1. Entwicklung des Korrespondenzprinzips in Verbindung mit der Quantenmechanik

Die Frage, welche Rolle das Korrespondenzprinzip in der Entwicklung der Quantenmechanik gespielt hat, läßt sich nicht eindeutig beantworten. Es ist nicht der Fall, daß das Korrespondenzprinzip die ganze Geschichte der Entstehung und Entwicklung der Quantenmechanik hindurch nur eine Rolle spielte. Das Korrespondenzprinzip hat in den unterschiedlichen Phasen der Entwicklung der Quantenmechanik eine jeweils verschiedene Rolle. Dabei ergibt sich nicht nur für die Quantenmechanik eine Entwicklung unterschiedlicher aufeinanderfolgender Phasen, sondern ebenso für die Bedeutung des Korrespondenzprinzips. In diesem Abschnitt wird versucht, die Entwicklung des Korrespondenzprinzips in vier Phasen schematisiert darzustellen, und zwar in Verknüpfung zur Entwicklung der Quantenmechanik:

Phase 1: Die klassische Physik ist die einzig brauchbare Theorie. Es treten in ihr jedoch eine ganze Reihe unübersehbarer Schwierigkeiten auf, ohne daß eine neue systematische Theorie in Sicht ist.

That the dynamical equilibrium of the systems in the stationary states can be discussed by help of the ordinary mechanics, while the passing of the systems between different stationary states cannot be treated on that basis. (Bohr (1913), 7, Hervorhebung von I.Ko)

Bei der Entwicklung seines Atommodells 1913 war es Bohr klar, daß er in der Atomtheorie einen radikalen Sprung machen muß, um die Stabilität des Atoms und die Phänomene der Spektrallinien erklären zu können. Wie jedoch dieser deutliche Bruch gegenüber der alten Theorie aussehen sollte, war nicht klar. Man war schon bereit, den alten Boden zu verlassen, jedoch nicht wissend, wohin zu springen. In dieser Situation dachte Bohr noch nicht an eine eigene Alternativtheorie zu den klassischen Theorien der Physik. Es ging ihm nicht um die Beseitigung der klassischen Elektrodynamik und einen Ersatz für diese, obwohl sie für eine Reihe Phänomene offenbar keine Erklärungskraft besaß. Es ging vielmehr um eine Erweiterung beziehungsweise eine Korrektur der herkömmlichen Theorie. Durch eine Zusatztheorie hoffte man, die neuen Probleme lösen zu können. Zu diesem Zeitpunkt war von einer Abschaffung oder Widerlegung der herkömmlichen Theorie noch nicht die Rede.

Denn diese war noch immer die zuverlässige physikalische Theorie, auf die man sich in meisten Fällen stützen konnte.

Doch wenn die herkömmliche Theorie offenbar einigen schwerwiegenden Anomalien begegnet, dann werden Forscher zu den auch von der herkömmlichen Theorie radikal abweichenden Vorschlägen ermutigt. Sie erwarten auch solche Arbeitshypothesen, die vom alten Standpunkt her möglicherweise als inakzeptabel erscheinen. Der Sinn einer solchen Hypothese ist, daß sie den neuen, von der früheren Theorie nicht abgedeckten Problembereich abdeckt. Dabei spielte die Frage, ob diese Hypothese auch für den alten Bereich aussagekräftig wäre, erst einmal keine Rolle. Zum Beispiel die Frage, welche Folgen die Bohrsche Quantenhypothese für den makroskopischen Phänomenbereich bringen würde, war in dieser Phase nicht interessant. So begann die Geschichte der Bohrschen Atomtheorie.⁶⁶

Das sich die neue Hypothese mit Hilfe der Korrespondenzrelation gut an die herkömmliche Theorie anschließt⁶⁷, war ein Pluspunkt für die Hypothese und auch eine Art von Rechtfertigung für die junge Quantentheorie. Der Pluspunkt für die neue (Zusatz-) Theorie wird noch deutlicher, wenn die herkömmliche Theorie für den Grenzbereich zwischen ihr und der neuen Theorie zwar nicht exakte jedoch näherungsweise brauchbare quantitative Aussagen liefert, und damit noch eine brauchbare Leistung gebracht hätte. Ein solches Anschließen an die alte Theorie wirkt beruhigend, wie in Abs. 1.1. bereits erwähnt, nach dem Schock und dem darauffolgenden Widerstand gegen die neue Hypothese. Diese erste Phase nähert sich ihrem Ende, wenn aus der Hypothese sich allmählich eine neue Theorie formt.

Phase 2: Heuristik, überwiegend (noch) stark hypothetisch

In dieser Phase wird klar erkannt, daß die herkömmliche Theorie für die neu aufgetretenen Phänomene bzw. Probleme keine ausreichende Erklärungskraft besitzt. Deswegen wird eine neue Theorie angestrebt, oder zumindest eine neue Teiltheorie für einen spezifischen Gegenstandsbereich. Hier wird die neue Theorie jedoch immer noch nicht als ein *globaler* Ersatz für die gesamte alte Theorie konzipiert, sondern zunächst nur für den problematisch gewordenen Bereich. Entsprechend wird diese Änderung nicht als ein Wechsel oder eine Substitution sondern als eine *Erweiterung* angesehen. Anders als in der ersten Phase, hat man jetzt eine Reihe von Grundhypothesen, die in dem problematischen Bereich wirksam zu

⁶⁶ „Ganz abgesehen von der prinzipiellen Frage, ob wir berechtigt sind, auf diesen [atomaren] Gebieten anschauliche Bilder zu verlangen, *so mußte die Atomtheorie ursprünglich einen hypothetischen Charakter haben.*“ (Bohr (1930), 1, Hervorhebung von I.Ko)

⁶⁷ Das bedeutet, daß die neue Hypothese auf dem Grenzgebiet quantitativ mit der herkömmlichen Theorie übereinstimmende Ergebnisse liefert, so daß die mathematischen Funktionen auf diesem Gebiet kontinuierlich sind.

sein versprechen, und möglicherweise mit Hilfe des Korrespondenzprinzips Anschluß an die bewährte alte Theorie bekommen und damit eine zusätzliche Stütze erhalten haben.

In dieser Phase wird probenhalber an vielen Stellen, insbesondere wo die neue Basis-hypothese nicht in direkten Gegensatz zur gängigen Vorgängertheorie steht, zunächst einmal mit einer [umgeschriebenen] Form der alten Theorie als Arbeitshypothese gearbeitet. In der Quantentheorie war es problematisch, die Elektronenbewegung im Atom zu beschreiben. Durch die Quantenhypothese wurde der Begriff der Transition eingeführt, nämlich des sogenannten Quantensprungs von einem zu einem anderen stationären Zustand. Jedoch wurde durch die Quantenhypothese keine neue Theorie darüber formuliert, unter welchen Bedingungen sich ein Elektron *in einem* stationären Zustand bewegt. In einer solchen Lage wäre es

a natural assumption, that it is possible in such cases to obtain a close approximation in the description of the motion in the stationary states, by retaining only the [Coulomb] forces. (Bohr (1918), 98f, Hervorhebung von I.Ko)

Dies bedeutet jedoch nicht, daß die Wissenschaftler zu träge wären, mit Innovationen aufzuwarten, oder immer nur minimale Neuheiten riskieren würden. Neben den ökonomischen Erwägungen in der Theoriendynamik spielt hier auch der Gedanke, daß es sich dabei um eine Erweiterung der Theorie handeln könnte, eine wichtige Rolle. In diesem Fall muß nämlich die neue (Teil-)Theorie an den Korpus der herkömmlichen Theorie anknüpfen können. Deshalb bemühte sich Bohr in (1920b) darum, eine *‘in sich zusammenhängende Theorie’* stationärer Zustände zu entwickeln, die auf der Annahme beruhte, daß die Bewegung in den stationären Zuständen durch Anwendung der klassischen Mechanik beschrieben werden könne.

In dieser zweiten Phase ermöglicht das Korrespondenzprinzip, die groben Lücken innerhalb der neuen Theorie zunächst probeweise auszufüllen. Zum Beispiel konnte man bei der Behandlung der Intensitäts- bzw. Polarisationsprobleme der Strahlung des Atoms weitgehend die klassische Strahlungstheorie anwenden, und zwar direkt oder in Analogie.

Phase 3: Heuristik und Kontrollmechanismus, die innere Konsistenz der neuen Theorie ist bereits vor Augen

Wenn die neue Theorie weitgehend ihre eigene Struktur erreicht hat, tritt die *innere* Konsistenz der neuen Theorie, und ihre eigene Vollständigkeit, langsam in den Vordergrund. In dieser Phase werden weiterhin Lücken nach dem Korrespondenzprinzip aufgefüllt, und auch Schlußfolgerungen aus der neuen Theorie weiter aus dem Gesichtspunkt des Korrespondenzprinzips überprüft. Nach Teller (1991) ist das Korrespondenzprinzip ein praktisches und zuverlässiges Kontrollinstrument:

[T]he mathematical principles involved in quantum mechanics are so complicated that you must work a year (or even years) to get a solution to a problem. Even then, you are not sure whether the answer is correct. You can use the correspondence principle as a check. (142)

Während das Korrespondenzprinzip in allen bisherigen drei Phasen als Heuristik und Kontrollmechanismus verwendet wird, ist für diese dritte Phase das Neue, daß sich jetzt eine neue selbständige Theorie abzeichnet. Am Beispiel der Quantenchaosforschung läßt sich erkennen, daß das Korrespondenzprinzip auch in der weit entwickelten Quantenmechanik noch immer die heuristische Funktion zum Auffüllen noch vorhandener Lücken übernimmt. Dabei helfen der neuen Theorie die beiden Aspekte des Korrespondenzprinzips als die Hypothese produzierende Heuristik und als der Kontrollmechanismus wechselseitig zusammen, um eine immer neuere höhere Stufe der Vollständigkeit zu erreichen.⁶⁸

Noch bis zur zweiten Phase war die neue Theorie nicht eigenständig und gewissermaßen auf den Stamm der alten Theorien aufgepfropft. Nachdem eine neue Theorie mit innerer Konsistenz entstanden ist, die nun auch als eine in sich geschlossene Theorie ihre Vorteile gegenüber der alten Theorie beweisen kann, endet die heuristische Funktion des Korrespondenzprinzips.

Phase 4: Die heuristische Bedeutung verblaßt, dennoch ist die Korrespondenzrelation von wissenschaftstheoretischem Interesse.

Nachdem die Quantenmechanik als neue Theorie einigermaßen auf eigenen Beinen stand, begann das Korrespondenzprinzip als heuristisches Leitprinzip seinen unmittelbaren Sinn, wie gegen Ende des vorherigen Abschnitts erörtert, zu verlieren. Damit geht für die im Bereich der Quantenmechanik tätigen Wissenschaftler die Verwendung des Korrespondenzprinzips allmählich zu Ende. Es gibt aber auch noch eine wissenschaftsphilosophische Bedeutung dieses Prinzips, auf die im nächsten und auch im 4. Kapitel eingegangen werden soll.

Die Phasenentwicklung der Entstehung der Quantenmechanik mit Hilfe des Korrespondenzprinzips läßt sich wie folgt zusammenfassen: Die erste Phase war eigentlich die Geburtsstunde der neuen Theorie. Obwohl dies aus der heutigen Perspektive deutlich zu erkennen ist, war für die damaligen Wissenschaftler in dieser Phase noch unklar, ob sich daraus eine globale Alternative zur gängigen Theorie ergeben würde, oder ob es sich nur um eine lokale Korrektur handeln sollte. Mit der Zeit entstand ein weitgehend (wenn auch nicht

⁶⁸ Das Korrespondenzprinzip ist jedoch nicht der einzige Mechanismus, der für den Theorieaufbau von Bedeutung ist.

lückenlos) konsistentes System, in dem von der neu errichteten Teildisziplin allmählich ein systematischer Korpus von Begriffen, Formeln, und interpretativen Aussagen mit zugehörigen experimentellen Daten entstand. Dabei spielte das Korrespondenzprinzip sowohl die Rolle einer Heuristik als auch die eines Kontrollmechanismus. Mit Hilfe dieser beiden heuristischen Funktionen des Korrespondenzprinzips wurde das neue System in Analogie zur alten Theorie immer umfangreicher. Die Heuristik des Korrespondenzprinzips legt jedoch nicht jede Zeile der neuen Theorie fest. Im Laufe der Entwicklung der neuen Theorie tritt seine Funktion als *post hoc* Kontrollmechanismus immer stärker in den Vordergrund. Insbesondere werden die Plausibilität der neuen Hypothesen und die globale Vollständigkeit überprüft. Wie am Beispiel der Quantenmechanik zu sehen ist, geht die Entwicklung einer neuen Theorie weit über den Umfang einer bloßen Analogie zur alten Theorie hinaus, wenn in dieser Entwicklung das Korrespondenzprinzip prägend gewesen ist. Dies liegt daran, daß das Korrespondenzprinzip nicht den Gültigkeitsbereich der neuen Theorie begrenzt, sondern mehr an der Verbindungslinie zwischen neuer und alter Theorie verwendet wird. Solche wissenschaftsphilosophischen Implikationen des Korrespondenzprinzips werden im Kapitel 4 behandelt.

1.4.2. Problem der Begründung für das Korrespondenzprinzip

Abschließend zum dem kritischen Rückblick soll das Problem der Begründung dieses Prinzips diskutiert werden. Es heißt jedoch nicht, daß hier eine neue Begründung für das Korrespondenzprinzip geliefert wird. Vielmehr wird hier folgende Frage gestellt: Auf welches theoretische Fundament ist das Korrespondenzprinzip und die sich weitgehend als erfolgreich bewiesene Anwendung von ihm zurückzuführen?

Eine Möglichkeit ist, daß man zurückfragt, ob sich diese Frage eigentlich sinnvoll stellen läßt: Das Korrespondenzprinzip könne nicht unter einen solchen Begründungsanspruch gestellt werden. Aber in dem Fall soll es entweder etwas Selbstverständliches sein, oder es wird als eine Hypothese an den Anfang einer Reihe der Gedanken gelegt. Es scheint jedoch unhaltbar, das Korrespondenzprinzip als etwas Selbstverständliches anzunehmen. Müßte man es dann als eine Hypothese betrachten? Es ist nicht zu leugnen, wenn man den ganzen Weg des Korrespondenzprinzips vor Augen sieht, daß es die Eigenschaft einer Hypothese hatte. Es war offensichtlich nicht die einzige gezwungene Wahl in der damaligen Situation der Forschung, und es wurde vielmehr so aufgestellt: „Versuchen wir mal, angenommen, daß es so sei.“ Wenn das Korrespondenzprinzip in dieser Weise gedeutet wird, dann sind die erfolgreichen Ergebnisse der Versuche nach diesem Prinzip sicher die nachträgliche Begründung dafür. Es kommt einleuchtend vor, wenn man ferner berück-

sichtigt, daß das Korrespondenzprinzip nicht auf einmal sondern eher mit seinen gelungenen Anwendungen immer breitere Anerkennung und Akzeptanz fand.

Aber das Korrespondenzprinzip wurde nicht einfach aus einer Phantasie von Bohr geholt. Vielmehr schien es bereits im Jahre 1920 ziemlich plausibel, eine solche Relation anzunehmen. Wir erinnern uns, daß Bohr (1920) die Korrespondenz als eine *nachgewiesene* Relation darstellte. Ich möchte in diesem Abschnitt ein Stück weiter verfolgen, wie diese 'Nachgewiesenheit' der Korrespondenzrelation zu verstehen wäre.

Wie in Abs. 1.1. gesehen, steht die Kalkulation mit dem Ergebnis ' $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu = \omega$ ' scheinbar als die einzige Begründung des Korrespondenzprinzips. Diese Relation konnte durch eine theoretische Erwägung unterstützt werden, nämlich, daß die elektrodynamische Berücksichtigung auf die beschleunigte Bewegung des Elektrons in der Tat nicht bedeutsam sein soll, und zwar im Vergleich zur elektrostatischen Komponente, und daß deshalb die Elektronenbewegung aufgrund nur elektrostatischer Berücksichtigung sinnvoll annähernd zu beschreiben sei⁶⁹.

Dennoch muß man auf das Folgende achten. Die Strahlung, die für die Spektrallinien verantwortlich ist, kommt von der Transition zwischen zwei stationären Zuständen, und nicht von der Elektronenbewegung (auf der Ellipsenbahn) in *einem* stationären Zustand. Sofern das Elektron in einem stationären Zustand bleibt, gibt es keine atomische Strahlung. Dies bedeutet, die Frequenz ν der Strahlung und die Schwingungszahl ω der Elektronenbewegung in einem stationären Zustand sind einfach zwei verschiedene Dinge. Von dem Gesichtspunkt der *Transition* aus gesehen, hat man eigentlich keinen Grund, von vorn herein anzunehmen, daß sich das Elektron im Atom auf der kreisförmigen oder ellipsenförmigen Bahn um den Atomkern bewegt. Diese Annahme wird nur aufgestellt, wenn man auf das Problem mit der klassischen Erwägung über der Atomstruktur und die Bewegung des Elektrons eingeht, und zwar mit dem Coulombschen Gesetz und der klassischen Mechanik bezüglich der zentrifugalen Kraft.

In diesem Sinne soll eigentlich die Gleichung ' $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu = \omega$ ' nur verwirrend aufkommen, weil sie über die quantitative Übereinstimmung von zwei völlig verschiedenen Dingen spricht. Das eine ist die Frequenz der Strahlung, die mit einer Transition verbunden vorkommt, und das andere ist die Frequenz für eine periodische Bewegung auf der Elektronenbahn. Prinzipiell ist es in der Quantentheorie nicht möglich, von *einer* Bahn der Elektronenbewegung her die Schwingungszahl für die Strahlung zu berechnen. Man braucht unbedingt zwei unterschiedliche stationäre Zustände, einen für Startpunkt und einen für Endpunkt des Übergangs, von deren Abstand her die Strahlungsfrequenz berechnet werden kann.

⁶⁹ Siehe (1918), 98f.

Wie ist die Bohrsche Bemühung um die Verknüpfung von zwei anscheinend grundsätzlich verschiedenen Dingen zu verstehen? Von einem späteren Standpunkt der entwickelten Quantenmechanik her könnte man argumentieren, daß das Korrespondenzprinzip, gesehen im Sinne der Verknüpfung von Strahlung und Bewegung, wie es wirklich in seinem frühen Stadium war, einfach in falscher Vorstellung seinen Fuß faßt. Dann aber stellt sich die Frage: Wie sind die fruchtbaren Anwendungen von ihm zu erklären? Ist es bloß glücklicher Zufall gewesen? Ich gehe hierzu zurück zur Relation, $\lim_{n \rightarrow \infty} v = \omega$, und diskutiere weiter die Implikation von diesem Verhältnis.

Erstens ist zu beachten, daß die Balmersche Formel ohne theoretisch-physikalische Überlegungen, bloß aufgrund einer Reihe der quantitativen Ergebnisse der Spektroskopie, eher durch mathematische Intuition gewonnen wurde. Im Jahre 1885 hätte ja niemand von einer neuen Theorie wie ‘Quantenmechanik’ geträumt, die grundsätzliche Diskrepanz gegenüber Elektrodynamik und klassischer Mechanik zeigen würde. Damals waren die ‘klassischen’ Theorien der Mechanik und Elektrodynamik die einzigen Theorien auf diesem Gebiet. Es bestand kein theoretischer Zusammenhang in der damaligen Physik, in dem die Balmers Formel notwendigerweise n^{-2} und nicht etwa n^{-3} oder n^{-1} enthalten soll.⁷⁰ Währenddessen wird die Formel für ω als eine notwendige Schlußfolgerung aus der klassischen Physik gegeben, wenn man die Elektronenbewegung im Atom durch klassische Physik erklären möchte. Interessant ist hierbei das Folgende zu beobachten: Wenn die Balmersche Formel nicht aus n^{-2} Terme sondern zum Beispiel aus n^{-3} oder n^{-1} bestünde, dann wäre das obige Verhältnis nicht möglich. Zuletzt in diesem Zusammenhang sind folgende Ungleichungen zu betrachten:

$$\frac{2}{(n+1)^3} < \frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} < \frac{2}{n^3} < \frac{1}{(n-1)^2} - \frac{1}{n^3} < \frac{2}{(n-1)^3} \quad (n>1)$$

Je größer die Quantenzahl n wird, desto kleiner werden die Abstände zwischen den Termen in den obigen Ungleichungen, und die Termen nähern sich numerisch. Ein solcher mathematischer Zusammenhang ließe sich als eine mögliche Grundlage für Bohrs Aussage über die Korrespondenzrelation betrachten, von einer „*tieferen Bedeutung der nachgewiesenen Korrespondenz*“.

⁷⁰ Balmer (1885) schreibt: „Ausgehend von den Messungen von H.W.Vogel und Huggins über die ultravioletten Linien des Wasserstoffspektrums habe ich *versucht, eine Gleichung aufzusuchen*, welche die Wellenlängen der verschiedenen Linien in befriedigender Weise ausdrückt.“(80, Hervorhebungen von I.Ko)

Kuhn hat in seinem Opus, *The Structure of Scientific Revolutions*⁷¹ (Abkürzung: *SSR*), den Wandel der Physik Anfang 20. Jahrhunderts erwähnt, nämlich von klassischer zur quantenmechanischen Physik. Dieser Wandel hat ihm auch als ein gutes Beispiel für den Paradigmawechsel gedient. Durch eine wissenschaftliche Revolution werde die Theorie von herkömmlicher Normalwissenschaft durch ein revolutionäres Paradigma ersetzt, das nach der Revolution wiederum den Platz der Normalwissenschaft einnehmen werde.

Man könnte sich aber hierbei für das weitere Schicksal der alten Wissenschaft interessieren. Was passiert der Theorie von der alten Normalwissenschaft nach der Revolution? Wird sie ersetzt und dann verschwinden? Oder befindet sie sich nach der wissenschaftlichen Revolution in einer anderen Form? Ein Wissenschaftler im Sinne von *SSR* würde auf diese Frage reagieren, es interessiere ihn nicht mehr. Aber es scheint doch interessant, einmal zu fragen, in welcher Lage sich die Newtonsche bzw. Hamiltonsche Mechanik und die klassische Maxwellsche Elektrodynamik heute befinden, die wir grob die klassische Physik nennen können. Es erscheint sehr schwer zu sagen, daß diese einfach durch eine andere moderne Theorie ersetzt und folglich am Arbeitstisch eines Physikers schon lange nicht mehr zu finden ist, und daß die heutige Physik nichts mehr mit den 'klassischen Theorien' zu tun hat. Es stimmt auch nicht, daß die Physiker heute ausschließlich mit quantenmechanisch und relativistisch getaufter Physik beschäftigt sind.

Man begegnet Schwierigkeiten, wenn man diesen Wandel in der Physik mit dem Schema der wissenschaftlichen Revolution zu interpretieren versucht, bevor man einmal zur Analyse der Begriffsverschiebung durch den Theoriewechsel kommt. Problematischer Punkt in diesem Fall ist, daß die alte Theorie, oder das alte Paradigma, offensichtlich nicht untergegangen, sondern immer noch für die Wissenschaftler eine aktuelle Theorie geblieben ist. Andererseits ist es auch während der Entwicklung der Quantentheorie (bzw. Quantenmechanik) durchaus klar geworden, daß zwischen dieser neuen Theorie und der klassischen Physik gewisse Unverträglichkeit besteht, so daß man diesen Wandel nicht als kumulativ bezeichnen könnte.

Ein Ausweg aus dieser Situation wäre zu argumentieren, daß die Revolution noch nicht vollkommen vollzogen wurden, sondern der Prozeß des Paradigmawechsels noch auf dem Weg sei. Ich möchte jedoch nicht in vorliegender Arbeit den Begriff der wissenschaftlichen Revolution thematisieren. Vielmehr möchte ich uns zunächst darauf aufmerksam machen, daß das Schema der wissenschaftlichen Revolution und des quantenmechanischen Wandels in der Physik nicht problemlos zusammenpassen, und dann diskutieren, mit welchem Schema der Theoriendynamik die Geschichte der Physik dieses Jahrhunderts besser darzustellen wäre.

⁷¹ Kuhn (1970).

Es ist aber auch ein anderer Ausweg möglich, dieses Phänomen zu erklären. Man kann argumentieren, daß die alte Theorie durch einen Theoriewechsel nicht einfach zugrunde geht, sondern zumindest mit einem nichttrivialen Teil den Wechsel überlebt. Einige Autoren haben diese Argumentation systematisch aufgebaut unter dem Stichwort ‘allgemeines Korrespondenzprinzip’. Wir werden im nächsten Kapitel diese Wege in Betracht ziehen.

2. Das allgemeine Korrespondenzprinzip

Im letzten Kapitel blieb die Frage offen, ob und wie das Korrespondenzprinzip auch auf andere Theoriewechsel verallgemeinert werden könnte. In diesem Kapitel werden einige Autoren vorgestellt, die ein verallgemeinertes Korrespondenzprinzip diskutiert haben. Ihre Versionen des AKorr werde ich kritisch betrachten. Danach im Abschnitt 2.4. wird die Frage diskutiert, welche die Relata der Korrespondenzrelation sind. In den letzten Abschnitten dieses Kapitels werden Bedeutung und Probleme des AKorr diskutiert.

2.1. Post (1971): Das allgemeine Korrespondenzprinzip zeigt, daß die Wissenschaft ein rationales Unternehmen ist.

Der erste Autor, den ich in Bezug auf die wissenschaftstheoretische Verallgemeinerung des Korrespondenzprinzips behandle, ist Heinz Post⁷². In seinem „Correspondence, Invariance and Heuristics: In Praise of Conservative Induction“ (1971) stellt Post sein *Allgemeines Korrespondenzprinzip* (AKorr) dar. Kurz gefaßt heißt das AKorr bei ihm, die neue (Nachfolger-) Theorie müsse den Erfolg der alten (Vorgänger-) Theorie erklären können. Sein AKorr in diesem Aufsatz ist ein heuristisches Prinzip. Er versucht dort, gegen folgende zwei Thesen zu argumentieren:

- (1) That it is impossible or improper to define any procedure for the constructing of new theories.
- (2) That the most one can say of the heuristic process is that it is a trial-and-error procedure.

Er argumentiert, daß eine Begründung für das Vorgehen bei wissenschaftlichen Entdeckungen möglich ist. Zufall und *Trial-and-Error* Methode erklären die wissenschaftlichen Entdeckungen nicht erschöpfend. Die wissenschaftlichen Entdeckungen und die Schritte der Theoriekonstruktion erfolgen zum wesentlichen Teil auf systematischer Basis. Aufgrund dieser Basis werden eine Reihe von Bedingungen für die Entdeckungsprozesse formuliert. Diese Bedingungen sollen als Richtlinie für die Konstruktion der neuen Theorie fungieren.

⁷² Krajewski (1977) verweist auf eine Reihe von Autoren im ehemaligen sowjetischen Raum, die über dieses Thema arbeiteten und publizierten, etwa Kuznietsov und Shakhparonow, die ich hier jedoch nicht berücksichtige.

Nicht nur *geschehen* die Entdeckungen in der Wissenschaft, sie werden auch unter solchen Bedingungen systematisch *erzeugt*.

Post meint, daß diese Bedingungen nicht von außerhalb der Theorie kommen, zum Beispiel nicht vom soziologischen Kontext oder der persönlichen Neigung der Wissenschaftler. Bei ihm basieren die Bedingungen auf einer internen Analyse über die im Moment verfügbare Theorie. Wenn einmal auf diese Weise eine Reihe von Bedingungen entstanden sind, dann sollte durch einen Vorgang unter diesen Bedingungen eine neue Theorie erzeugt werden. Dabei ist wichtig, daß die Nachfolgertheorie als die bessere Theorie zweierlei können muß: Erstens den Erfolg der Vorgängertheorie erklären, und zweitens darüber hinaus zusätzliche Erfolge vorweisen, was die Vorgängertheorie nicht vorweisen kann. Die erste Forderung führt uns zum allgemeinen Korrespondenzprinzip.

Für Post ist die Heuristik die begründete Methode zur wissenschaftlichen Entdeckung. In Post (1971) versucht er, eine solche Heuristik zu beschreiben. Wir wollen zunächst betrachten, wie seine Version von AKorr aussieht.

Sei S die Vorgängertheorie und L die Nachfolgertheorie⁷³. Wenn einmal die Konstruktion einer neuen Theorie motiviert und initiiert wird, zum Beispiel aufgrund eines formalen Mangels in der alten Theorie, dann startet die Konstruktion auf der Basis der alten Theorie. Die Konstruktion von L sollte in solcher Weise erfolgen, daß die Erfolge von S durch L erklärt und geerbt würden.

Die Konstruktion von L beginnt mit S.⁷⁴ Mit S zu starten heißt aber nicht, daß L eine (egal wie raffinierte) Umformulierung von S sein soll, oder daß L zumindest in bestimmtem Maße durch die Begriffe von S ausgedrückt werden kann. Vielmehr besteht dieser Zusammenhang darin, daß L einen mit S weitreichend überlappenden Gegenstandsreich besitzt. Post schreibt:

The very *notion* of a 'predecessor' theory S *implies* that we have two theories S and L which refer (in their statements) to at least some events or facts which are identifiably the same. (220)

Post bringt mit diesem Satz einen vielleicht trivialen jedoch wichtigen Punkt in der ganzen Debatte um das AKorr zum Ausdruck. Dieser Punkt besteht darin, daß er als notwendiger gemeinsamer Nenner zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie '*events*' oder Fakten

⁷³ Die Symbole S und L werden im ganzen Kapitel benutzt.

⁷⁴ Trotz der Verbindung von S und L in der Genese von L *kann* es passieren, daß die zwei Theorien S und L am Ende auf fundamentaler Weise inkonsistent werden. Es sieht im Moment nur so aus, daß der Beginn der Konstruktion von L auf der Basis S und die Möglichkeit zur Inkonsistenz als (End-) Ergebnis der Entwicklung sich nicht widersprechen. Dieses Problem wird nur klarer, wenn die Frage beantwortet wird, *wie* die Verbindung von S und L *im Zusammenhang der Genese von L* ist. Dieser Punkt wird später nochmals diskutiert.

nennt. Diese würde ich so interpretieren, daß sie notwendigerweise einen gemeinsamen *Gegenstandsbereich* besitzen. Genauer gesagt haben sie eine Reihe der empirischen Phänomene im Interesse gemeinsam. Dies scheint natürlich zu sein, denn, wenn dies nicht der Fall wäre, dann wären S und L einfach zwei unterschiedliche und voneinander unabhängige Theorien, und man hätte keinen vernünftigen Grund zu sagen, daß L die Nachfolgertheorie von S sei. Daß S und L einen Teil des Gegenstandsbereichs gemeinsam haben, ist also eine notwendige Bedingung⁷⁵ dafür, daß L die Nachfolgertheorie von S ist.

Stellen wir uns aber eine folgende Situation vor: Ausgehend von einer alten Theorie S werden zwei verschiedene neue Theorien L_1 und L_2 entwickelt. Und, L_1 und L_2 sind zwei Konkurrenztheorien, und die zuerst entstandene Theorie L_1 hat für eine bestimmte Zeit Vorrang gehabt, dann aber hat ein Machtwechsel stattgefunden, wonach L_2 die Führung übernommen hat. Oberflächlich gesehen, wird die Geschichte folgendermaßen geschrieben: $S \rightarrow L_1 \rightarrow L_2$. Aber man muß in diesem Fall beachten, daß L_2 nicht unbedingt als eine Nachfolgertheorie von L_1 im gerade genannten Sinne analysiert werden kann. Es kann geschehen, daß keine heuristische Wirkung des Korrespondenzprinzips im Theoriewechsel von L_1 zu L_2 sichtbar ist.

Ein typischer Anstoß für die Formulierung einer neuen Theorie ist bei Post ein formaler Mangel in der alten Theorie, den er 'neuralgischen Punkt' nennt. Ein typischer formaler Mangel für Post ist die Inkonsistenz in der Theorie. Man will mit einer neuen Theorie diesen Mangel beseitigen⁷⁶. Sein Beispiel ist der Widerspruch zwischen Newtonscher Mechanik und Maxwell'scher Elektrodynamik, genauer gesagt zwischen zwei verschiedenen Invarianzprinzipien: Galileo-Invarianz und Lorentz-Invarianz. Post meint, es sei in dieser Situation erwartet worden, daß die gesamte Theorie so entwickelt würde, daß dieser Widerspruch nicht mehr vorkommt. Und dies bildet die Motivation zu einer neuen einheitlichen Theorie.

In der Konstruktion von L werden Änderungen von S und Ergänzungen zu S vorgenommen, um den Mangel zu beheben. Dabei sollen zwei heuristische Kriterien beachtet werden. Erstens, sollen allgemeine Gesetze wie Invarianzprinzipien und Erhaltungsprinzipien nicht verloren gehen, sondern bewahrt werden. Zweitens — und das ist die wichtigere und umfassendere Bedingung im Vorgang der Theoriekonstruktion — kommt das AKorr zur Anwendung. Es ist die folgende Forderung:

⁷⁵ Aber keine hinreichende Bedingung.

⁷⁶ Post ahnt hier aber nicht, daß die Inkonsistenz innerhalb einer Theorie nicht unbedingt ein 'neuralgischer' Punkt sein muß. Die Wissenschaftler scheinen Inkonsistenzen oft nicht als wesentliche Probleme zu begreifen.

[A]ny acceptable new theory L should account for the success of its predecessor S by ‘degenerating’ into that theory under those conditions under which S has been well confirmed by tests. (228)

Was genau besagt die Formulierung ‘*accounting for the success*’? AKorr fordert, so Post, daß L sowohl Übereinstimmungen bezüglich einzelner (quantitativer) Aussagen zeigt, als auch einen erheblichen Teil der *Struktur* der Theorie S erbt und wiedergibt. Dies lasse sich zeigen, indem L auf S unter bestimmten Bedingungen degeneriert (*degenerated*), und zwar für den Bereich, wo S sich als erfolgreich erwiesen hat. In der Diskussion über das AKorr ist zu beachten, daß es sich um den Bereich handelt, wo S Erfolge hatte, und nicht um den Bereich, wo S empirisch (noch) nicht gut bestätigt worden ist.⁷⁷ Eine triviale Voraussetzung ist dabei, daß S trotz des Auftauchens der Nachfolgertheorie L einen nicht leeren Bereich S^* besitzt, wo S immer noch als erfolgreich angesehen werden kann, obwohl L die von S erfolgreich behandelte Probleme möglicherweise eleganter löst. AKorr sagt dann, daß S^* in L, oder in TL , das heißt eine übersetzte Form von L durch eine Übersetzung T, enthalten ist: $S^* \subset [T]L$.⁷⁸

Dieses Prinzip kann sowohl deskriptiv als auch normativ gedeutet werden. Die Frage lautet also, ob das AKorr bei Post besagt, daß eine neue Theorie gemäß diesem Prinzip konstruiert werden *soll*, oder ob neue Theorien faktisch zur jeweiligen alten Theorie in einer Korrespondenzrelation stehen. Die deskriptive und die normative Version schließen sich offensichtlich nicht gegenseitig aus. Man kann auch nicht die eine aus der anderen herleiten. Die zwei Versionen zeigen auf zwei verschiedene Kontexte.⁷⁹ Post selbst will anscheinend eine direkte Auseinandersetzung mit diesem Problem vermeiden:

There is no logical reason why a scientific theory should not be replaced by a theory different from the old at every level; but *this is not what has happened so far*. (237, Hervorhebung von I.Ko)

Jedoch scheint Post das AKorr vor allem als normatives Prinzip zu betrachten, an dem man in der Konstruktion einer neuen Theorie festhalten müßte. Dies wird deutlich, wenn man den folgenden Punkt berücksichtigt. Zwischen der klassischen und der Quantenmechanik scheint die Bedingung $S^* \subset L$ nicht allgemein erfüllt zu sein, wie auch Post zugibt, sondern

⁷⁷ Dieser Punkt wird auch von Fadner (1985) betont. Siehe Abs. 2.2.

⁷⁸ An einer Stelle drückt Post das AKorr in der Form $S^{**} \subset TL$ (p.231) aus, wo $S^{**}(\text{def}) = S^* \cap L^*$, und mit L^* als empirisch erfolgreich bestätigter Teil von L, was jedoch fehlerhaft erscheint, weil diese Formulierung keine Aussagekraft hat. $L^* \subset L$, und $S^{**} \subset L^*$ gelten jeweils per Definition, deswegen folgt $S^{**} \subset L$ ausschließlich aus der Definition, wenn nur T nicht irgendein böser Mechanismus wäre, was im Kontext von Post eine triviale Voraussetzung ist.

⁷⁹ Weiter zu diesem Punkt, siehe Radder (1991).

nur lokal auf einem Grenzgebiet. Dies ist als ein Gegenbeispiel gegen die Postsche Version des AKorr anzusehen. Dennoch meint Post an diesem Punkt nicht, daß das AKorr hier unzulänglich sei. Er meint, daß sich die Quantenmechanik noch in einem unvollkommenen Zustand befinde, und daß man eine neue und bessere Quantenmechanik brauche, die die Bedingung erfüllen könnte. Hierauf ließe sich entgegnen, daß die Quantenmechanik zwar in dem Sinne eine unvollkommene Theorie sei, daß sie aber heute eine in der Physik weitgehend anerkannte Theorie ist, und zwar seit etwa 70 Jahren, so daß heute kein Teilbereich der Physik ohne ihren prägenden Einfluß vorstellbar ist. Obwohl eine Kritik an der heutigen Physik oder eine Richtungsanweisung für die weitere Entwicklung der Quantenmechanik im Sinne von Posts AKorr *möglich* scheint, ist Post mit seinem Argument meines Erachtens zu weit gegangen, daß die heutige Quantenmechanik deswegen eine unzulängliche Theorie sei, weil sie die Forderung des AKorr nicht erfüllt.

Kehren wir zurück zu seiner Formulierung des Korrespondenzprinzips, daß L den Erfolg von S erklären können muß, daß also $S^* \subset L$ gelten soll. Hier stoßen wir auf ein zentrales Problem. S und L sind jeweils ein in sich geschlossenes Ganzes. Was bedeutet eigentlich die Behauptung, einen Teil von S zu bewahren und einen anderen Teil aufzugeben? Dieser Gedankengang führt zur nächsten Frage: Was korrespondiert womit im Korrespondenzprinzip? Was sind die Relata der Korrespondenzrelation? Zum Beispiel scheinen die Theorien an sich schlechte Kandidaten für die Relata zu sein. Diese Möglichkeit sieht nicht nur sehr abstrakt aus, sondern es gibt auch plausible Argumente dafür, daß die Vorgänger- und die Nachfolgertheorie in vielen Fällen streng genommen nicht einmal im Limit übereinstimmen würden. Wenn man die Postsche Formulierung $S^* \subset L$ wie vorgegeben mengentheoretisch betrachtet, sollten die Relata die *Elemente* von den Mengen S [oder S^*] und L sein, was für die Mengen an sich, S [oder S^*] und L, prinzipiell nicht möglich ist. Was aber sind dann die Relata der Korrespondenzrelation? Mit diesem Problem werde ich mich im Abschnitt 2.4. weiter beschäftigen.

Auf einige weitere Probleme in Posts Version will ich noch hinweisen. Erstens erklärt das AKorr allein nicht, welche entscheidenden Momente dastehen, die die Wissenschaftler überhaupt zur Konstruktion einer *neuen* Theorie bewegen. Wir sahen, daß Post mangelnde Konsistenz von S erwähnt. Die Motivation zu einer neuen Theorie ist sozusagen der Zuwachs an Konsistenz. Es ist bei ihm jedoch nicht klar, wann der Mangel durch eine lokale, systeminterne Reparatur zu beheben ist, und wann Wissenschaftler an ein neues System denken sollten, oder wo die Trennlinie zwischen diesen beiden Fällen liegt.

Ein anderes Problem ist, daß das AKorr nur *post hoc* wirken kann. Dessen ist sich offensichtlich auch Post selber bewußt:

In heuristics, going from S to L, the correspondence principle is at least a guiding constraint. In general, it is to be used *post hoc* (i.e., after formulation of L)

to eliminate certain candidates for L-theory. [...] The principle is not, in general, a sufficient constraint to make the transition $S \rightarrow L$ unique. (235)

Das bedeutet, daß das AKorr bei Post nicht *im* Prozeß der Theoriekonstruktion zum Zuge kommt, sondern nur nachträglich als Prüfstein fungieren kann, indem es prüft, ob ein *schon konstruierter* Kandidat für eine neue Theorie akzeptabel ist oder nicht. Posts Analyse wird dem heuristischen Potential des Korrespondenzprinzips nicht gerecht, das darin besteht, daß es auch in der Tat direkt zum Konstruieren von solchen Kandidaten beiträgt, wie wir beispielsweise bei der Formulierung der Quantentheorie gesehen haben. Obwohl ihm beizupflichten ist, wenn er schreibt, „The principle is not, in general, a sufficient constraint to make the transition $S \rightarrow L$ unique.“(Ebd.), hat er doch einen wichtigen Aspekt des Korrespondenzprinzips nicht erfaßt.

Das Korrespondenzprinzip übt seine Funktion nur in Richtung von L zu S aus, aber nicht in umgekehrter Richtung. Kein engagierter Wissenschaftler würde sich für einen Test interessieren, in welchem Maße die alte Theorie aus der Perspektive der neuen und besseren Theorie gültig ist. Ein solcher Rückblick von L nach S ist dennoch in zweierlei Hinsicht interessant. Erstens können in der frühen Phase der Theoriekonstruktion auftauchende Ideen und Vorschläge dadurch schnell und zuverlässig überprüft werden, und zweitens kann der Rückblick als Beruhigung für diejenigen dienen, die möglicherweise von den radikalen Unterschieden zwischen der neuen Theorie und der vertrauten alten Theorie schockiert wurden, wenn damit aufgezeigt wird, daß die neue Theorie (fast) alles kann, was die alte bereits konnte.

Für einen Wissenschaftler in der Praxis ist die Richtung von S nach L viel eher relevant. Das gilt zum Beispiel dann, wenn die alte Theorie eine weitgehend erfolgreiche und innerlich widerspruchsfreie Theorie war, aber wegen einer Reihe gravierender Anomalien, die neu auf dem Forschungsfeld unübersehbar aufgetaucht sind, in große Schwierigkeiten geraten ist. Die Wissenschaftler mögen dann an eine radikale Reparatur der ganzen Theorie oder vielleicht an eine völlig neue Theorie denken. (Diese zwei Fälle lassen sich nicht immer sinnvoll unterscheiden.) Aber eins scheint sicher zu sein: Die Heuristik, die die Forscher anwenden, wirkt in der Richtung ‘von S nach L’. Gemacht werden soll die neue Theorie, nicht die alte.

Obwohl Post argumentiert, daß L von S nicht nur den Gegenstandsbereich sondern auch die Struktur erbt, nämlich „*coherent pattern of theorems*“ (235), gibt Post keine konkreten Hinweise dafür, in welcher Weise diese Vererbung erfolgt. Entweder setzt er die Vererbung der Struktur als eine axiomatische Bedingung zur Theoriendynamik voraus, oder sie ist eine Bedingung, die prinzipiell erfüllt werden kann, aber nur zum Teil wirklich erfüllt

wird. In beiden Fällen kann er meines Erachtens nur schwer dem Vorwurf der Trivialität entgehen.

Was Post in seinem Aufsatz vorlegen wollte, ist ein Rezept für die Konstruktion einer neuen und besseren Theorie. Er meint, die Regeln in seinem Rezept seien 'fehlbar', aber 'nahezu universell erfolgreich' (249). Aber wir sahen, daß sein Rezept ($S^* \subset TL$) für die Konstruktion einer neuen Theorie in der Tat nur *post hoc* zur Kontrolle eingesetzt werden kann. Er liefert keine konkreten Belege für seine starke Aussage, daß es faktisch so und nicht anders geschehen sei. Insgesamt müssen wir konstatieren, daß Post (1971), obwohl er hier und da einige interessante Aussagen macht, keine systematischen Argumente für das AKorr liefert.

Hier sind zwei Probleme bezüglich des allgemeinen Korrespondenzprinzips. Das eine Problem ist die Frage, ob Wissenschaftler diesem Prinzip in der Tat gefolgt sind⁸⁰. Diese Frage richtet sich an die Historiographie, wo man betrachtet, wie Theorien tatsächlich entstanden sind. Das andere Problem ist, ob und wieweit die Beziehung zwischen einer Vorgängertheorie und deren Nachfolgertheorie in der Weise rekonstruiert werden kann, daß sie zueinander in der Korrespondenzrelation stehen. Diesbezüglich macht Radder (1991) mit Recht aufmerksam, daß auseinanderzuhalten ist, was die philosophische Rekonstruktion der Relation von zwei Theorien *per* Korrespondenzprinzip ist, und was der heuristische Einsatz des Prinzips durch die Wissenschaftler ist. Es sind nämlich zwei unterschiedliche Fragen, ob der Übergang von S zu L mit Hilfe des Korrespondenzprinzips beleuchtet werden kann, und ob dieser Übergang in der Tat durch das Einbeziehen dieses Prinzips erfolgt ist.

Redhead (1993) schätzt die Bedeutung von Posts Version des AKorr zusammenfassend wie folgt ein:

I suggest that this principle does give content to some notion of progress in science and that it forms the basis for useful heuristic guidelines. (340)

Aber wenn es wirklich um eine brauchbare Heuristik in der Konstruktion einer *neuen* Theorie geht, dann kann Posts Version des AKorr nur ein eingeschränktes Element von ihr hervorheben, nämlich die *post hoc* Kontrolle für schon formulierte Theorie-Kandidaten. Als 'Suchmaschine' taugt es jedoch nicht. Obwohl Redhead im Postschen Programm einen Weg zum Begriff des Wissenschaftsfortschrittes sieht, scheint mir der Fortschrittsbegriff bei Post zu eng begrenzt zu sein. Er beinhaltet nur die Aspekte der logischen, oder formalen Einheitlichkeit in den Theorien; *'the continuing confrontation with novel surprises in sci-*

⁸⁰ Eine andere Variante dieser Frage, nämlich ob die Wissenschaftler diesem Prinzip folgen *sollen*, interessiert uns nicht, weil weder dafür noch dagegen eine geeignete Basis für philosophische Argumente zu finden ist.

ence'⁸¹ bleibt außerhalb der Reichweite seines Programmes. Aber Post hat dazu beigetragen, daß das Korrespondenzprinzip nach dessen Einsatz in der Entwicklung der frühen Quantenmechanik in die wissenschaftsphilosophische Diskussion eingeführt wurde⁸², und hat zumindest versucht, eine Formulierung des AKorr zu geben, auf deren Grundlage dieses Thema weiter diskutiert werden konnte.

2.2. Fadner (1985): Korrespondenz in *operational equations*

In seinem Aufsatz in *American Journal of Physics* (1985) diskutiert Fadner das AKorr⁸³ und versucht eine genauere Formulierung für das AKorr anzubieten. Er argumentiert, daß das Korrespondenzprinzip, das ursprünglich von Bohr im Kontext der Relation zwischen quantentheoretischer und klassischer Physik als Begriff geprägt wurde, schon lange vorher in allen Zweiggebieten der Physik angewandt wurde. Obwohl seine Tabelle einer 'kurzen Geschichte der Anwendung des Korrespondenzprinzips', die eine Zeitspanne vom 17. bis 20. Jahrhundert abdeckt, auch ein Beispiel aus der Biologie enthält, werde ich meine Betrachtung auf den Bereich Physik beschränken, wie es auch Fadner in seinem Artikel tut. Fadner klassifiziert die Anwendungen des Korrespondenzprinzips in 'induktive' und 'deduktive'. Eine induktive Anwendung des Korrespondenzprinzips liegt dann vor, wenn: „a scientist infers form or content for a more general new theory from the form or content of an earlier well-supported less general theory“ (830). Eine deduktive Anwendung ist erst dann möglich, wenn die neue Theorie sich entwickelt hat. „[T]he scientist shows that expressions in the old theory follow logically from the new theory under certain limiting assumptions or conditions.“ (831) Durch solche deduktive Anwendung soll gezeigt werden, daß die neue Theorie einen mindestens so großen Geltungsbereich hat wie die alte Theorie.

Sofort fällt die Ähnlichkeit auf zwischen Fadnerscher Klassifikation in induktive und deduktive Anwendungen und dem Unterschied zwischen den Korrespondenzprinzip als aktiver Heuristik und als *post hoc* Kontrolle für Theorie-Kandidaten, wo mit aktiver Heuristik eine Hypothese produzierende Heuristik gemeint ist. Jedoch macht sein Beispiel für die deduktive Anwendung, die Relation zwischen der Formel für die kinetische Energie in der speziellen Relativitätstheorie und der klassischen Physik, den heuristischen Wert des AKorr

⁸¹ Redhead (1993), 340.

⁸² Es gibt eine Dissertation über das Thema '*General Correspondence Principle*', die von Post betreut wurde und bereits im Jahre 1968 fertiggestellt war: Koertge, N. (1968), „A Study of Relations between Scientific Theories: A Test of the General Correspondence Principle“, Dissertation an der *London University*.

⁸³ Er nennt es 'the *generalized* correspondence principle' (Hervorhebung von I.Ko).

nicht deutlich, weil man bei diesem Beispiel praktisch keine nachträgliche Unterstützung für die neue Theorie, die spezielle Relativitätstheorie, beobachten kann.

Fadner liefert einen weiteren Beitrag zur Diskussion über das AKorr. Er fragt, was eigentlich die Relata in der Korrespondenzrelation sind, und bietet als eine Antwort die operationalen Gleichungen [*operational equations*] an. Er versteht das AKorr zunächst in normativer Weise wie das Folgende:

[A]ny new theory in physics *must* reduce to the well-established classical theory to which it corresponds.(831, Hervorhebung von Fadner)

Aber das Problem ist, wie wir beim Beispiel von Bohrs Korrespondenzprinzip gesehen haben, daß sich die *Theorie* der Quantenmechanik und die klassische *Theorie* an sich in keinem vernünftigen Sinne annähern, wie von Bohr selbst auch betont wurde. Betrachten wir hier dieses Problem im Zusammenhang mit der Reduktion zwischen den Theorien. Wo liegt eine Reduktion vor, wenn es sich hier überhaupt um eine Reduktion handeln soll? Fadners Antwort auf diese Frage ist:

[I]n historical uses of the correspondence principle the reduction does not occur between theories, but instead between the *operational equations* of the new and the old theories. (831)

Korrespondenzrelationen in der Physik können meistens, so Fadner, in einer Form des mathematischen Grenzwertproblems dargestellt werden. Unter einer Grenzbedingung, die die Grenzlinie bestimmt, würde eine operationale Gleichung von der alten Theorie als ein Grenzfall einer anderen operationalen Gleichung der neuen Theorie auskommen. Fadner stellt in diesem Sinne die Korrespondenzrelation auf die Ebene von operationalen Gleichungen.⁸⁴

Gemäß dieser Auffassung kann eine Theorie L nicht auf eine andere Theorie S reduziert werden,⁸⁵ und zwar nicht einmal unter den Grenzbedingungen oder in dem Grenzbereich. Die Quantenmechanik, als Gesamtheit von Grundpostulaten, mathematischer Struktur, und weiteren theoretischen Sätzen, kann sich in der Tat nicht auf die klassische Elektrodynamik reduzieren, und auch umgekehrt nicht. Man erzählt nichts anderes als ein Märchen, wenn man wie folgt behauptet: „Wenn ich in die Quantenmechanik die Bedingung $h \rightarrow 0$ (oder $n \rightarrow \infty$) einfüge, bekomme ich die klassische Theorie, und wenn ich die Bedingung wieder entferne, komme ich zur Quantentheorie zurück.“ Fadner hält dem entgegen,

⁸⁴ Diese Version legt dem AKorr die Beschränkung auf, daß es nur in einem quantisierbaren, mathematisierbaren Wissenschaftsbereichen sinnvoll ist.

⁸⁵ Wir erinnern uns, daß die Bezeichnungen S und L für jeweils die Vorgänger- und Nachfolgertheorie eingeführt wurden.

Reduktion könne zwischen zwei operationalen Gleichungen erfolgen, und zwischen diesen solle auch die Korrespondenzrelation bestehen.

Die operationalen Gleichungen, die in der Fadners Auffassung des AKorr als zentraler Begriff vorkommen, spielen in der physikalischen Theorie allgemein eine zentrale Rolle: Die quantitativen Erklärungen und Voraussagen werden immer auf dieser Basis gemacht. Er formuliert in diesem Sinne das AKorr neu:

The operational equations of any new theory must reduce, within the appropriate accuracy, to the corresponding operational equations of a well-established previous theory in the „regions“ where the previous theory is well supported by data. (832)

Für die Anwendung von AKorr schlägt Fadner drei folgende Voraussetzungen vor (832):

- (1) The data from data events represent larger-scale or longer-lasting events with some degree of accuracy;
- (2) It is possible to obtain a reasonable and reliable *value* for that degree of accuracy;
- (3) It is possible to obtain data which are sufficiently dense to support a piecewise continuous functional relationship.

Man nimmt an, daß die Datenereignisse bereits vorliegen. Dann bezieht sich die erste Voraussetzung auf die Basisrelation ‘Ereignis - Messen’ (*event - measurement*) in der wissenschaftlichen Tätigkeit. Unter Genauigkeit ist hier zunächst eine Übereinstimmung hohen Grades unter den gesammelten Daten zu verstehen, und keine *adequatio* von Realität und Theorie. Des weiteren möchte ich die ‘Genauigkeit’ so sehen, daß man die Daten mit einer kleineren theoretischen Fehlerspanne bekommen kann. In diesem Sinne sind zum Beispiel die Daten 50,0km/h oder $2,998 \times 10^{10}$ cm/Sek genauer als die Daten 50km/h oder 3×10^{10} cm/Sek. Zweitens muß die Genauigkeit zu vergleichen und auch im gewissen Sinne zu kontrollieren sein. Wie bei der ersten Voraussetzung muß hier die Zuverlässigkeit (*reliability*) auch auf den Kontext bezogen werden. Die dritte Voraussetzung erscheint vernünftig, wenn man die Möglichkeit bedenkt, daß man von den prinzipiell immer *diskreten* Daten eine möglichst zuverlässige Tendenz schlußfolgern will, die Wissenschaftler in einer mathematischen Funktion zu formulieren versuchen, welche im zu erwartenden Anwendungsbereich der Theorie mindestens stückweise stetig sein sollte.

Diese drei Annahmen liefern zusammen eine Basis für die Möglichkeit, aus bestimmten Phänomenen, einer Reihe von Beobachtungen im Labor mittels einer experimentellen Einrichtung, eine möglichst plausible ‘theoretische’ Beschreibung zu erzeugen, und zwar mit einem vernünftigen Genauigkeitsgrad und in mathematisierter Form. Wenn solche Phänomene als gemeinsamer Startpunkt für alle vorliegen, dann können daran Messungen mit

zuverlässiger Genauigkeit gemacht werden, und zwar so, daß die gesammelten Daten dicht genug liegen, um damit eine operationale Formel oder eine Funktion zu gewinnen. Es scheint damit ein Fundament für das AKorr gesichert zu sein, obgleich noch nicht alle Probleme beseitigt sind.

Ein Problem ist zum Beispiel die anfangs angenommenen Basisrelation zwischen Ereignis und Messung. Gegen die Möglichkeit neutraler Messung spricht die Theoriegeladenheit der Beobachtung. Mit diesem Thema werde ich mich hier nicht auseinandersetzen. Aber ich glaube das Problem läßt sich entschärfen. Es soll nicht gerade die oben erwähnte Basisrelation 'Ereignis-Messung' sein, wo die Messung als interpretationsfreies Ablesen zu verstehen ist. Das Ablesen erfolgt natürlich unter der Leitung einer Theorie, aber die Theorie muß nicht notwendig mit der mit dem ganzen Prozeß in Frage zu stellenden Theorie identisch oder verbunden sein. Anders formuliert können zwei konkurrierende Theorien einen gemeinsamen Teil haben, der für (elementare) Messungen verantwortlich ist. Noch stärkere Versionen der Theoriegeladenheitsthese können zwar formuliert werden, aber sie scheinen der wirklichen Wissenschaftspraxis nicht angemessen zu sein, und deshalb ignoriere ich sie hier.

Fadner (1985) nennt zahlreiche Beispiele für die Korrespondenzrelation zwischen Theorien in der Wissenschaftsgeschichte, und zwar beginnend mit dem Übergang von Keplers Gesetzen zu den Newtonschen Gesetzen bis hin zu den Mendelschen Gesetzen und der heutigen Genetik. Seine Beispiele kommen jedoch fast ausschließlich aus der Physik. Er findet interessante Parallelen zwischen Quantenmechanik und Relativitätstheorie bezüglich der Korrespondenzrelationen. Er betrachtet das Beispiel, wo man aus der relativistischen Formel für die kinetische Energie näherungsweise die klassische Formel für die kinetische Energie bekommt, unter der Grenzbedingung, daß die Geschwindigkeit ignorierbar klein ist im Vergleich zu Lichtgeschwindigkeit.

Aber er übersieht in jenem Aufsatz, daß man in seiner Version des AKorr keine heuristische Kraft des Korrespondenzprinzips wahrnehmen kann. Die Bedeutung des Wortes „Korrespondenz“ impliziert keine einseitige Richtung, sondern eine *Symmetrie*. Aber das Korrespondenzprinzip, das als Heuristik in einer Theorieentwicklung wirkt, zeigt deutlich eine Richtung. In einer Korrespondenzrelation besteht nicht Symmetrie sondern Asymmetrie.

Nehmen wir an, Theorie S wird von einer neuen Theorie L abgelöst, und man dürfe L die Nachfolgertheorie von S nennen. Oder besser stellen wir uns vor, um möglichst verschiedene Fälle aus der Wissenschaftsgeschichte mit dem Korrespondenzprinzip erfassen zu können, ein wissenschaftlicher Satz a von Theorie S entspricht b von B. Wenn der Pfeil nur in Richtung $b \rightarrow a$ läuft und dieses umgekehrt nicht möglich ist, dann besteht hier keine vernünftige Möglichkeit zu einer sinnvollen Heuristik im Sinne eines Werkzeugs zum Aufbau

von B, weil man von a keine eindeutige oder beschränkt mehrdeutige Schlußfolgerung in Richtung auf L ziehen kann.

Ich versuche nun, eine Schlußfolgerung aus diesen Gedanken zu ziehen. Erstens garantiert die Tatsache, daß in einem Theoriewechsel von S zu L die Relation der Übereinstimmung unter bestimmten Grenzbedingungen, wie sie zum Beispiel in der Relation $E_{k,rel} \rightarrow E_{k,cl}$ zu finden ist, allein noch keine Korrespondenzrelation, die heuristisch anwendbar ist. Deswegen kann man hier zwei Ebenen der Korrespondenzrelation unterscheiden. Die eine ist die Korrespondenzrelation ohne solche heuristische Kraft, und die andere ist die Korrespondenz mit heuristischer Kraft. Nur die letztere entspricht dem Bohrschen Korrespondenzprinzip. In den Bemühungen, das Korrespondenzprinzip verallgemeinert im Kontext der Theoriendynamik zu betrachten, ging es auch vor allem um solche intertheoretische Korrespondenzrelation *mit heuristischer Kraft*. Fadner zitiert in Weidner/ Sells (1960) und Rogers (1960):

We know in advance that *any new theory* in physics — whatever its character or details — must reduce to the well-established classical theory to which it corresponds when the new theory is applied to the circumstances for which the less general theory is known to hold. (Weidner et al.(1960), 29, Hervorhebung von I.Ko)

New theory and old must *overlap and agree* in the region where the difference between their assumptions does not matter. (Rogers (1960), 737, Hervorhebung von I.Ko)

Fadner fügt noch hinzu, daß für beide, Weidner und Rogers, das oben formulierte AKorr eine Selbstverständlichkeit unter den Physikern sei, und Physiker hätten es zu allen Zeiten allgemein akzeptiert. Wenn diese Vorstellung der Realität entspricht, dann braucht man nur die Struktur dieses allgemein akzeptierten und schon lange angewandten Prinzips zu analysieren. So einfach ist die Geschichte jedoch nicht. Es scheint sehr schwer zu argumentieren, daß Korrespondenzrelation zwischen operationalen Gleichungen im Fadnerschen Sinne in jedem Paar von Vorgängertheorie und Nachfolgertheorie in der Physikgeschichte gefunden wird. Wieweit dieses Prinzip wirklich unter den Physikern eine Selbstverständlichkeit ist, eine empirische Frage, die auch längst nicht klar ist.

An diesen Beispielen fragen wir uns noch einmal, was das AKorr eigentlich heißt. Das AKorr kann nicht nur in verschiedener Form ausgedrückt werden, sondern verschiedene Auffassungen des AKorr sind möglich, nach den verschiedenen Modi und Graden, und dem Umfang der Übereinstimmung zwischen zwei Theorien. Im nächsten Abschnitt werden einige Kriterien vorgelegt, womit dann eine Klassifikation des AKorr versucht wird. Da-

durch soll Klarheit und Überblick über die Problematik des allgemeinen Korrespondenzprinzips gewonnen werden.

Weidner und Sells (1960) schreiben: Wir *wissen* schon im voraus, daß sich eine neue Theorie in der Physik *immer auf die klassische* Theorie reduzieren lasse, wo die alte Theorie gut bestätigt war, egal welche neue Theorie kommt. Weidner und Sells formulieren nur knapp und vage, aber sie haben eine starke Version, in der die alte Theorie *für immer ihre Gültigkeit behält, nämlich in dem Bereich, wo sie gut bestätigt war*. Währenddessen weist das Zitat von Rogers auf eine neue Problematik hin. Erstens redet Rogers nicht über Reduktion einer Theorie auf eine andere Theorie, sondern über das Überlappen und Übereinstimmung von zwei Theorien, was eine symmetrische Relation zwischen neu und alt bedeutet. Zweitens handelt es sich bei ihm um Identität und Differenz in den Annahmen in der Theorie, so daß die Übereinstimmung in solchen Annahmen der beiden Theorien das Überlappen beider Theorien basiert.

Noch ein Punkt bei Fadner, der zu beachten ist, ist sein Begriff von Terminus-Korrespondenz (*term correspondence*). Im Fadners AKorr können die Fachausdrücke von Vorgänger- und Nachfolgertheorie nicht allgemein auf dem ganzen Anwendungsbereich der jeweiligen Theorie ineinander übersetzt werden, sondern nur beschränkt auf dem Korrespondenzbereich, das heißt auf dem Grenzbereich, wo die korrespondenzmäßige Annäherung der operationalen Gleichungen stattfinden soll. Global betrachtet handelt es sich bei der Terminus-Korrespondenz deswegen weder um Bedeutungsinvarianz noch um globale Übersetzbarkeit. Solche Korrespondenz verträgt sich dann gut mit der Möglichkeit von Begriffsverschiebungen, die den Theoriwechsel begleiten.

2.3. Radder (1991) und eine kritische Zusammenfassung

Radder (1991) bietet zunächst einen gut organisierten Überblick über das Problemfeld um das AKorr und er bringt das AKorr mit dem Bohrschen Korrespondenzprinzip in Verbindung. In Radders Darstellung und Problematisierung des AKorr spielt die Unterscheidung zwischen Genese und Geltung einer Theorie eine zentrale Rolle. Diese Unterscheidung ist wiederum mit der Unterscheidung von deskriptiver und normativer Version des Korrespondenzprinzips verbunden, die ein Grundproblem um dieses Prinzip bildet.

Betrachten wir einen Theoriwechsel $S \rightarrow L$. Mit S^* soll der erfolgreich bestätigte Teil (*well-confirmed part*) von S bezeichnet werden. Radder weist aber darauf hin, daß der Umfang von S^* nicht von Anfang an fest steht, sondern variiert, und zwar verbunden mit der Entwicklung von L . Man kann zu einem Zeitpunkt den Umfang von S^* nur schätzen,

und zu einem anderen Zeitpunkt wird der Umfang von S^* vielleicht anders geschätzt⁸⁶. Kurz gesagt, der Umfang von S^* ist von L abhängig.

Ein anderes und gravierenderes Problem ist das Folgende. Selbst wenn zu einem Zeitpunkt der Umfang von S^* festgelegt wäre, könnte man davon kaum informative Hinweise auf den neu aufzubauenden Teil erschließen, nämlich über die neue Stärke von L , die L über S^* hinaus zu einer besseren Theorie machen soll. Posts AKorr beinhaltet die Forderung, L müßte S^* enthalten, gegebenenfalls mit Hilfe einer Übersetzung. Aber gerade ist deutlich geworden, daß der Umfang von S^* in Abhängigkeit von L variiert. Radder formuliert dann eine direkte Frage zum Korrespondenzprinzip: *Wozu dann eigentlich dieses Prinzip?*

[I]f the generalized correspondence principle merely teaches us something about the limitations of the old theory S and nothing about the development and the validity of a new theory L *outside* the domain of overlap with S , why do we use the principle at all? (215, *italics* von Radder)

Man kann an diesem Punkt *entweder* zurückhaltend sagen, daß das Korrespondenzprinzip nicht für Theoriekonstruktion im aktiven Sinne einzusetzen ist, sondern nur *post hoc* als Prüfstein für eine schon geschriebene Theorie, und zwar von L zu S (oder S^*), *oder* man versucht trotzdem weiter, das Korrespondenzprinzip als positive Heuristik zu sehen. Die Schlüsselfrage lautet, ob es nicht nur rückwirkend von L auf S (oder S^*) sondern auch in Richtung von S zu L wirken kann. Zahar (1983), Fadner (1985) und Radder (1991) wollen diese Möglichkeit bejahen. Die heuristische Anwendung des Korrespondenzprinzips sollte schließlich in der Richtung von S zu L erfolgen können. Radder gibt das Beispiel von Borns Quantisierungsregel.

Born's quantization rule ... tries to bridge the conceptual and numerical gap between S and L by means of a formal framework which is in principle much wider applicable than only to the domain of the (numerical) correspondence conditions. (216)

Born (1924) ersetzt das klassische Differential durch quantentheoretische Terme, und dies brachte nicht nur numerische Korrespondenz im Grenzgebiet sondern dadurch wurde ein entscheidender Schritt weiter in die neue Theorie gemacht, nämlich zu Heisenbergs Matrizenmechanik. An diesem Beispiel ist zu sehen, daß durch das Korrespondenzprinzip ein Schritt von S zu L ermöglicht wird, der über den eigentlichen Umfang von S^* hinausgeht. Zugleich muß man aber beachten, daß L noch keine fertig gebaute Struktur besitzt. Sie

⁸⁶ Vgl. Post (1971), 231.

muß aber mindestens so weit strukturiert sein, daß sie eine korrespondierende Verknüpfung mit S aufnehmen kann.

Eine Theorie ist für neue Vorschläge und kleine Innovationen (z.B. technische) immer offen, ohne in eine Krise zu geraten. Innerhalb eines Theoriesystems werden mögliche Verbesserungen und Innovationen, Erweiterung der Reichweite der Theorie, logisch klar strukturierte Darstellung der Theorie und so weiter ständig versucht und durchgeführt. All diese gehören, in Kuhns Terminus, zu einer Normalwissenschaft.

Eine Normalwissenschaft ist nicht statisch, sondern dynamisch. Eine Theorie *wird* immer. Anders ausgedrückt, sie ist immer in Entwicklung begriffen und steht nicht still. Dieses Werden hört erst dann auf, wenn die Theorie durch eine grundsätzlich andere Theorie ersetzt wird, z.B. durch eine wissenschaftliche Revolution. Wenn man in einem physikalischen Lehrbuch vom 18ten Jahrhundert liest und dann dies mit der Physik am Ende des 19ten Jahrhunderts vergleicht, und zwar mit Lagrangescher und Hamiltonscher Mechanik, wird man zwischen diesen eine große Verschiedenheit beobachten, und man könnte in diesem Vergleich *zwei* unterschiedliche physikalische Theorien identifizieren. Meine These hier ist, daß zwischen Diskontinuität in einer wissenschaftlichen Revolution und Kontinuität der Akkumulation innerhalb einer Normalwissenschaft kein klarer Gegensatz besteht.

Ein weiteres Problem ist durch folgende Fragen gegeben: Wie kann die Korrespondenzrelation begründet werden? Wenn man die Frage, ob der im Übergang $S \rightarrow L$ erhalten gebliebene Teil S^* auch beim nächsten Theoriewechsel $L \rightarrow M$ Gültigkeit behält, beantworten will, stößt man auf dieses Problem.

Zweierlei sind als Antwortmöglichkeiten zu erwägen. Erstens, die Annahme, daß die wissenschaftlichen Theorien die Realität beschreiben und erklären, macht das AKorr stärker. Eine bessere Theorie bedeutet dann eine bessere Verbindung zwischen Theorie und Realität. Der erfolgreiche Teil der alten Theorie, S^* , soll dann natürlich bewahrt bleiben, weil er über die Realität etwas Wahres sagt. Die neue Theorie L müßte deswegen S^* ohne Verlust erben, möglicherweise durch eine Übersetzung, falls die Theorieänderung durch irgendwelche Änderungen in der Sprache begleitet sein sollte. Durch die sukzessiven Theoriewechsel und -änderungen sollen die Theorien die Realität immer genauer und effizienter beschreiben und erklären. Das meint Popper mit Verisimilitude. Radder (1991) findet in den Auffassungen des AKorr von Post (1971) und Krajewski (1977) eine wissenschaftsphilosophische Hintergrundthese, die er den *konvergenten Realismus* nennt⁸⁷. Das Thema von wissenschaftlichem Realismus diskutiere ich hier jedoch nicht weiter.

Die zweite mögliche Antwort lautet, daß die Korrespondenzrelation die Trägheit in der Theorie widerspiegelt, oder anders formuliert, die Trägheit in den wissenschaftlichen

⁸⁷ Siehe Radder (1991), 220f.

Tätigkeiten der Forschung und der Theoriekonstruktion. Dabei ist jedoch bemerkenswert, daß nicht nur der Erfolg der alten Theorie sondern auch oft der unerfolgreiche Teil von der neuen Theorie geerbt wird⁸⁸.

2.4. Relata in der Korrespondenzrelation

Das Problem, was die Relata von der Korrespondenzrelation sind, ist eng mit der Frage verbunden: Was ist eigentlich die Korrespondenzrelation? Wie wir gesehen haben, unterscheidet Radder (1991) zwischen zwei Fragen: Eine Frage ist, ob ein Theoriewechsel wissenschaftstheoretisch nach dem Schema der Korrespondenzrelation rekonstruiert werden kann, eine andere Frage ist es, ob das Korrespondenzprinzip im Prozeß der Konstruktion einer neuen Theorie heuristisch von Nutzen ist. Die zweite Frage ist weiter in zwei Teilfragen zu analysieren: Erstens, ob das Korrespondenzprinzip in einem schon geschehenen Theoriewechsel faktisch als Heuristik genutzt wurde, und zweitens, ob [und eventuell auch wie] dieses Prinzip in einer Theoriekonstruktion nützlich wirken kann.

Um die Frage beantworten zu können, welche die Relata für die Korrespondenzrelation sind, kann man zunächst die folgende Frage stellen: Was *kann* die Nachfolgertheorie in einem Theoriewechsel von der Vorgängertheorie erben. Eine Variante dieser Frage ist, was von der alten Theorie nach dem Theoriewechsel übrig bleiben kann.

Aufgrund dieser ersten Fragen kommen eine Reihe von Kandidaten für die Relata der Korrespondenzrelation in Betracht. Sie sind: 1) wissenschaftliche Termini und Begriffe, 2) numerische Werte in quantitativen Aussagen und Vorhersagen, 3) mathematische Formeln und Gleichungen, 4) metatheoretische Prinzipien wie z.B. Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien, 5) wissenschaftliche Probleme. Als erste Bemerkung können wir feststellen, daß diese Kandidaten einander nicht ausschließen.

Die Kandidaten werden geprüft, ob sie als Relata der Korrespondenzrelation geeignet sind. Man kann dafür bei jedem Kandidaten folgende Fragen stellen: Erstens, ob es wissenschaftstheoretisch betrachtet Sinn macht zu sagen, daß die Nachfolgertheorie diese Relata von der Vorgängertheorie erbt (f1), und zweitens ob es heuristisch nützlich sein kann, daß die neue Theorie diese Komponente von der alten Theorie erbt, oder daß sie sich diese zu erben bemüht (f2). (f2) wird weiter detailliert, nämlich, ob es für *post hoc* Kontrolle (f21), und ob es in der Konstruktionsphase einer neuen Theorie nützlich ist (f22).

⁸⁸ Post (1971, 225 fn) schreibt: There are, of course, flaws which have not been removed. Indeed, some have been inherited by successive theories. The inability of classical electrodynamic theory to deal with the motion of a charged particle in a field shows its incompleteness. This flaw has never been removed. In my view quantum mechanics is unsatisfactory because many such classical flaws are compounded in it.

1) Wissenschaftliche Termini und Begriffe

Zunächst brauchen wir eine weitere Unterscheidung zwischen Termini ohne Berücksichtigung der Begriffsintension, nämlich Termini als bloß fachlichen Wortschatz und Termini zusammen mit Begriffsintension. Das erstere nenne ich Termini und das letztere die Begriffe. Es geschieht in der Tat sehr oft, daß L Termini von S übernimmt. Kuhn meinte in *SSR*:

Since new paradigms are born from old ones, they ordinarily incorporate much of the *vocabulary* and apparatus, both conceptual and manipulative, that the traditional paradigm had previously employed.⁸⁹ (149, Hervorhebung von I.Ko)

Damit wird (f1) positiv beantwortet. Für die Begriffe sieht es jedoch problematischer aus, durch das Kriterium von (f1) durchzukommen. Der Grund ist, daß Begriffsverschiebungen ein allgemeines Phänomen in einem Theoriewechsel sind. Die Verschiebung kann minimal sein. Aber man kann sich auch solche radikale Verschiebung vorstellen, daß der Begriffsumfang von einem Terminus in L und der Umfang von demselben Terminus in S nicht einmal überlappen.⁹⁰

Üblich ist in der Formulierung einer neuen Theorie, daß neue Begriffe auftauchen, die in der alten Theorie nicht zu finden waren. Dabei werden aber viele alte Termini auch in der neuen Theorie ihren Platz finden. Im heuristischen Sinne (f2) scheint es jedoch zwecklos, sich darum zu bemühen, den alten Terminus in der neuen Theorie weiter zu behalten.

⁸⁹ Kuhn (1970), 149. Auffällig ist, daß Kuhn hier als Hintergrund dieses Erbzusammenhangs die Verbindung von L gegenüber S in der Genese von L nennt. Natürlich bemerkenswert ist dabei, daß bei Kuhn die alten Termini und Begriffe in einen *neuen* Zusammenhang zusammengefügt vorkommen werden. „But .. [w]ithin the new paradigm, old terms, concepts, and experiments fall into new relationships one with the other.“ (Ebd.)

⁹⁰ Es taucht dann hier ein weiteres Problem auf, daß man für sinnvolle *Verschiebung* eine gemeinsame Basis braucht, auf der man überhaupt sinnvoll von einer Verschiebung reden kann.

2) Numerische Werte

Zweitens kommen die numerischen Werte in quantitativer Aussage als Kandidaten vor. Bei Bohr (1923a) war die numerische Übereinstimmung von beiden Theorien im Grenzgebiet von zentraler Bedeutung für sein Korrespondenzprinzip, wobei er die Deutung des Korrespondenzprinzips ablehnte, daß die Korrespondenz als 'sich annähern' von zwei 'Theorien' zu verstehen ist.

Numerische Werte können in dem Sinne geeignete Relata sein, daß sie unabhängig von der möglichen Begriffsverschiebung von der neuen Theorie übernommen werden können. Numerische Werte sind anders gesagt Zahlen, meistens begleitet von den Maßeinheiten. Sie genießen besonderes Status, das heißt, die Zahl, und weiter auch die uninterpretierte Mathematik an sich, leistet die gemeinsame Basis von den quantitativen Wissenschaften.

Bezüglich (f2) wird der zweite Kandidat deutlich positiv bewertet. Das heißt, es scheint sinnvoll, wenn eine neue Theorie so aufgebaut wird, daß sie die gleichen numerischen Werte produziert, mit denen die alte Theorie eine exakte Leistung brachte. Aber die numerischen Werte können prinzipiell nur *post hoc* zur Kontrolle der Übereinstimmung berücksichtigt werden (f21). Man kontrolliert nämlich, ob die neue Theorie so entsteht, daß sie die mit der alten Theorie übereinstimmenden *quantitativen* Aussagen oder Vorhersagen macht, wo sich die alte Theorie empirisch erfolgreich erwiesen hat. Währenddessen ist die Aussicht für (f22) schlecht. Übereinstimmung in den numerischen Werten kann jedoch zum Beispiel in der Weise in der Theoriekonstruktion mitberücksichtigt werden, daß physikalische Konstanten weiterhin in der neuen Theorie auch die gleichen Werte wie in der alten Theorie einnehmen.

Hier sind drei Punkte noch zu beachten. Erstens kommen die numerischen Werte offensichtlich nur in den Wissenschaftsbereichen als Relata anwendbar vor, in denen die Theorie weitgehend in mathematisierter Form aufgebaut ist. Ihre Aussicht als Relata ist deswegen schlechter, wenn man zum Beispiel im größeren Gebiet der Biologie die Anwendung des Korrespondenzprinzips sehen möchte, in dem die Theorie (noch) wesentlich schwach von Mathematisierung geprägt ist. Vielleicht ist die Quantifizierungsmöglichkeit eine schwächere Bedingung, die viel allgemeiner als Mathematisierung in den Wissenschaften zu finden ist. Wenn die Korrespondenz in den numerischen Werten nur auf der Ebene der 'Zahl' beschränkt betrachtet wird, und die mathematische Hintergrundstruktur nicht miteinbezogen wird, dann kommt die numerische Korrespondenz in allen Wissenschaftsgebieten möglich vor, in denen sich überhaupt quantitative Aussagen machen lassen.

Zweitens, eine Quantität kann nur als Relata einer Korrespondenzrelation sinnvoll einbezogen werden, wenn diese Quantität in beiden Theorien begrifflich einen gemeinsamen Bezug hat. Wenn in einer neuen physikalischen Theorie der empirisch bewährte Wert für

Lichtgeschwindigkeit $2,998 \times 10^8 \text{ m/sec}$ durch Korrespondenzprinzip weiter bewahrt werden sollte, dann müßte die Quantität $2,998 \times 10^8 \text{ m/sec}$ auch in der neuen Theorie die Lichtgeschwindigkeit heißen, wenn dieser Wert dort auch in anderer Weise als in der herkömmlichen Theorie gemessen oder berechnet würde. In diesem Sinne fordert der Kandidat 'numerische Werte' die Korrespondenz des Begriffs als Voraussetzung. Aber diese Bedingung, Korrespondenz des Begriffs, läßt sich nicht unbedingt im strengen Sinne von genauer Übereinstimmung des Begriffsumfangs verstehen. Vielmehr genügt für sie das Überlappen der Umfänge des Begriffs⁹¹, auf den sich der numerische Wert bezieht. Das bedeutet, daß die Korrespondenz in dem numerischen Werte mit der Begriffsverschiebung kompatibel ist.

Drittens, kann man noch einen weiteren Schritt machen, und sehen, daß hinter der Übereinstimmung eines numerischen Wertes oft die mathematische Struktur steht, zum Beispiel zwei Gleichungen, die diese Übereinstimmung herbeiführen. Wenn sich in den beiden Theorien, S und L, übereinstimmende Voraussagen über den Wert, zum Beispiel, von den Frequenzen der Spektrallinien von X gemacht werden, heißt das, daß in beiden Theorien jeweils eine mathematische Struktur zu finden ist, beispielsweise eine Formel, aufgrund derer man die in Frage stehende Frequenzzahl berechnet. Man findet in dieser Weise einen weiteren Kandidat für die Korrespondenzrelation: die Formel.

3) Mathematische Formel, insbesondere Gleichungen

Wir kommen nun zum dritten Kandidaten: mathematische Formel, oder 'operationale Gleichungen' (*operational equations*) von Fadner (1985). Wir haben oben gesehen, (1) daß die numerischen Werte wichtige Elemente sind, die in der Konstruktion der neuen Theorie heuristisch zum *post hoc* Überprüfen einer Hypothese, Annahme, oder Teiltheorie benutzt werden können; und (2) daß für die Korrespondenz in numerischen Werten möglicherweise die mathematische Struktur als Grundlage vorliegt, damit die Übereinstimmung der Zahlen kein Zufall wird. Korrespondenz in den operationalen Gleichungen bildet eine hinreichende Bedingung für die Korrespondenz in den entsprechenden numerischen Werten. Fadner (1985) formuliert das AKorr wie folgt in einem Satz:

The operational equations of any new theory *must reduce*, within the appropriate accuracy, to the corresponding operational equations of a well-established previous theory in the „regions“ where the previous theory is *well supported by data*. (832, Hervorhebung von I.Ko)

⁹¹ In der numerischen Korrespondenzrelation in Bohr (1920) waren *zwei* verschiedene Begriffe verwickelt, ω und ν , und nicht *ein* Begriff. Aber die beiden bezogen sich im Sinne des Bohrschen Korrespondenzprinzips auf die Schwingungszahl der spektralen Strahlung. Dies läßt sich auch als ein Fall von Überlappen des Begriffsumfangs deuten.

Ein Beispiel nimmt er in kinematischer Energie in der klassischen Mechanik und in der Spezial Relativitätstheorie, das wir in Abs. 2.3. sahen. Die kinetische Energie in relativistischer Mechanik ist:

$$K_{\text{rel}} = mc^2 - m_0c^2,$$

wobei m die relativistische Masse und m_0 die Ruhemasse ist. Wenn man hier folgendes Verhältnis einfügt,

$$m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

dann ergibt sich für die Grenzbedingung $v/c \rightarrow 0$ das Ergebnis der klassischen Mechanik⁹²:

$$K = \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

In diesem Beispiel erkennt man aber deutlich, daß die oben dargestellte Korrespondenzrelation die Annäherung in nur einer Richtung sichert. Man kann bei der relativistischen Energie starten und durch Annäherung unter bestimmter Bedingung die klassische Energie ausrechnen, aber der Vorgang in umgekehrter Richtung ist nicht möglich. Die Korrespondenz im obigen Fall ist deswegen im Prinzip nur zum *post hoc* Überprüfen zu nutzen, weil ein Vergleich erst dann geschehen kann, wenn zwei Sachen zum Vergleichen vorliegen.⁹³ Trotzdem wird die Aussicht dieses Kandidaten für den konstruktiven Einsatz in Theoriebildung (f22) nicht völlig ausgeschlossen. Dies geschah ständig in der frühen Quantentheorie, wo man mit dem Bohrschen Korrespondenzprinzip beschäftigt war.

Im November 1925 schreibt Pauli an Bohr, und er diskutiert über die Modifikation der gerade entwickelten Heisenbergschen Quantentheorie.

Welche Grundlagen der Heisenbergschen Theorie soll man nun modifizieren? [...] Nun ist es zwar der einfachste Ansatz und auch im Hinblick auf die asymptotische Übereinstimmung mit der klassischen Theorie im Grenzfall großer Quantenzahlen natürlich, *zunächst für die Energiefunktion $H(p, q)$ stets die klassische Form anzusetzen*. Man kann aber daran denken, im Hinblick auf den Zwang und den anomalen Zeemaneffekt [...] andere Funktionen $H(p, q)$ als die klassische einzuführen. (Brief vom 17. Nov. 1925, Hervorhebung von I.Ko)⁹⁴

Wiederholt zu betonen ist, daß das Ansetzen einer klassischen Form in die quantentheoretische Gleichung *nicht* den erfolgreichen Weg zur neuen Theorie *garantiert*. Der nächste Absatz, der in einem Lehrbuch der Quantenphysik zu finden ist, ist hier relevant und einleuchtend.

⁹² $K = \frac{1}{2} m_0 v^2 [1 + \frac{3}{4} (\frac{v}{c})^2 + \frac{5}{8} (\frac{v}{c})^4 + \dots]$

⁹³ Die klassische Form der kinetischen Energie kann prinzipiell in der Konstruktion der relativistischen Form der kinetischen Energie berücksichtigt worden sein. Aber sie muß unter mehreren, jedoch in beschränkter Zahl möglichen Formen zu finden gewesen sein.

⁹⁴ *PauliWB*, 259.

[The correspondence principle] places a constraint, we may say, on possible new theories, but it should not be thought that it determines these uniquely. There can be no rules for „quantization“, i.e., there can be no prescription for how one passes from a classical description to a quantum-mechanical description. [...] It is obviously makes no sense to say: „In order to find the *correct* (quantum-mechanical) equations it is necessary first to state the *wrong* (classical) equations, after which one passes from the *wrong* equations to the correct equations by a certain magical operation.“ (Wichmann (1967), 349)

Nein, es handelt sich weder um irgendwelche Notwendigkeit noch um eine metatheoretische Norm, daß man für die Konstruktion einer Theorie immer mit der (falschen, oder nur begrenzt korrekten) alten Theorie anfangen und erst daran anschließend zur neuen Theorie übergehen solle. Vielmehr geht es um solche Situationen, bei denen man innerhalb des Aufbaus der neuen Theorie in eine Lage gerät, wo man nicht mehr weiß, wie man weitergehen soll. Die neue Theorie an sich ist noch nicht so weit konstruiert, daß sie selber für ihre Konstruktion die Anweisung geben kann. Es sähe vielleicht wie eine Sackgasse aus, oder man könnte vor vielen möglichen Wegen stehen, unter denen einer ausgewählt werden müßte. Wenn man sich ausschließlich an die Korrektheit der neuen Theorie stützen will, kann man nichts anfangen, weil einfach die neue Theorie noch nicht da ist. Zu bemerken ist hier, daß man dieser Situation in der frühen Entwicklungsphase einer neuen Theorie ständig begegnet. Der Sinn des Korrespondenzprinzips darin ist, daß man in solcher Situation versucht, ein altes, aber empirisch bewährtes Stück (zum Beispiel, eine klassische Form von Hamiltonian) in die Lücke der aufzubauenden neuen Theorie (zum Beispiel, die Heisenberg-sche Quantentheorie) einzusetzen. Sehr oft braucht man dort eine Korrektur oder eine schlaue Variante des alten Stückes. Die guten Physiker wären vielleicht diejenigen, die solche Arbeit tüchtig ausführen.

Die Methode von Trial-and-Error wirkt in gewisser Weise auch dabei. Aber es handelt sich hier um eine verfeinerte Trial-and-Error-Methode. Der konstruktive Einsatz des Korrespondenzprinzips für die Formulierung der Hypothese, zum Beispiel in der Form einer Formel, bedeutet nicht den blinden sondern den gezielteren '*Trial*', und die *post hoc* Kontrolle über die Korrespondenz der quantitativen Ergebnisse ermöglicht eine effizientere Bewertung über die Versuche, oder anders formuliert, es ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Beurteilung der Frage, ob und wie der Versuch fehlerhaft gewesen ist oder nicht.

4) Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien

Als vierter Kandidat werden die Prinzipien berücksichtigt, wie die Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien. Die Energieerhaltung oder Erhaltung des Impulses, oder der Parität, und

Berücksichtigung der Symmetrie gehören wohl zu den wichtigsten Punkten in den theoretischen Überlegungen eines Physikers. Wenn zum Beispiel in einem Phänomen der Energieerhaltungssatz anscheinend verletzt ist, dann wird von einem Physiker nicht zuerst der Energieerhaltungssatz in Frage gestellt. Vielmehr wird der Physiker sich zunächst darum bemühen, diese *Panne* durch eine mögliche Reparatur in der Theorie zu beheben. Man kann auch versuchen, eine physikalische Quantität so zu definieren, daß sie einem gewünschten Invarianzprinzip unterliegt.⁹⁵

Die Invarianzprinzipien und Erhaltungssätze *können* in eine neue Theorie der Physik vererbt werden (f1), was eigentlich für einen Physiker keine unerwartete Sache wäre. Aber die Schwäche dieses Kandidaten liegt darin, daß die Prinzipien auf der metatheoretischen Ebene sind, und zwar, meist nicht direkt auf die Ebene der Phänomene bezogen. Wenn einmal diese Prinzipien einander widersprüchlich würden, dann kommt die Frage auf, welche erhalten werden sollen und welche geopfert werden können.⁹⁶ Deswegen wird es gefährlich, wenn man ein bestimmtes Invarianzprinzip oder einen Erhaltungssatz in neuer Theorie *um jeden Preis* durchsetzen will. Im folgenden Beispiel sieht man einen solchen Konflikt. In einem Brief an Kramers kritisiert Pauli das nicht erfolgreiche Projekt von Bohr, Kramers, und Slater wie folgt:

BKS Abhandlung (1924) bewegt sich in einer falschen Richtung: nicht der Energiebegriff ist zu modifizieren, sondern der Bewegungs- und der Kraftbegriff. (27. Juli 1925, Pauli WB I, 233, Hervorhebung im Original)⁹⁷

Die Bemühung, ein bestimmtes Invarianzprinzip in der neuen Theorie auch geltend zu machen, kann sich als heuristisch sinnvoller Zug erweisen (f2). Dennoch sind Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien in den physikalischen Wissenschaften vielmehr als Leitlinie in den theoretischen Überlegungen und nicht in erster Linie als Relata in einem Korrespondenzprinzip aufzufassen.

⁹⁵ Ein Beispiel findet man im nächsten Satz aus einem bewährten Lehrbuch in der Physik: „We now look for a definition of momentum which is Lorentz invariant.“ (Kittel et al.(1965), 384)

⁹⁶ Zu beachten ist, daß z.B. die Perspektive für Energieerhaltung und die für Erhaltung des Impulses nicht immer zu einigen sind.

⁹⁷ In diesem Zitat ist formuliert worden, als ob hier verschiedene *Begriffe* in Frage kommen; jedoch erinnern wir uns hier, daß in der Debatte um die BKS Theorie die Frage zentral stand, wie eigentlich auch in diesem Brief von Pauli, ob man in der Physik auf den *Energieerhaltungssatz* verzichten würde oder nicht.

5) Probleme

Zuletzt treten die Probleme als Kandidaten auf, mit welchen die Wissenschaftler in einem Fachgebiet beschäftigt sind und sich anhand der Theorien um deren Lösung bemühen. Am Anfang ist anzumerken, daß ein Disziplinbereich die den Bereich charakterisierenden Probleme als Forschungsthemen hat. Es gibt solche Probleme, die in einem Disziplinbereich über Generationen als beinahe ewige Probleme bestehen. Solche Probleme sind meistens die Probleme, die für den Bereich konstitutiv sind, wie zum Beispiel folgende Fragen für den Bereich der Atomphysik: „Wie ist die innere Struktur der Atome, und wie sind die Wechselwirkungen unter den Bestandteilen eines Atoms?“ In dieser Weise betrachtet ist es kein Wunder, daß manche Probleme einen Theoriewechsel in dem Disziplinbereich überleben.

Nicht nur der erfolgreiche Teil der Vorgängertheorie sondern auch die ungelösten Probleme werden übertragen. Post (1971) meint zu diesem Punkt:

The inability of classical electromagnetic theory to deal exactly with the motion of a charged particle in a field shows its incompleteness. This flaw has never been removed. In my view quantum mechanics is unsatisfactory because many such classical flaws are compounded in it. (225)

Die Probleme werden von der alten in die neue Theorie übertragen. In erster Linie sind sie die Probleme, die noch im Umfang der alten Theorie als Problem festgestellt wurden jedoch mittels ihrer nicht zu lösen waren. Aber ein Teil von den schon längst gelösten Problemen kann auch überliefert werden, nämlich als bewährtes Exemplar. Solange dieses Problem noch im Umfang der neuen Theorie als ein Problem vorkommt und die neue Theorie noch keine Ersatzlösung bietet, wird das alte Problem zusammen mit der alten Lösung den Theoriewechsel überleben.

Auch nach einem sehr weitreichenden und tiefgehenden Wandel auf einem Gebiet beschäftigen sich die Wissenschaftler nicht nur mit den neuen Problemen, die mit der neuen Theorie in den Forschungsbereich aufgekommen sind, sondern auch hier und da mit den Problemen, mit denen die Wissenschaftler vor dem Theoriewechsel beschäftigt waren. Dies spiegelt auch die folgende Tatsache wider, daß die wissenschaftlichen Probleme zu den konstitutiven Elementen eines Disziplinbereichs gehören. Ein Theoriewechsel findet auch aufgrund einer Reihe von Problemen statt, die eigentlich in der alten Theorie aufkamen jedoch nicht gelöst werden konnten. Wenn die neue Theorie, die diese Probleme lösen kann, die alte Theorie ersetzt, nennt man das einen Theoriewechsel. Dargestellt in dieser Weise, kommt das Folgende einer *notwendigen* Bedingung für einen Theoriewechsel gleich: Die Vorgängertheorie und die Nachfolgertheorie haben mindestens ein Problem gemeinsam. Die Ptolemaiossche Astronomie beschäftigte sich mit dem Problem, wie die Bewegungen

von Sonne, Mond und Sternen zu erklären sind, während sich die Keplersche Astronomie, grob formuliert, auch eigentlich mit dem selben Problem beschäftigte. Noch eine Bemerkung möchte ich hier hinzufügen, daß nämlich die Korrespondenz in den operationalen Gleichungen nur unter Voraussetzung der Bewahrung der bezogenen Probleme als relevant angesehen wird.

Es scheint üblich zu sein, daß die neue Theorie die von der Vorgängertheorie offensichtlich nicht erfolgreich behandelte Probleme aufgreifend ihren Auftritt ankündigt, wie zum Beispiel das Problem der Stabilität des Atoms und das Phänomen der Linienspektren bei der frühen Quantentheorie. Aber es ist auch hier und da der Fall, daß die neue Theorie auf das alte Problem wieder in neuer Weise eingeht, wo die alte Theorie auch eine systematische Erklärung für das Problem angeboten hat. Die Sauerstofftheorie versuchte einen neuen Zugang zu dem alten Problem der Verbrennung, der anders als bei der Phlogistontheorie war. In diesem Sinne kommen die wissenschaftliche Probleme als gut qualifizierte Relata für das AKorr.

Die Diskussion über die Relata-Kandidaten zusammenfassend, möchte ich nochmals aus der Perspektive der vorhin gestellten Fragen, (f1) und (f2), auf die Kandidaten zurückblicken. Die Fragen waren, (f1) ob es wissenschaftstheoretisch betrachtet Sinn macht, daß die Nachfolgertheorie diese Relata von der Vorgängertheorie vererbt bekommt, (f2) ob es heuristisch nützlich ist, daß die neue von der alten Theorie diese Komponente erbt, oder zu erben bemüht ist. Man kann (f2) weiter in zwei Teilfragen analysieren: (f21) ob es für *post hoc* Kontrolle, und (f22) ob es in der aktiven Konstruktionsphase nützlich ist.

Erstens sind die *Termini* wenig interessant, obwohl sie in jedem Theoriewechsel zumindest zum Teil geerbt werden. Die *Begriffe* machen für (f1) Sinn, jedoch erscheint diese Variante nicht wesentlich interessanter als die *Termini*. Die *Begriffe* bleiben vielleicht zum mehr oder weniger großen Teil so wie sie waren, jedoch wäre dies schwer anders als die Trägheit zu interpretieren, ist also heuristisch wenig relevant. Aber die Korrespondenz in *Termini* bzw. *Begriffe* kommt als eine Vorbedingung für die zweite Korrespondenzrelation vor, der Korrespondenz in den numerischen Werten. Zweitens kommen die *numerischen Werte* als Relata-Kandidaten in der Hinsicht sowohl von (f1) als auch vom heuristischen Nutzen sinnvoll vor, obwohl dieser Nutzen wesentlich auf dem *post hoc* Überprüfen beschränkt ist. Im Vergleich dazu kommen die dritten Kandidaten, die *Formeln* oder die *operationalen Gleichungen*, die das Kriterium von (f1) problemlos befriedigen, im *post hoc* Überprüfen jedoch schwächer, wie wir im Paulis Beispiel betrachtet haben, in der aktiven Konstruktionsphase nützlicher vor. Die vierten Kandidaten, die *Prinzipien* wie die Erhaltungssätze und Invarianzprinzipien, möchte ich hier nicht näher diskutieren, weil sie als Relata-Kandidaten zu wenig konkret zu sein scheinen. Fünfte Kandidaten waren Probleme.

Die wissenschaftlichen Probleme werden geerbt, und solche Kontinuität in den Problemen ist auch die Basis für die Korrespondenz in den numerischen Werten und in der mathematischen Struktur. Jedoch scheint mir, daß es begrifflich kaum Sinn macht, die alten Probleme zu einem heuristischen Nutzen in der neuen Theorie zu bewahren, denn die Probleme sind meist zu allererst gegeben unter den Bedingungen in der Theoriendynamik und man hat dort kaum Spielraum bezüglich der Frage, ob ein Problem als Problem weiter anerkannt wird oder nicht.

In der vorherigen Diskussion über die Relata der Korrespondenzrelation zeichnen sich die numerischen Werte und die operationalen Gleichungen als beste Kandidaten ab. Vor allem scheinen sie aus folgenden zwei Gründen für Relata geeignet: Erstens, man kann aufgrund dieser Relata konkret beobachten bzw. kontrollieren, ob und wie die Korrespondenz zwischen zwei Theorien stattfindet. Zweitens, diese Relata können weitgehend unabhängig von einer Begriffsverschiebung berücksichtigt werden. Wenn es sich um solche Wissenschaftsgebiete handelt, in denen wie in der Physik die quantitativen Aussagen maßgebend sind, erscheint es sinnvoll, sich darum zu bemühen, die neue Theorie so zu konstruieren, daß sie mit den empirisch bewährten quantitativen Vorhersagen übereinstimmende Vorhersage machen kann, oder daß sie unter geeigneten (Grenz-) Bedingungen eine empirisch bewährte alte Formel als ein Grenzfall von einer ihrer Formeln erweisen kann.

2.5. Das AKorr als Heuristik und als wissenschaftstheoretische Rekonstruktion

In seinem Buch *Correspondence Principle and Growth of Science* (1977) schreibt Krajewski, "I believe the Correspondence Principle to be a basic principle of the progress of contemporary physics and, probably, of every advanced science." (*Preface*, Hervorhebung von I.Ko) Hier ist mit dem Korrespondenzprinzip offensichtlich nicht das von Bohr gemeint, bei dem es sich spezifisch um den Zusammenhang zwischen Quantenmechanik und klassischer Physik handelt, sondern ein AKorr, das in allen Phasen der Theoriendynamik die Geltung in Anspruch nehmen soll. Um über diese Krajewskis Prognose eine richtige Stellungnahme machen zu können, müßte man zunächst klar begriffen haben, was das (allgemeine) Korrespondenzprinzip heißt. Damit meine ich nicht, daß wir nach langen und vielseitigen Diskussionen bisher über das AKorr zurück zu einem Nullpunkt zurückgehen sollen, sondern ich möchte hier bloß eine zentrale Frage um das AKorr aufgreifen.

In der vorhergehenden Diskussion über das AKorr wurde die Notwendigkeit zur Unterscheidung von zwei Kontexten unübersehbar, in welchen das (allgemeine) Korrespondenzprinzip aufkommt. Die Unterscheidung, die mir als unerläßlich für die Ordnung in der

ganzen Debatte um das AKorr vorkommt, ist zwischen dem heuristischen Nutzen des Korrespondenzprinzips und dem AKorr als eine Formulierung des Ergebnisses von wissenschaftsphilosophischen Überlegungen.

Bei Post ist von dem AKorr der heuristische Aspekt deutlich hervorgehoben worden, obwohl es ihm nicht gelungen ist, eine tatsächlich in der Forschung anwendbare Heuristik zu bieten. Das AKorr als Heuristik wird in dem Sinne interessant, daß es sich im Aufbau einer (neuen) Theorie als nützlich erweist. Für den Status dieses heuristischen Prinzips argumentierte Post, daß die Konstruktion einer Theorie im Sinne des AKorr durchgeführt werden *soll*, oder anders formuliert, in der Weise, daß das Ergebnis der Konstruktion einer neuen Theorie der Forderung des AKorr nachkommt.

Eine Heuristik kann jedoch auch ohne erfolgreiche Resultate auskommen, das heißt, sie kann versagen. Heuristik kann einen Wissenschaftler in eine Richtung führen, so daß er in einer dunklen Situation oder in einer Sackgasse systematische Versuche machen kann. Sie bietet eine Wegweisung an, jedoch prinzipiell keine theoretische Rechtfertigung für das Ergebnis.⁹⁸ Die folgende Behauptung ist unbegründet, daß sich eine solche Theorie, die einem heuristischen Prinzip wie dem Korrespondenzprinzip treuer als die andere Theorie gefolgt ist, in einer Konkurrenzsituation notwendigerweise als die bessere Theorie, und folglich als die Siegertheorie, abzeichnen würde. Cushing (1994) macht uns darauf aufmerksam, daß in der Geschichte der Quantenmechanik gerade der Gegenteil der Fall gewesen sei:

Both Bohr and Bohm did use such heuristic guidelines [i.e. correspondence principle] to generate quantum mechanics from classical mechanics. [...] However, [...] the „successful“ Copenhagen version of quantum mechanics has far fewer (conceptual *or* formal) characteristics in common with classical mechanics than does the not generally accepted, causal quantum mechanics of David Bohm. [...] Unfortunately, the competitor that adhered more strongly to this aspect of Post's correspondence principle has lost out. (5-6)

Cushing meint, daß dieses Beispiel zeigt, in der Theoriekonstruktion den heuristischen Leitlinien (wie dem Korrespondenzprinzip) genauer zu folgen bedeute nicht den Erfolg einer so konstruierten Theorie. Die Frage, ob eine Theorie heuristischen Leitprinzipien gut gefolgt hat, ist kein geeignetes Kriterium in einer Theoriewahlsituation.⁹⁹

⁹⁸ Vgl. Briefwechsel zwischen Pauli und Bohr im Jahr 1925 (PauliBW).

⁹⁹ Es erscheint klar, daß Cushing hier Post nicht ganz zu Recht kritisiert, weil Posts Korrespondenzprinzip nicht mit der Theoriewahl sondern der Theoriekonstruktion zu tun hat. Jedoch ist Cushingsche Bemerkung im obigen Kontext relevant.

Ein heuristisches Prinzip hilft einem Forscher in einem neuen Gebiet zu einem Versuch. Der Versuch kann erfolgreiche Ergebnisse ergeben, aber möglicherweise endet er ohne Ergebnis. Wie im Falle des BKS-Projektes kann ein Versuch nach einem heuristischen Prinzip eine Reihe von Schlußfolgerungen ergeben, die untereinander konsistent sind. Dank einer experimentellen Widerlegung ging jedoch eine so systematisch konstruierte Theorie, die BKS Theorie für die atomischen Strahlungen, zugrunde. Dies besagt dennoch nicht, wie vorher diskutiert, daß das heuristische Prinzip, das im Hintergrund dieses Versuchs war, falsch und unbrauchbar war. Daß man trotz dieses Falles auf das Korrespondenzprinzip auch nach 1925 immer noch nicht gänzlich verzichtete, und daß es auch weitere Erfolge als Heuristik gebracht hat, haben wir schon betrachtet. Solche Flexibilität in dem Korrespondenzprinzip als Heuristik paßt auch damit gut zusammen, daß es in der Quantentheorie nicht in einer definitorischen Form ausgedrückt wurde. Wenn es auch klar und unumstritten erscheinen würde, daß dies und jenes von der alten Theorie in der Nachfolgertheorie zu bewahren ist, besagt es noch gar nicht *wie* das erfolgen sollte.

Währenddessen kann eine Korrespondenzrelation auch in anderer Weise beobachtet werden, nämlich, indem man ein Stück Wissenschaftsgeschichte auf einem Gebiet sorgfältig untersucht. Wenn man zu der Erkenntnis kommt, daß bestimmte Elemente der Errungenschaft der alten Theorie auch in der nächsten Generation jenes Disziplinbereichs bewahrt worden sind, dann könnte man dort einen Kontinuitätsaspekt analysieren und ihn aus der Perspektive eines AKorr ausdrücken. Kuhn (1970) macht es deutlich, daß sich immer mindestens ein Teil der alten Errungenschaft als permanent erweisen werde (p.25). „Als permanent“ möchte ich hier nicht im Sinne von „auf ewig“ oder „in *allen* nachfolgenden Theorien“ sondern zunächst vorsichtiger im Sinne von „bewahrt in *der* Nachfolgertheorie“ deuten. Wie radikal auch ein Theoriewechsel im ersten Augenblick erscheinen mag, so kann man viele Gemeinsamkeiten zwischen der Vorgängertheorie und der Nachfolgertheorie feststellen, wenn man nur nah und lang genug diesen Wechsel untersucht.

Zwei Kontexte sollen auseinandergehalten werden, AKorr als heuristisches Prinzip und AKorr als wissenschaftsphilosophische Rekonstruktion. Das Korrespondenzprinzip als Heuristik in der Quantentheorie trat nicht von vornherein logisch gut begründet auf, sondern es bestätigte sich als gut, indem man mittels dieses Prinzips effizient und zuverlässig brauchbare Resultate erzielen konnte, und zwar auf dem Wege der Konstruktion einer neuen Theorie, damals der Quantentheorie. Bei der Korrespondenz als Resultat einer wissenschaftsphilosophischen Analyse (aufgrund der wissenschaftshistoriographischen Untersuchung) sieht es anders aus. Hier wird die Korrespondenz zwischen zwei Theorien analysiert, und zwar, *wie* genau die Korrespondenzrelation in dem gegebenen Fall besteht, und wie die Kontinuität dort inoffiziell aussieht.

Nicht alle Aspekte der Korrespondenz, die heute durch nachträgliche wissenschaftshistoriographische bzw. wissenschaftsphilosophische Analyse über die Geschichte der Quantenmechanik gewonnen werden können, erkannten die Physiker am Anfang dieses Jahrhunderts beim Aufbau der neuen Theorie. Andererseits kann eine analoge Übertragung einer Formel aufgrund heuristischer Überlegungen später aus einem wissenschaftsphilosophischen Standpunkt möglicherweise nur noch wenig interessant erscheinen. Im Fall des Bohrschen Korrespondenzprinzips Anfang der 20er Jahre ging es meines Erachtens in erster Linie, jedoch nicht ausschließlich, um die Heuristik. Nicht ausschließlich in dem Sinne, daß bei Bohr die theoretische Einsicht über den Zusammenhang, wie die neue Theorie aussehen soll, so tiefgreifend war, daß er in dem Korrespondenzprinzip mehr als ein heuristisches Instrument für *probeweise* Versuche in der Konstruktion der Quantentheorie sah. Das Korrespondenzprinzip spielte auch die Rolle eines Kontrollmechanismus, und dies bedeutet, daß das Korrespondenzprinzip über seinen heuristischen Aspekt hinaus einen deutlich normativen Aspekt besaß.

Die Unterscheidung zwischen Heuristik und wissenschaftsphilosophischer Rekonstruktion ist mit einer anderen, bei Meyer-Abich (1965) eingeführten¹⁰⁰ Unterscheidung zwischen einem deskriptiven und präskriptiven Korrespondenzprinzip zu vergleichen. Bei Meyer-Abich besagt das Bohrsche Korrespondenzprinzip einerseits eine „Praeskription, aus den Erfolgen der klassischen Theorie über ihre Grenzen hinaus zu lernen“(91). Es ist eine Anweisung: „Entwickle die Quantentheorie durch Hervorhebung ihres Gegensatzes zur klassischen Theorie!“ (92). Andererseits gab „Bohrs deskriptives Korrespondenzprinzip zur Aufdeckung einer Anzahl neuer Zusammenhänge Anlaß“(93), und zwar trug es in hohem Maße dazu bei, daß man die in sich zusammenhängende Struktur der neuen Theorie durchschauen konnte. Meyer-Abich befindet sich mit dieser Unterscheidung bei der Perspektive der Wissenschaftler, die gerade eine neue Theorie konstruieren. In diesem Sinne läßt sich Meyer-Abichs Unterscheidung von zwei Kontexten als eine Subklassifikation vom heuristischen Kontext des Korrespondenzprinzips betrachten, jedoch nicht in einem engen Sinne sondern in einem erweiterten Sinne der Heuristik, weil der deskriptive Aspekt bei ihm über den eigentlichen heuristischen Zusammenhang hinausgeht.

Im Folgenden der vorliegenden Arbeit wird die Korrespondenz prinzipiell auf dem Kontext der wissenschaftsphilosophischen Rekonstruktion beschränkt diskutiert. Zwei Bemerkungen zu diesem Punkt: Erstens, bedarf das Korrespondenzprinzip in einem rein heuristischen Kontext eigentlich keiner Begründung, während für die Korrespondenz als ein allgemeiner Aspekt der Theoriendynamik eine wissenschaftstheoretische Begründung verlangt wird, und zwar unabhängig davon, ob es sich um deskriptives oder normatives Korre-

¹⁰⁰ Er meinte damit jedoch nicht explizit eine Klassifikation. Siehe Meyer-Abich (1965), 91ff.

spondenzprinzip handelt. Zweitens, kann die Korrespondenzrelation zwischen der Vorgänger- und der Nachfolgertheorie erst dann umfangreich betrachtet werden, wenn auch die Nachfolgertheorie entwickelt worden ist, das heißt, wenn die bewegliche Entstehungsphase der neuen Theorie, in der die Heuristik eine bedeutsame Rolle spielt, im wesentlichen vorbei ist.¹⁰¹

2.6. Kritische Diskussion des AKorr

Feyerabend erwähnt in seinem *Against Method* (1975) in einer Fußnote den Aufsatz von Post (1971). „The reader is urged to read his brilliant essay as a partial antidote against the point of view which I try to defend.“(61) Man findet aber schon früher in seinem wichtigen Aufsatz „Erklärung, Reduktion und Empirismus“(1962)¹⁰² eine kritische Position, die sich als eine Gegenargumentation gegen die Idee des allgemeinen Korrespondenzprinzips betrachten läßt. Feyerabend argumentiert, auf der Theoriekonstruktion folgende Forderung aufzustellen sei nicht zu rechtfertigen:

Nur jene Theorien sind (zur Erklärung oder Voraussage) in einem gegebenen Bereich zulässig, die entweder die dort bereits verwendeten Theorien *enthalten* oder zumindest mit ihnen *verträglich* sind. (85)

Diese Bedingung drückt offensichtlich die These von dem AKorr aus.¹⁰³ Feyerabend (1962) argumentiert gegen sie aus mehreren Gründen, darunter erscheinen folgende zwei Punkte zentral. Erstens passe sie nicht mit den Fakten in der Wissenschaftsgeschichte zusammen, und zweitens, schließe sie wertvolle Prüfungen der neuen Hypothesen von vorn herein aus und verringert dadurch den empirischen Gehalt der Theorien. Sie trage in der Weise nicht zur pluralistischen Vermehrung der Theorien¹⁰⁴ bei, sondern wirke in die Gegenrichtung.

Sein Argument, daß diese Forderung nicht mit den Fakten aus der Wissenschaftsgeschichte zusammenpasse, scheint empirisch gut belegbar zu sein. Man könnte zum Beispiel

¹⁰¹ Damit wird jedoch nicht argumentiert, daß der normative Aspekt der Korrespondenz mit dem heuristischen Nutzen des Korrespondenzprinzip nichts zu tun hat. Im Gegenteil, je konkreter und spezifischer ein normatives AKorr formuliert werden kann, desto stärker wird dann die heuristische Anwendung des AKorr unterstützt.

¹⁰² Feyerabend (1962). Zitat (und Seitenangabe) in diesem Abschnitt ist aufgrund der deutschen Fassung gemacht: Feyerabend (1981), 73-125.

¹⁰³ Sie werde auch, meint Feyerabend, von vielen Physikern ohne weitere Überlegung akzeptiert.

¹⁰⁴ Siehe Abs. 5.1.2. dazu.

allein in der Geschichte der Entstehung der Quantenmechanik mehrere Szenen finden, in denen diese Forderung nicht erfüllt war. Das Bohrsche Korrespondenzprinzip, das im letzten Kapitel untersucht wurde, paßt eigentlich nicht gut zu dem Schema der obigen Forderung. Sein Atommodell von 1913 erfüllte diese Bedingung nicht. Durch die Korrespondenz auf dem Grenzgebiet, $n \rightarrow \infty$, wurde zwar eine theoretisch kaum begründete Verknüpfung zwischen seiner neuen Atomtheorie und der klassischen Physik aufgestellt. Jedoch spricht diese Verbindung nicht für einen Enthaltenszusammenhang oder Verträglichkeit zwischen den beiden.¹⁰⁵

Es ist ein schwieriges Thema, wie hier das Enthaltensein und die Verträglichkeit genau definiert werden sollen. Zunächst könnten sie jeweils als logische Ableitbarkeit und Widerspruchsfreiheit in der (möglichen) Gesamtheorie gedeutet werden. Hierbei ist zu beachten, daß die Verträglichkeit eine notwendige Bedingung für die Enthaltensrelation ist, und umgekehrt die erstere eine hinreichende Bedingung für die letztere. Wenn aus der neuen Theorie (unter geeigneten Bedingungen) die alte Theorie abgeleitet werden kann, oder wenn man die neue Theorie zumindest ohne logischen Widerspruch mit der alten Theorie nebeneinander stellen kann, dann heißt es, die im obigen Zitat aufgestellte Bedingung wird erfüllt. Diese Bedingung wird eigentlich als nicht nur harmlos, sondern als durchaus vernünftig angesehen. Man müßte sich nur einen Fall vorstellen, wo diese Bedingung nicht erfüllt wird. Wenn die neue Theorie nicht einmal mit der herkömmlichen Theorie logisch kompatibel erscheint, dann wird es in dem Disziplinbereich problematisch. Dann müßte man auf eine von den beiden Theorien verzichten — wahrscheinlich auf die alte Theorie. Oder sonst wird man irgendwo in der gesamten Theorie, das heißt in der Gesamtheit von beiden Theorien, einen logischen Widerspruch haben. Wenn man dies als etwas Unerwünschtes ansieht, dann ist die obige Forderung eine Selbstverständlichkeit. Aber was selbstverständlich ist, ist nicht selten zugleich uninteressant. Uns interessieren solche Situationen, in denen eine *neue* Theorie eingeführt wird, die wesentlich *anders* als die alte ist. Vor einer solchen Situation muß ein Stadium gewesen sein, in dem man eine Notwendigkeit gesehen oder gespürt hat, daß man eine neue Theorie braucht. Das heißt, die alte herkömmliche Theorie erschien in bestimmter Hinsicht unbefriedigend. Wenn es sich jedoch um den Bereich handelt, in dem die alte Theorie empirisch ausgezeichnete Leistung brachte, dann sieht die Lage um die Forderung anders aus.

Ich wende mich wieder der Frage zu, wie das Enthaltensein und die Verträglichkeit zu deuten sind. In Feyerabends Formulierung der Bedingung soll 'dort bereits verwendet' offensichtlich 'dort bereits *erfolgreich* verwendet' heißen. Wenn die neue Theorie zum

¹⁰⁵ Im Kapitel 5 werde ich die Korrespondenzrelation zwischen zwei *nicht miteinander verträglichen Theorien* darstellen.

Beispiel ein von der empirisch als erfolgreich erwiesenen Voraussage der alten Theorie wesentlich abweichendes Ergebnis impliziert, und in diesem Sinne eine Unverträglichkeit mit der alten Theorie zeigt, dann scheint es in dieser Situation vernünftig zu sein, die neue Theorie zumindest nicht in dem vollen Umfang zu akzeptieren, wie sie vorgelegt worden ist. Sie müßte in dem problematischen Punkt korrigiert werden. Aber das ist offensichtlich auch nicht der Fall, der von Feyerabend in seinem Text problematisiert wird. Er geht dort von einem logisch-begrifflichen Problem aus. Die Bedingung heißt dann, man dürfe in einem gegebenen Bereich keine neue Theorie einführen, die aus der Sicht der dort schon verwendeten Theorie unverständlich (begrifflich) oder inakzeptabel (wegen eines logischen Widerspruchs) ist. Und gegen diese Bedingung argumentiert Feyerabend, daß doch Fälle in der Wissenschaftsgeschichte zu finden sind, wo sich das Gegenteil ereignete.

Was würde das AKorr über dieses Problem sagen? Meiner Ansicht nach gehen Posts Argument für AKorr und die Feyerabendsche Kritik an der genannten Bedingung im wesentlichen vorbei. Posts Startpunkt ist das Erkennen des *Mangels* in der alten Theorie, wo sie versagt, und der Schlußpunkt seines AKorr ist, wo die neue Theorie L die Bedingung $S^* \subset [T]L$ erfüllt. Post meint in diesem Sinne, daß die heutige Quantenmechanik weiter entwickelt werden müsse, so daß sie diese noch nicht erfüllte Bedingung doch zu erfüllen vermag.

Jedoch bestehen hier Probleme, wenn man sie wirklich in einer Situation, wo eine Entscheidung für oder gegen eine neue Theorie (oder Hypothese) fallen soll, anwenden möchte. Denn die neue Theorie kann zum Zeitpunkt einer solchen Entscheidung kaum eine Aussicht darüber erreicht haben, ob sie letztendlich diese Bedingung erfüllen wird oder nicht. Die Entscheidung kann erst dann fallen, wenn die neue Theorie in ein System entwickelt worden ist. Diese Bedingung aufzustellen bedeutet nicht nur eine Maßnahme, die den empirischen Gehalt der Theorie verringert und deshalb nicht empfehlenswert ist, sondern eigentlich eine Überforderung für eine neue Hypothese, die neu aufgestellt worden ist.

Im letzten Kapitel haben wir gesehen, daß das Korrespondenzprinzip auch die Rolle eines Filters spielt, wodurch eine Hypothese als inakzeptabel abgelehnt oder zumindest zur Modifikation zurückgewiesen werden kann, zum Beispiel, wenn eine direkte Schlußfolgerung aus ihr, in Form einer quantitativen Aussage, eine markante Diskrepanz gegenüber der alten Theorie zeigt, und zwar, wo diese empirisch exakte Leistung gezeigt hat. Aber ein Punkt muß hier geprüft werden, ob diese Hypothese für den gerade problematisierten Phänomenbereich, in dem die alte und die neue Theorie in Konflikt kommen, zuständig sein soll. Das Ablehnen einer neuen Hypothese durch die Filterung aufgrund der empirisch bewährten alten Theorie ist nur dann gerechtfertigt, wenn die Hypothese in dem Gegenstandsbereich angewendet wird, in dem sie die alten bewährten Ergebnisse widersprechende Aussage hervorbringt.

In *Against Method* nimmt Feyerabend das Korrespondenzprinzip in der Quantenmechanik als ein Thema und kritisiert es in Verbindung mit dem *ad hoc*-Charakter in der heutigen mathematischen Physik:

Ad hoc approximations abound in modern mathematical physics. They play a very important part in the quantum theory of fields and they are an essential ingredient of the correspondence principle. At the moment we are not concerned with the reasons for this fact, we are only concerned with its consequences: *ad hoc* approximations conceal, and even entirely eliminate, qualitative difficulties. They create a false impression of the excellence of our science. (63-64, Unterstreichung von mir)

Er behauptet hier, daß das Korrespondenzprinzip in der neuen Physik zum Verbergen ihrer qualitativen Schwierigkeiten gedient habe, indem es durch die *ad hoc* Approximation eine verkleidete Kontinuität zwischen zwei eigentlich inkommensurablen Theorien vor Augen brachte. Daß diese Bemerkung nicht das von uns im letzten Kapitel betrachtete Korrespondenzprinzip trifft, wird auch schon in Feyerabends eigenen Zeilen desselben Werks deutlich, wenn er den Leser auf die Bohrsche Bemerkung über ‘das Korrespondenzprinzip als ein quantentheoretisches Gesetz’ aufmerksam machte, die wir bereits betrachteten.¹⁰⁶

Durch das Korrespondenzprinzip wurde nicht argumentiert, daß die alte und die neue Theorie in einer Kontinuitätsrelation in dem Sinne stehen, daß jene aus dieser deduzierbar sei, und zwar nicht einmal auf dem Grenzgebiet.¹⁰⁷ Vielmehr hat das Korrespondenzprinzip eine Funktion, wie wir im vierten und fünften Kapitel diskutieren werden, die den Übergang zwischen zwei inkompatiblen Theorien regelt.

Nachdem in diesem Kapitel verschiedene Auffassungen des AKorr betrachtet worden sind, scheint dem AKorr nur wenig Chance dafür übrig geblieben zu sein, daß es sich in einer definitiven Form als eine in der Theoriendynamik allgemein gültigen These erweist. Erstens als eine präskriptive Version des AKorr, zum Beispiel in der Form „Die neue Theorie *muß* konstruiert werden, so daß sie die folgende Forderung erfüllt!“, findet meines Erachtens weder eine gute wissenschaftsphilosophische Begründung, noch stimmt sie mit den Tatsachen der Wissenschaftsgeschichte überein. Eine einigermaßen plausible Geschichte im Sinne dieser Forderung könnte vielleicht nur durch eine nachträgliche, vom AKorr geprägte wissenschaftstheoretische Rekonstruktion geschrieben werden. Eine solche Rekonstruktion verliert dennoch ihr Kraft als eine wissenschaftstheoretische These angesichts eines klaren Fallbeispiels aus der Wissenschaftsgeschichte, in dem diesem Prinzip offensichtlich nicht

¹⁰⁶ Siehe Abs. 1.2.1.

¹⁰⁷ Wir werden sehen, dies heißt, daß sie im Feyerabendischen Sinne inkommensurabel sind.

gefolgt wurde. Zweitens, wenn es um den deskriptiven Aspekt des AKorr geht, erscheint das AKorr als eine These über den *Enthaltenszusammenhang* oder die *globale* Verträglichkeit aufgrund der wissenschaftshistoriographischen Berücksichtigung aussichtslos, wie es auch durch Feyerabends Kritik sichtbar wurde. Drittens, das Problem der Begriffsverschiebung, wie insbesondere von Kuhn in seiner Paradimenttheorie aufgezeigt wurde, liegt dem AKorr als ein Hindernis vor. Eine sinnvolle Version des AKorr müßte jedoch damit umgehen können. Wenn, grob formuliert, der Begriff A in der neuen Theorien nicht dasselbe Ding wie in der alten Theorie *bedeutet*, dann hat man eine grundlegende Schwierigkeit, in einem vernünftigen Sinne das Folgende zu sagen: Ein bestimmter Teil der Theorie über A ist in der alten Theorie und auch in der neuen Theorie bewahrt worden.¹⁰⁸

Wenn man unter dem AKorr ein über die triviale Aussage „Die neue Theorie bewahrt *irgendwas* von ihrer Vorgängertheorie, in *irgendeiner* Form.“ wesentlich hinausgehende These versteht, dann ist man meines Erachtens nicht in der Lage, ein solches Prinzip in einer konkreten Formulierung zu bieten. Eine Möglichkeit für das AKorr besteht dann nur noch in Form einer Empfehlung für die Forscher zum AKorr *als eine praktische Heuristik beziehungsweise als Kontrollmechanismus* (z.B. für neue Hypothesen). Diese Empfehlung bedeutet jedoch keine explizit formulierte und in der Forschung Erfolg garantierende Wegweisung dafür, wie man die neue Theorie konstruieren soll und was man nicht darf. Für solche Bedeutung des (allgemeinen) Korrespondenzprinzips steht die in den Wissenschaften allgemeine Situation, daß eine neue Theorie in ihrer Genese und Entwicklung durch solche Phasen durchgehen muß, in der sie außer der zu dem Zeitpunkt noch gängigen alten Theorie keine andere Stütze zur Verfügung hat. Und möglicherweise auch dort, wo die neue Theorie ihre eigene Lücke auszufüllen versucht, wie im Falle der Quantenchaosforschung, tritt der heuristische Nutzen des Korrespondenzprinzips nochmals auf.

Das AKorr im Sinne einer heuristischen Empfehlung zu analysieren hat meines Erachtens in einer wissenschaftsphilosophischen Untersuchung eine Grenze. Damit ist erstens gemeint, daß eine solche Empfehlung mal stark und mal gering in der Forschung hervorgehoben werden kann, und eine solche Fluktuation in der Forschungspraxis prinzipiell nicht wissenschaftstheoretisch zu regulieren ist. Zweitens, wenn auch das Bohrsche Korrespondenzprinzip als ein Leitprinzip in der Forschung aufgestellt würde, gibt es viel verschiedene Wege, die Forschung *im Sinne des Korrespondenzprinzips* voranzutreiben. In der Debatte zwischen Heisenberg und Pauli um die Bedeutung des Korrespondenzprinzips war dies deutlich zu beobachten.

¹⁰⁸ Dieses Problem wird bei J.F. Rosenberg in folgender Form ausgedrückt: „Surely, there must then be *something* invariant between the two theories. What could this be, if not meaning?“ (1980, 381, Hervorhebung von Rosenberg)

In den weiteren Überlegungen über das Korrespondenzprinzip im Kapitel 4 und 5 werde ich den Aspekt des Korrespondenzprinzips als eine Wegweisung in den Forschungen abstrahieren, und dann die *Korrespondenz* überwiegend als ein in der Theoriendynamik beobachtbares Phänomen behandeln. Dann werde ich diskutieren, welche wissenschaftsphilosophische Implikationen eine solche Korrespondenz hat. Es wird dort gefragt: Was bedeutet das für die Theoriendynamik, *wenn* die Korrespondenzrelation in einem Theoriewechsel beobachtet wird?

Zum Schluß dieses Kapitels möchte ich an dieser Stelle eine Klassifikation für verschiedene Modi von Korrespondenz einführen, welche ich in meiner Diskussion im 4. Kapitel gebrauchen werde. Es ist für die Korrespondenz zwischen zwei Theorien zwischen folgenden drei möglichen Modi zu unterscheiden: *Enthaltens-*, *Überlappens-*, und *Berührungsmodus*.¹⁰⁹ Die Korrespondenz in dem *Enthaltensmodus* heißt, daß die neue Theorie die alte Theorie als ein Spezialfall oder Grenzfall enthält. Korrespondenz in diesem Modus impliziert dann weiter, daß die alte Theorie in jeder Zeile und in allen Implikationen mit der neuen Theorie logisch kompatibel auftreten wird. In diesem Fall wird kein inneres Konsistenzproblem wegen des noch bewahrten alten Elements innerhalb der neuen Theorie vorkommen. Berücksichtigen wir hier noch unsere Diskussion über die Relata der Korrespondenzrelation, dann können wir uns mehrere mögliche Enthaltensmodi vorstellen, zum Beispiel einen Enthaltenszusammenhang mit Begriffen als Elemente dieses Enthaltenszusammenhangs, oder mit numerischen Werten, und so weiter.

Der *Überlappensmodus* wird festgestellt, wenn die Korrespondenz nur auf einem Teil der alten Theorie stattfindet, anders ausgedrückt, wenn die neue Theorie nur einen Teil von (der Errungenschaft) ihrer Vorgängertheorie bewahrend oder rekonstruierend auftritt. Wie in dem letzten Modus bestehen in diesem Modus auch mehrere Möglichkeiten, je nach den Relata der Korrespondenzrelation.

Der letzte Modus der Korrespondenz, der *Berührungsmodus*, beinhaltet, daß die neue Theorie mit einem Teil der Vorgängertheorie *asymptotische* Übereinstimmung zeigt. Das heißt, in diesem Modus geschieht streng genommen kein Überlappen zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie, sondern sie begegnen sich nur annäherungsweise. Dieser Modus ist als Grenzfall des Überlappensmodus anzusehen. In diesem Modus scheinen nicht alle Relata dafür geeignet zu sein, um ihn geltend zu machen. Numerische Werte und die Formel (*operational equations*) scheinen hier geeignete Relata zu sein, während zum Beispiel die Begriffe dafür nicht geeignet erscheinen. Zu beachten ist hier, daß ein Korrespondenzmodus mit bestimmten Relata (z.B. Berührungsmodus mit Formel als Relata) nicht unbedingt einen anderen Korrespondenzmodus (z.B. Überlappensmodus mit Begriff als

¹⁰⁹ Siehe weitere Diskussion im Abs. 4.3.

Relata) ausschließt, sondern mit ihm kompatibel ist. Den Zusammenhang zwischen den letzten beiden Modi werde ich im Kapitel 4 weiter diskutieren.

Was ich mit dieser Klassifikation beabsichtige, ist das Folgende: Verzicht auf einen Korrespondenzmodus, z.B. den Enthaltensmodus, soll nicht den Ausschluß der gesamten Modi der Korrespondenz bedeuten. Wenn man zum Beispiel auf die Postsche Auffassung des AKorr verzichten müßte, die eigentlich für den Enthaltensmodus der Korrespondenz argumentiert, muß man nicht auf das ganze AKorr überhaupt verzichten, sondern die anderen Auffassungen, die andere Modi als den Enthaltensmodus aufzeigen, können weiter berücksichtigt werden. Meines Erachtens, wie ich im 4. und 5. Kapitel weiter diskutieren werde, kommen diese zwei Modi, und insbesondere der Berührungsmodus, eigentlich in der Theoriendynamik interessant vor, während der Enthaltensmodus im allgemeinen Kontext der Theoriendynamik nicht vertretbar erscheint.

Die letzte Bemerkung in diesem Abschnitt ist, daß nicht jedes Paar mit zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Theorien in einem und demselben Sinn Vorgänger- und Nachfolgertheorie genannt werden können. Nachfolgertheorie heißt, wie ich diesen Begriff verstehe, daß sie in der Tat sowohl im positiven als auch im negativen Sinne auf dem Boden der Vorgängertheorie entstanden und entwickelt worden ist. Das heißt, Nachfolgertheorie ist eine Theorie, die aufgrund der Unzulänglichkeiten der alten Theorie initiiert und auf den Bemühungen zur Beseitigung dieser Unzulänglichkeiten entwickelt worden ist. Das AKorr, das in den ersten Abschnitten dieses Kapitels betrachtet wurde, kann für den Zusammenhang zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie angewendet werden. Währenddessen, wenn eine neue Theorie T_2 weitgehend ohne direkten Zusammenhang mit der alten Theorie T_1 auf dem selben Disziplinbereich entstanden ist, dann ist der Standpunkt eines AKorr dort deutlich weniger bedeutsam. Für eine solche T_2 , die man eine Herausforderertheorie mit unabhängiger Genese nennen könnte, wäre die heuristische Rolle des Korrespondenzprinzips mit Bezug auf T_1 sicher geringer zu bewerten.

3. Komplementarität

Unter den technischen Termini, die in einem Fachgebiet vorkommen, gibt es denjenigen Begriff, der mit der Zeit, in der Entwicklung der Theorie, den Status eines *terminus technicus* gewonnen hat. Ein solcher Begriff wird oft vom Alltagszusammenhang her, oder auch von einem eng oder locker benachbarten Fachgebiet her, in die (sich langsam entwickelnde) Theorie hineingezogen, anfangs oft ohne klare Bestimmung, und erst in einer späteren Phase der Theorieentwicklung erhält er eine neue definitorische Bestimmung, und so einen neuen, anderen Platz als in der Alltagssprache oder in dem benachbarten Gebiet. Viele basale Begriffe in den Naturwissenschaften können in diese Kategorien eingeordnet werden: Materie, Masse, Länge, Fläche, Kraft, Impulse und so weiter. Wenn es sich aber hier um die „Komplementarität“ als einen fachspezifischen Begriff¹¹⁰ handelt, scheint diese Darstellung nicht geeignet zu sein. „Komplementarität“ tauchte zum ersten Mal in einem Vortrag auf, und zwar in einem spezifizierten Kontext. Dies war von dem Atomphysiker Niels Bohr in Como, Italien, im September 1927. In dieser Weise wurde die Komplementarität als ein *terminus technicus* in die Physik eingeführt. „Komplementarität“ war damals keine neu zusammengesetzte Vokabel, wurde jedoch in dem Como Vortrag in einem bestimmten Zusammenhang gebraucht, und spielte seitdem für eine Weile die Rolle eines Fachbegriffes in der Atomtheorie¹¹¹.

In diesem Fall ist die Deutung naheliegend, daß dieser Begriff so konzipiert und eingeführt wurde, daß er in einem bestimmten Problemkontext des Fachfeldes eine bestimmte Rolle spielen sollte. Eine historische Untersuchung in einer längeren Zeitspanne des Begriffsgebrauchs, in der man die Textstelle und deren Zusammenhänge vergleicht und analysiert, scheint in diesem Falle deutlich weniger geeignet zu sein, anders als für die Begriffe wie „Materie“ oder „Masse“. Es scheint in diesem Falle vernünftig, sich zunächst auf folgende Fragen zu konzentrieren: Erstens, in welchem Kontext der Problemsituation der Begriff eingeführt wurde. Zweitens, welche Rolle von ihm in *dem* Kontext eigentlich erwartet wurde, bzw. wie und inwieweit er diese Rolle in der Tat spielte.

In diesem Kapitel wird der Komplementaritätsbegriff betrachtet. Ich versuche zunächst, diese eben genannten Fragen zu beantworten. Weiter möchte ich auch untersuchen, welche Bedeutung der Komplementaritätsbegriff in der Entwicklung der Quantenmechanik

¹¹⁰ Sie war in der Tat ein fachspezifischer Begriff, und zwar in der Physik, nicht Philosophie oder Wissenschaftstheorie.

¹¹¹ Diese Beschreibung müßte jedoch durch eine Bemerkung ergänzt und eingeschränkt werden, daß die Komplementaritätsthese vom Bohrschen Como Vortrag damals auffällig wenig direkte Wirkung im Kreis der Physiker außerhalb der Kopenhagener Gruppe vorbrachte.

hatte. In Abs. 3.1. wird die Konkurrenzsituation zwischen zwei verschiedenen Versionen der Quantentheorie, der Heisenbergschen Matrizenmechanik und der Schrödingerschen Wellenmechanik¹¹², im Zeitraum von 1925 bis 1927 kurz geschildert. Aus dieser Konkurrenzsituation wurde die Idee der Komplementarität geboren.

Ein Standardbeispiel von der Komplementaritätsrelation ist zwischen dem Korpuskel- und Wellenbild des Lichts (beziehungsweise der Materie) zu beobachten¹¹³. Es ist interessant zu bemerken, daß diese komplementären Bilder jeweils in der Heisenbergschen Matrizenmechanik und der Schrödingerschen Wellenmechanik der jeweiligen Vorstellung entsprechende mathematische Struktur gefunden haben. Die Schrödingers Wellenmechanik wurde gleich nach ihrer Entstehung als eine ernsthafte Konkurrenz zu der damaligen Quantentheorie anerkannt. Diese Quantentheorie verdankte ihre Gestalt zum erheblichen Teil der Arbeit der Kopenhagener Gruppe um Niels Bohr, und sie trat gerade nach dem Auftritt der Heisenbergschen Matrizenmethode in eine neue Phase. Die durch den Heisenbergschen Beitrag aufgetretenen neuen theoretischen Ansätze führten in den Jahren 1925-1927 zu einer sehr intensiven und tiefgreifenden theoretische Überlegung von Bohr über die gesamte Lage der Atomtheorie.

Durch die Wellenmechanik, so hoffte Schrödinger, könnte der aus der klassischen Perspektive unverständliche Quantensprung aus der Physik überhaupt eliminiert werden. So ist die Schrödingersche Wellenmechanik in den Jahren 1926-1927 nicht nur eine Konkurrenz zur Heisenbergschen Methode, sondern gegen die damalige Quantentheorie an sich. 1927 wurde Heisenbergs Aufsatz der „Unbestimmtheitsrelation“¹¹⁴ publiziert. In ihm wollte er seine frühere Matrizenmechanik mit der Anschaulichkeit ergänzen, die in der ersten Version seiner Matrizenmechanik nicht berücksichtigt wurde. Er stellte 1927 das Atom als ein aus den von statistischen Gesetzen beherrschten Korpuskeln bestehendes System dar. Matrizenmechanik an sich war eigentlich nicht korpuskular, sie war 1925 eine rein mathematische Methode ohne Berücksichtigung einer physikalischen Interpretation. Aber der Aufsatz Heisenbergs (1927) wurde im starken Konkurrenzgeist gegen die Wellenmechanik geschrieben¹¹⁵, und seine Matrizenmechanik bekam ein deutliches Korpuskularbild.¹¹⁶

¹¹² Als diese entstand, hieß sie nicht ‘Quantentheorie’. Schrödinger und die Physiker, die auf der Seite seiner Wellentheorie standen, glaubten, daß diese Theorie nicht nur gegen die Heisenbergsche Auffassung der Quantentheorie aufgrund der Matrixmethode, sondern eigentlich gegen die ‘Quantentheorie’ insgesamt, eine starke Konkurrenz ist und eine sinnvolle Alternative bedeutet.

¹¹³ Siehe weiter Abs. 3.4.1. für diese Komplementaritätsrelation.

¹¹⁴ Heisenberg (1927a).

¹¹⁵ Beller (1992) schreibt, „Heisenberg, who perceived Schrödinger’s wave-mechanics as a competing system, was avoiding wave-theoretical concepts at any price.“ (275) Hier darf man im Auge behalten, daß damals, obwohl die mathematische Äquivalenz zwischen zwei Theorien schon von beiden Seiten erkannt und auch bewiesen wurde, die Spannung zwischen denen bezüglich der physikalischen Interpretation kaum geringer geworden ist.

3.1. Ein Blick in die Hintergrundsituation: Heisenbergs Matrixmechanik und Schrödingers Wellenmechanik

Im September 1924 kam Heisenberg für einen halbjährigen Aufenthalt nach Kopenhagen. Er blieb bis April 1925 in Bohrs Institut. Als er in Kopenhagen ankam, war die BKS Abhandlung¹¹⁷ schon publiziert, aber noch nicht die Widerlegung von Bothe und Geiger. Bohr war mit dem Polarisationsproblem des Fluoreszenzlichtes beschäftigt und Kramers arbeitete noch an seiner Dispersionstheorie. Wie Pais berichtet¹¹⁸, hatte die Kramersche Dispersionstheorie bzw. die Zusammenarbeit mit ihm eine entscheidende Bedeutung für den Aufbau Heisenbergscher Quantenmechanik. In dem Aufsatz „Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“ (1925), wo man eigentlich den Anfang der Quantenmechanik als eine Alternative- und Nachfolgertheorie der klassischen Mechanik findet, die nicht mehr als eine entwickelte und variierte Form von der letzteren angesehen werden soll, versuchte Heisenberg, „Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.“ (Heisenberg (1925c), 879, Hervorhebung von I.Ko) Ich möchte zunächst im gerade genannten Aufsatz verfolgen, wie der Abschied von der alten Quantentheorie und der Übergang zur neuen Quantenmechanik geleitet wurde.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z.B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z.B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. (879)

Im zitierten Absatz aus der ersten Seite des Aufsatzes wird der Grund, weshalb man eine andere neue Theorie als die Quantentheorie braucht, in folgenden, logisch aufgebauten Schritten dargestellt.

¹¹⁶ Eine andere traditionelle Interpretation für den Bohrs Komplementaritätsbegriff ist, daß er physikalische Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation sei. Diese Interpretation deckt jedoch nur sehr unzureichend den Umfang des Bohrschen Komplementaritätsbegriffs. Über den Zusammenhang zwischen dem Komplementaritätsbegriff und der Unbestimmtheitsrelation wird im Abs. 3.2.3. diskutiert.

¹¹⁷ Vgl. Abs.1.2.2.

¹¹⁸ Pais (1991), 273ff.

- *Prämisse 1*: Ein Problem, daß in der Theorie zur Berechnung *beobachtbarer* Größen die (Komponente von) prinzipiell *nicht beobachtbaren* Größen als wesentliche Bestandteile auftauchen.
- *Prämisse 1* : Dieses Problem könnte beseitigt werden, wenn die unbeobachtbaren Größen eines Tages beobachtbar werden.
- *Prämisse 1* : Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, ‘wenn die Rechenregeln zwischen den unbeobachtbaren Größen¹¹⁹ in sich konsequent und auf einen bestimmten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären’.
- *Prämisse 2*: Die Erfahrung zeigt jedoch, daß sich diese Rechenregeln in extrem begrenztem Umfang, und zwar nur in der Quantentheorie für das Wasserstoffatom ohne „gekreuzte Felder“, d.h. elektrische und magnetische Felder verschiedener Richtung, gültig erweist, und daß die Ausdehnung der Quantenregel auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen schlicht unmöglich erscheint.
- *Prämisse 2* : In den quantentheoretischen Regeln ist die Anwendung der klassischen Mechanik signifikant¹²⁰.
- *Schlußfolgerung*: „Bei dieser Sachlage scheint es geratener, jene Hoffnung auf eine Beobachtung der bisher unbeobachtbaren Größen (wie Lage, Umlaufzeit des Elektrons) ganz aufzugeben, gleichzeitig also einzuräumen, daß die teilweise Übereinstimmung der genannten Quantenregeln mehr oder weniger zufällig sei, und zu versuchen, eine der klassischen Mechanik analoge quantentheoretische Mechanik auszubilden.“

Man muß hier beachten, daß in diesem Heisenbergschen Aufsatz die *Quantentheorie* und die *Quantenmechanik* zwei verschiedene Sachen sein sollen. Heisenberg versucht dort nämlich einen Anfang für die letztere, die grundsätzlich in Kontrast mit der ersteren zu stellen sein soll. Im Schritt 2’ wird der Kontrastpunkt bezeichnet, daß die Anwendung der klassischen Mechanik in der (alten) Quantentheorie wesentlich war, jedoch müßte man jetzt eine ‘andere Mechanik’ aufbauen. In der Tat wirkte dieser Aufsatz, wie erwähnt, als die erste konzeptionelle Grundlage für die neue ‘Quantenmechanik’, und ihm folgten gleich eine Reihe weiterer Arbeiten auf diesem neuen Gebiet¹²¹.

Heisenbergs Quantenmechanik kann durch die Benutzung der Matrixtheorie gekennzeichnet werden. Interessant ist dennoch, daß Heisenberg im obigen Aufsatz noch nicht bewußt war, daß es in seiner Theorie gerade um die Matrizenmethode geht. Erst bei

¹¹⁹ Hier soll der Fall eingeschlossen sein zwischen einer beobachtbaren und einer unbeobachtbaren Größe.

¹²⁰ Dies heißt, ‘durch die Anwendung des Korrespondenzprinzips’.

¹²¹ Erwähnenswert sind insbesondere: Born/ Jordan (1925), Born/ Heisenberg/ Jordan (1925), und Pauli (1926).

Born und Jordan nach zwei Monaten, im September 1925, in ihrem nach Heisenbergs Ansatz entwickelten Aufsatz „Zur Quantenmechanik“ wurde klar, daß es als Grundlage der Heisenbergschen Quantenmechanik eine schon längst bestehende mathematische Methode gab, nämlich die Matrixanalysis. Bis in dem weiteren Aufsatz, „Zur Quantenmechanik. II“, der im November 1925 gemeinsam von Heisenberg, Born, und Jordan geschrieben wurde, bekam die neue Mechanik eine weit umfassendere mathematische Struktur aufgrund der Matrixanalysis. Die Quantenmechanik wurde auch durch die Beiträge von Pauli, Born, Jordan, Dirac u.a. schnell weiter entwickelt.

Eine andere Geschichte der Quantenmechanik¹²² begann im nächsten Jahr, 1926, mit Erwin Schrödinger. Angeregt von de Broglies Theorie der materiellen Welle und auch unter tiefgreifendem Einfluß von Einstein entwickelte er seine Wellenmechanik. Von Januar 1926 an publizierte Schrödinger im selben Jahr vier Aufsätze über die Wellenmechanik¹²³.

In dem Schrödingers Aufsatz „Quantisierung als Eigenwertsproblem“ (1926a), den er die erste Mitteilung nannte, arbeitete Schrödinger den Unterschied zwischen seiner Theorie und der Quantenmechanik klar heraus. Er möchte dort zeigen, „daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, *in der kein Wort von ganzen Zahlen mehr vorkommt.*“, (361, Hervorhebung von I.Ko) Er glaubte, mit seiner Theorie das schwierige Problem der Diskontinuität beseitigen zu können, die durch Bohrs Quantenhypothesen in die Grundlage der Quantentheorie eingeführt wurde, und die an dem Punkt des sogenannten Quantensprungs für viele Physiker in der Tat ein Rätsel wurde. Er benutzte auch den Ausdruck „Kontinuumstheorie“ für seine Theorie, als Gegensatz zu der „Diskontinuumstheorie“, womit Born und Jordan in ihrem Aufsatz Born et al.(1925) ihre Theorie bezeichneten.

Knapp zwei Monate nach der ersten Mitteilung folgte ein weiterer Beitrag in *Annalen der Physik*, in dem Schrödinger, getreu dem Titel, „Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen“, es veranschaulicht, das Verhältnis seiner Theorie zur Heisenbergschen Quantenmechanik thematisierte. Schrödinger versuchte dort zu zeigen, daß die zwei Theorien eigentlich mathematisch äquivalent sind, aber dennoch seine Wellenmechanik mit differentialer Gleichung als mathematisches Kernstück in vieler Hinsicht deutliche Vorteile gegenüber der Matrixmechanik aufweist. Heisenberg berichtete auch über die Vorteile des neuen Formalismus¹²⁴, daß man nach dem Schrödinger-

¹²² In diesem Satz wurde ‘Quantenmechanik’ im heutigen Sinne benutzt, das heißt, als die Quantenmechanik, die in sich sowohl die Heisenbergsche Matrixmechanik als auch die Schrödingersche Wellenmechanik einschließt. Man wird im folgenden sehen, daß 1926 die Quantenmechanik ein Gegenbegriff zur Schrödingerschen Wellenmechanik war, und zwar zumindest bei den Physikern, die auf der Seite der Wellenmechanik standen.

¹²³ Schrödinger (1926a), (1926b), (1926c), (1926d).

¹²⁴ Siehe Heisenberg (1969), 102ff.

schen Verfahren viele Rechnungen durchführen konnte, die in der Quantenmechanik außerordentlich kompliziert gewesen wären. Im Juni 1926 reichte Heisenberg bei der *Zeitschrift für Physik* einen Aufsatz¹²⁵ ein, in dessen einführendem Teil Heisenberg im gewissen Sinne eine Antwort auf Schrödinger (1926b) bot. Seine Reaktion hatte zwei Seite.

Erstens äußert sich dort Heisenberg anerkennend über den großen Fortschritt, der durch die Schrödingersche Theorie erzielt wurde, die von der de Broglieschen Wellentheorie der Materie ausgehend entwickelt wurde. Sie habe „mathematisch wesentlich bequemeren Zugang zum Gebiet der Quantenmechanik“ ermöglicht¹²⁶. Sie brachte formale Ähnlichkeit zwischen *Quantenmechanik* und *Wellenoptik* ans Licht, was zu einer sehr wirksamen mathematischen Behandlung quantenmechanischer Probleme führte¹²⁷. Soweit das Lob.¹²⁸

Andererseits, meinte Heisenberg, könnten Schrödingers Ansätze *keine konsequente Wellentheorie* im Sinne von de Broglie darstellen, denn „[d]er Übergang zum Raum von f Dimensionen und die Berechnung der Wellengeschwindigkeit aus der gegenseitigen potentiellen Energie von Partikeln bedeutet eine *Anleihe bei den Begriffen der Korpuskulartheorie*“ (Heisenberg (1926a), 412, Hervorhebung von I.Ko). Aber ein noch grundlegenderes Problem bestand darin, daß, wenn so eine konsequente Wellentheorie der Materie möglich würde, „dadurch kaum eine erschöpfende Beschreibung der atomistischen Vorgänge in unseren gewöhnlichen Raum-Zeitbegriffen gewonnen“ (Ebd.) wäre. Wie Heisenberg damals auf die Schrödingersche Wellenmechanik reagierte, schildert er selber in seinem Buch, *Der Teil und das Ganze* (1969), wie folgt:

Die Resultate, die Schrödinger auf diese Weise erhielt, paßten sehr gut zu den Ergebnissen der neuen Quantenmechanik. [...] Insofern waren wir über diese neue Entwicklung sehr glücklich, denn *unser Vertrauen in die Richtigkeit des neuen mathematischen Formalismus*¹²⁹ wurde dadurch erheblich gestärkt. [...] Die Schwierigkeiten begannen aber bei der physikalischen Interpretation des mathematischen Schemas. (102-103, Hervorhebung von I.Ko)

¹²⁵ Heisenberg (1926a).

¹²⁶ Man sieht hier deutlich, daß Heisenberg die Schrödingersche Wellenmechanik nicht als eine Konkurrenztheorie für die Quantenmechanik ansieht, sondern als einen neuen Teil von ihr bzw. eine weitere Methode für die Quantenmechanik.

¹²⁷ Heisenberg (1926a), 411.

¹²⁸ Heisenberg erwähnt es hier natürlich nicht, aber viele Physiker sahen in der Schrödingerschen Theorie einen deutlichen und auch wichtigen Vorteil. Schrödingers Wellenmechanik wurde damals von etlichen Physikern als eine Rettung aus der rätselhaften Situation um die ganze Quantentheorie angesehen. Für Heisenberg war sie jedoch keine Rettung, sondern bloß eine Irreführung. Siehe auch Pais (1991).

¹²⁹ Von der Quantenmechanik, nicht von der Schrödingerschen Wellenmechanik.

Trotz der von beiden Seiten klar anerkannten Äquivalenz aus mathematischer Sicht lag der Streitpunkt auf der Ebene der physikalischen Interpretation. Schrödinger wollte mit seiner Theorie verkündigen können, daß endlich die „so schwer verständlichen Unstetigkeiten wie „Quantensprünge“ und dergleichen“ (Heisenberg (1969), 103) aus der physikalischen Theorie verschwinden sollen, und auch können. Aber Heisenberg war anderer Meinung. Für ihn und die Kopenhagener Vorstellung lag diese Unstetigkeit der ganzen Atomtheorie zugrunde. Es war für ihn auch ein feststehender Grundsatz, den er durch viele Jahre der Zusammenarbeit und Auseinandersetzung mit Bohr, Pauli und andere erreicht hatte, daß eine anschauliche raum-zeitliche Beschreibung der Vorgänge im Atom nicht möglich wäre. In Heisenberg (1926a) beschließt er die Diskussion über die physikalische Seite dieser Auseinandersetzung mit folgenden Sätzen:

Doch sollen hier nicht länger die physikalischen Schwierigkeiten diskutiert werden, die beim jetzigen Stande der Theorie doch nicht gelöst werden können. Wir sind damit zufrieden, festzustellen, *daß das Schrödingersche Verfahren und die Quantenmechanik sich gegenseitig ergänzen*, sowohl in der mathematischen Durchführung wie in der Schöpfung anschaulicher Bilder und Analogien, die es uns ermöglichen, tiefer als bisher in das physikalische Wesen der Vorgänge in sehr kleinen Räumen einzudringen. (413, Hervorhebung von I.Ko)

Heisenberg erwähnte im obigen Zitat die sich ergänzende Rolle seiner Quantenmechanik und des Schrödingerschen Verfahrens. Die zwei Mechaniken bilden zwar Gegensätze, jedoch ergänzen sie sich darin, daß sie uns tieferes Eindringen in das physikalische Wesen auf der mikroskopischen Ebene ermöglicht. Dies ist als eine klare Vorstufe für die Komplementaritätsthese zwischen Heisenbergscher und Schrödingerscher Quantenmechanik zu deuten. Diesen Punkt werde ich in Abs. 3.4.2. näher diskutieren.

Bevor ich diesen Abschnitt abschließe, muß ich die krisenhafte, oder anders formuliert, die in eine Unruhe geratene Situation in der Quantenmechanik um die Jahre 1926 und 1927 schildern. Genauer gesagt, bestand diese Krise nicht auf der mathematischen Seite sondern auf der Ebene der physikalischen Interpretation der Quantenmechanik, das heißt, auf der konzeptuellen Ebene. Bohr war sich dieses Problems klar bewußt.

Im Mai 1926 nahm Heisenberg die Stelle als Lektor und Bohr-Assistent in Kopenhagen an. Nachdem Schrödinger ihn im Oktober 1926 auf Einladung von Bohr in Kopenhagen besuchte, wurde für Bohr und Heisenberg die physikalische Deutung der Quantenmechanik das zentrale Thema. Offensichtlich hinterließ Schrödinger und der erfolgreiche Auftritt seiner neuen Wellenmechanik eine tiefe Spur bei Bohr. Heisenberg (1969) berichtet über seine Gespräche mit Bohr. Er sagt, daß sie beide

die Lösung der Schwierigkeiten in etwas verschiedener Richtung suchten. Bohrs Bestrebungen gingen dahin, die beiden anschaulichen Vorstellungen, Teilchenbild und Wellenbild, gleichberechtigt nebeneinander stehen zu lassen,¹³⁰ wobei er zu formulieren suchte, daß diese Vorstellungen sich zwar gegenseitig ausschließen, daß aber doch beide erst zusammen eine vollständige Beschreibung des atomaren Geschehens ermöglichen. (109)

Heisenberg war dies nicht gerade angenehm. Er wollte davon ausgehen, daß sich die Quantenmechanik, als das Gegenstück zur Wellenmechanik, als *die* angemessene Theorie abzeichnen wird. Aber Borns Beitrag¹³¹, aus dem Jahr 1926, wo er Stoßprozesse nach den Schrödingerschen Methoden behandelte und wobei er auch die wichtige Hypothese über den Zusammenhang von der Schrödingerschen Wellenfunktion mit der probabilistischen Interpretation aufstellte, stärkte nochmals die wellenmechanische Seite. Durch die Bornsche Interpretation bekam das mathematische Verfahren von Schrödinger erst physikalisches Fleisch und Blut.

Im Frühling 1927, ein halbes Jahr vor dem Como Kongreß, wurde die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation geboren. Dieser Aufsatz, „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“¹³², war auch ein Produkt der Bemühungen, die Bohr und Heisenberg nach der intensiven Auseinandersetzung mit Schrödinger während seines Kopenhagenbesuchs für die physikalische Interpretation der Quantenmechanik einbringen mußten. Dort versuchte Heisenberg, der damaligen Quantenmechanik, die noch in ihrer frühen Entwicklungsphase war und viel innere Widersprüchlichkeit enthielt, eine klare Anschaulichkeit zu verschaffen. Er bemühte sich um diesen Weg, indem er die Begriffe der klassischen Mechanik, wie zum Beispiel Ort, Geschwindigkeit, und Energie, neu definierte und in den Umfang der neuen Quantenmechanik einzuschließen versuchte. Beller (1992b) macht uns darauf aufmerksam, daß der Begriff von dem Ort eines Elektrons z.B. in Heisenbergs (1925c) keinen Platz in seiner Quantenmechanik hatte¹³³. Jedoch versucht er in (1927b) dem Begriff „Ort des Elektrons“ wieder physikalischen Sinn zu geben. Dafür

¹³⁰ Pais (1991): „When, in the fall of 1926, Bohr and Heisenberg began their discussion of duality for matter, they took the wave properties of matter seriously for only one reason: the success of Schrödinger’s wave mechanics. No direct experimental verification of de Broglie’s hypothesis existed as yet“(301). Beller (1992b) nennt einen weiteren Grund, weshalb die Schrödingersche Idee Bohr so wichtig gewesen wäre. „One of the main reasons, I believe, was what he considered to be Schrödinger’s resurrection of Bohr’s own concept of a stationary state“(281).

¹³¹ Born (1926).

¹³² Heisenberg (1927a).

¹³³ Auch in Bezug auf diesen Punkt kritisierte Schrödinger (1926d) die Quantenmechanik: „Sie faßt das Atom als ein zeitloses Ganzes und vermag bisher nicht zu sagen, wie sich in ihrer Sprache die unbezweifelbare Tatsache ausdrücken läßt, daß das Atom sich zu verschiedenen Zeiten in *verschiedenen* Zuständen befinden kann.“ (128)

brachte er den Begriff des Ortes mit einer Messung zusammen. Das Problem der Messung wurde seitdem ein wichtiges Thema in der Quantenmechanik. Die Bedeutung dieses Aufsatzes war, daß die Quantenmechanik als Konkurrenztheorie für die Schrödingersche Wellenmechanik in damaliger Zeit eine anschauliche physikalische Interpretation bekam.

Bohr befand sich im Jahre 1927 in einer komplizierten Situation bezüglich der Atomtheorie. Die Spannung zwischen der Quantenmechanik und der Wellenmechanik schien ihm, die jeweils auf Korpuskularvorstellung und Wellenvorstellung basierten, sich nicht einfach auflösen zu lassen. Diese Problemsituation war der Hintergrund für Bohrs Komplementaritätsidee 1927. In Bezug auf die Komplementaritätsthese ist noch zu erwähnen, daß die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation eine tiefgehende Folge impliziert, wie es Heisenberg selbst ausdrückt, und zwar, „daß das Kausalgesetz in gewisser Weise gegenstandslos wird“. (Heisenberg (1927b), 83)¹³⁴

3.2. Komplementarität in der Quantenmechanik

In diesem Abschnitt wird der Como Vortrag von Bohr vom Gesichtspunkt eines Versöhnungsprogrammes betrachtet, und später im Kapitel 5 wird dieses Schema verallgemeinert im Kontext der Theoriendynamik diskutiert.

3.2.1. Bohrs Como Vortrag, wo es sich nicht nur um einen Überblick, sondern auch um eine Versöhnung handelte

Als ein Hauptredner auf dem internationalen Volta-Kongreß für Physik in Como, September 1927, hatte Bohr in seinem Vortrag eine Übersicht über den damaligen Stand der Quantentheorie zu liefern. Jedoch wollte Bohr bei dieser Gelegenheit eine weitere Aufgabe wahrnehmen, und zwar, nach seinen eigenen Worten in der Einleitung des Vortrages, um „eine Versöhnung der scheinbar sich widersprechenden Auffassungen verschiedener Physiker herbeizuführen“. Was im Como Vortrag als die zwei „scheinbar sich widersprechenden Auffassungen“ erschien, sind meiner Ansicht nach die Heisenbergsche und die Schrödingersche Auffassung der (Quanten-) Physik, die im letzten Abschnitt behandelt wurden. Darüber kann jedoch gestritten werden. Zum Beispiel glaubt Holton (1988), die Beiträge des Bohr-

¹³⁴ Die strenge Kausalität in der Physik ist jedoch nicht erst durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation in Frage gestellt worden, sondern bereit mit dem Auftritt des Planckschen Wirkungsquantums (Vgl. Bohr (1948)). Spätestens mit dem Bohrschen Atommodell geriet die Idee der Kausalität in der Physik in eine sehr problematische Lage.

schen Versöhnungsprogrammes seien die klassische und quantenmechanische Beschreibung physikalischer Phänomene. Folse (1985) findet sie in dem Paar von dem klassischen *Framework* und dem Quantenpostulat, was auch auf der selben Linie mit Holton zu sein scheint.

Dazu habe ich aber zweierlei zu sagen: Erstens, kann zwischen diesem Paar, mit 'klassisch' und 'quantenmechanisch', und meinem Paar, mit Schrödingerscher Wellenmechanik und Heisenbergscher Quantenmechanik, weitgehender Parallelismus gefunden werden. Man sollte hier daran erinnern, daß die Schrödingersche Wellenmechanik damals für viele Physiker als ein Rückschlag der klassischen Physik gegen die Quantenmechanik angesehen wurde. Zweitens, was mir noch wichtiger erscheint, wenn man verschiedene Textstellen des Como Vortrages zusammen nimmt, dann paßt das letztere Paar besser zum ganzen Kontext, insbesondere wenn man den Vortrag einheitlich aus der Sicht von einem 'Versöhnungsprogramm mittels Komplementarität' betrachtet. Es ist klar, daß Bohr nicht zwischen zwei Persönlichkeiten, Heisenberg und Schrödinger, eine Versöhnung beabsichtigte, was auch nicht nötig war. Was hatte dann Bohrs Versöhnungsprogramm vor Augen?

Offensichtlich wurde der Ausdruck „Versöhnung“ im Como Vortrag als ein Metapher eingesetzt, trotzdem widerspiegelt er in der Tat eine charakteristische Fassade der damaligen Situation in der Physik und Bohrs darauffolgende Bemühungen des Weitergehens, die in diesem Vortrag veranschaulicht werden. In diesem Sinne scheint es sinnvoll, daß man das Bohrsche Komplementaritätsprogramm in Como einmal vom Blickwinkel eines Versöhnungsprojektes betrachtet.

Versöhnung ist eine Sache zwischen zwei Beteiligten. Zwischen diesen besteht ein Konflikt, oder eine Spannung. Der englische Ausdruck in dem Vortrag ist angeblich 'to harmonise'¹³⁵ gewesen. Versöhnung heißt zumindest *nicht*, daß eine Seite der Beteiligten auf ihren Geltungsanspruch verzichtet, und daß dadurch die Lage des Konfliktes vermieden wird. Eine Versöhnung geht von einer Art Gleichberechtigung von beiden Seiten aus, und sie endet auch in einem gleichberechtigten Zustande der beiden. Was durch eine Versöhnung erzielt wird, ist eine *Transition von Gegeneinanderstehen zu Nebeneinanderstehen* (oder sogar bis zum Füreinanderstehen). Sie ermöglicht nämlich die gemeinsame Existenz. Eine wirkende Versöhnung ist jedoch nur dann möglich, wenn die beiden beteiligten Parteien erkennen werden, oder wenn ein Vermittler zwischen beiden Parteien überzeugen kann, daß diese gemeinsame Existenz in gewisser Weise *notwendig* ist. Angenommen, daß der Wille zur Versöhnung da ist, aufgrund der Erkenntnis über diese Notwendigkeit, braucht eine Versöhnung immer noch einen weiteren Schritt, der wohl der schwierigste Schritt ist.

¹³⁵ Siehe Bohr (1928a) und (1928e).

Es müßte festgestellt werden, wo die Versöhnung stattfinden soll, anders ausgedrückt, wo die Grenzlinie zwischen zwei harmonisch koexistierenden Parteien bestehen soll.

Die oben aufgezählten Charakterisierungen der Versöhnung passen auch mit den wesentlichen Aspekten des Bohrschen Programmes der Komplementarität im Como Vortrag zusammen. Aber dann, muß ich mich fragen, was ist mit einer solchen Versöhnung gemeint in einem Bereich der exakten Wissenschaft, wie Physik? In erster Linie scheint es klar, daß es sich hier um die Versöhnung zwischen zwei sich widersprechenden, oder zumindest konkurrierenden, Theorien handelt. Versöhnung zwischen zwei Theorien soll eine Koexistenz der beiden Theorien ergeben. Aber eine Versöhnung, und folglich so eine friedliche Koexistenz, ist nicht immer möglich. Wenn A und B nur gegeneinander behaupten, daß jeweils der andere lüge oder was gänzlich falsches sage, dann scheint eine solche Koexistenz zwischen ihnen sehr schwer zu erreichen. Eine Versöhnung wäre nur dann möglich, wenn sie den beiden Beteiligten in gewisser Hinsicht notwendig erscheint.

Durch seine Komplementaritätsthese wollte Bohr zeigen, wie die Koexistenz von zwei sich widersprechenden Theorien möglich wird. Aber es muß beachtet werden, wie gerade bei der Versöhnung gesagt, daß die Bohrsche Komplementarität *keineswegs* heißt, daß dadurch in *jedem* Paar konkurrierender Theorien eine friedliche Koexistenz geschaffen werden soll. Es wäre nämlich keine richtige Formulierung, wenn man sagt, daß die Komplementarität um einer Versöhnung willen konzipiert worden sei. Vielmehr ist eine gewisse Art der Versöhnung das Resultat aus dem Komplementaritätszusammenhang zwischen zwei Theorien.

Nicht jedes Paar von den Konkurrenztheorien bildet einen Komplementaritätszusammenhang. Die nächste Frage lautet dann, unter welcher Bedingung zwei Theorien in eine komplementäre Koexistenz kommen können. Diese Frage steht nicht nur in diesem sondern auch im Kapitel 5 im zentralen Interesse. Zunächst kommt es vor, daß die beiden Beteiligten jeweils als unverzichtbar auftreten müssen. Das heißt weiter, jede Seite muß etwas haben, was der anderen Seite fehlt, und außerdem notwendig ist. Wenn man an dieser Stelle an eines der Hauptbeispiele für Komplementarität denkt, und zwar an den Wellenaspekt und den Korpuskelaspekt des Lichtes, dann wird dies klarer. Aus der Sicht der Welle kann man zum Beispiel das Interferenzphänomen erklären, wo die Korpuskelsicht wesentliche Schwierigkeit haben muß, und den Einsteinsche Photoeffekt kann man nur aus der korpuskularen Seite erklären.

Ich muß hier noch folgendes bemerken. Gewiß nicht mit echter Neutralität war Bohr in Como versöhnender Vermittler, wenn es um die Spannung zwischen der Quanten-

mechanik und der Wellenmechanik ging.¹³⁶ Daß kein Zurück zur klassischen Physik möglich war, das viele Physiker nach dem Auftritt der Schrödingerschen Wellenmechanik doch erwartet hatten, stand Bohr außer Zweifel. Das Problem für ihn war dann, wie man die neue Theorie, Quantenmechanik, auf ein konsistentes und, vor allem, verständliches Fundament stellen könnte¹³⁷. Vor dieser Aufgabe begann Bohr mit der Darstellung der Sachlage von besonderer Art, worin sich die Atomtheorie damals befand.

3.2.2. Sachlage von besonderer Art; Unzulänglichkeit und Unverzichtbarkeit der klassischen physikalischen Begriffe

Die Erkenntnis der fundamentalen Begrenztheit der klassischen physikalischen Begriffe, nämlich, daß sie grundsätzlich unzulänglich sind, wo sie auf atomare Phänomene angewandt werden sollen, war in der Tat für die neue Quantentheorie ein charakteristisches Basiselement¹³⁸, und weiter auch der Anfangsgrund der sich neu entwickelnden Atomtheorie, worin einmal auch die frühe Quantentheorie¹³⁹ den Ansatzpunkt fand. Es fällt auf, daß Bohr in seinen Schriften diesen Punkt wiederholend und häufig mit Betonung deutlich macht.

Bohr findet den Ausgangspunkt für sein Komplementaritätsargument in der Lage der damaligen Physik, die sich in einer Sachlage von besonderer Art befand:

Charakteristisch für die Quantentheorie ist die Erkenntnis einer fundamentalen Begrenzung der klassischen physikalischen Begriffe, wenn sie auf atomare Phänomene angewandt werden. Die hieraus sich ergebende Sachlage ist von besonderer Art, weil unsere Deutung des Erfahrungsmaterials wesentlich auf der Anwendung der klassischen Begriffe beruht. (*Como*¹⁴⁰, 36-37)

Die Situation in der Physik war gerade von besonderer Art, weil die fundamentale Begrenzung der klassischen Begriffe erkannt wurde, jedoch diese klassischen Begriffe trotz der fundamentalen Begrenzung unerlässlich in der Physik waren¹⁴¹. Ein Physiker muß mit dem

¹³⁶ Ob das Bohrsche Programm für beide Seiten als ein akzeptables Versöhnungsprogramm angenommen werden konnte, bleibt fraglich. Wenn man die noch viele Jahre weiter bestandene Abneigung von Einstein u.a. gegenüber der Quantenmechanik berücksichtigt, muß man auf diese Frage negativ antworten.

¹³⁷ In dieser Hinsicht steht Bohr auf Heisenbergscher Seite, indem er die Wellenmechanik als eine Teildisziplin der Quantenmechanik versteht.

¹³⁸ Bohr (1928d), 36. Die Seitenangabe '(*Como*, [Seitenzahl])' in diesem Kapitel bezieht sich auf diese Version des *Como Papers*, wenn keine sonstige Bemerkung beigefügt ist.

¹³⁹ Von 1913 (das Bohrsche Atommodell) bis 1925 vor Heisenbergscher Quantenmechanik.

¹⁴⁰ Bohr (1928d). Siehe Fußnote 138.

¹⁴¹ "The situation thus created is of a peculiar nature, since our interpretation of the experimental materials rests essentially upon the classical concepts." (Bohr (1928e), 589)

Werkzeug arbeiten, an denen er einen gravierenden Mangel gefunden hat. Es ist nämlich nicht nur das beste verfügbare sondern das einzige Werkzeug.

Man muß sich in dieser Situation auch fragen: „Warum dann nicht gleich ein neues Werkzeug? Vielleicht wird doch ein neues Werkzeug gefunden oder geschaffen, das die Begrenzung des alten Werkzeuges überwindet.“ Das heißt, in der Physik sollten dann neue Begriffe eingesetzt werden statt der alten klassischen, und die Sachlage von besonderer, schwieriger Art würde vielleicht aufgelöst. Diese Alternative scheint jedoch bei Bohr ausgeschlossen zu bleiben. Bohr war gegenüber derjenigen Sicht kritisch, die besagt, daß die außerordentliche Situation in der Atomphysik, wie zum Beispiel die Schwierigkeiten mit dem Kausalbegriff, irgendwann mit weiterer Entwicklung der Theorie aufgelöst werden soll. Solche Sicht sei „due to a misapprehension of the situation“ (Bohr (1937), 293). In welcher Weise, meint Bohr, beruht diese Sicht auf einem Mißverständnis? Eine direkte und klärende Antwort von ihm auf diese Frage fehlt in seinem Text. Jedoch werden wir mit dieser Frage später konfrontiert werden.

Ich glaube, daß sich Bohrs Annahme über die unverzichtbare Verbindung zwischen physikalischer Erfahrung und klassischen Begriffen weiter in Frage stellen läßt. Für die Unverzichtbarkeitsthese über die klassischen physikalischen Begriffe wurde von Bohr philosophisch gesehen eigentlich keine stabile, überzeugende Begründung mitgeliefert¹⁴², welches jedoch Bohr selbst auch anscheinend nicht als eine Aufgabe wahrnahm. Es ist jedoch sinnvoll zu versuchen, Bohrs Argument in diesem Punkt verständlicher und auch möglichst plausibel zu machen. Dadurch könnten wir seine Komplementaritätsthese besser verstehen, die offensichtlich von der Unverzichtbarkeitsthese ausgeht.

Erstens ist an der oben zitierten Stelle im Como Vortrag zu beachten, daß Bohr über das *Erfahrungsmaterial* in der Physik spricht¹⁴³. Es scheint *nicht* sein Argument zu sein, daß die *Physik eigentlich* ausschließlich in klassischen Begriffen beschrieben und geschrieben werden kann. Es geht dort bei ihm vielmehr um die faktische Begrenzung, daß man in der Physik ständig mit Erfahrungsmaterialien beschäftigt ist, wie mit Beobachtungs- und Meßinstrumenten, und daß im Umgang mit diesen Materialien die klassischen Begriffe unvermeidbar sind. Zum Beispiel beschäftigt sich ein Physiker für ein Experiment unbedingt mit einer Reihe makroskopischer (bzw. mesoskopischer) Dinge, Geräte und Einrichtungen. Sonst hat er — egal ob man das bedauert oder nicht — keinen empirischen Zugang zu der atomaren Ebene.

¹⁴² Vgl. Frank (1946), 48ff.

¹⁴³ „...weil unsere Deutung des Erfahrungsmaterials wesentlich auf der Anwendung der klassischen Begriffe beruht.“ (Como, 37)

<klassische Begriffe um Kommunizierbarkeit willen>

In diesem Punkt muß man aber eine weitere Bemerkung im Auge behalten, daß es sich bei Bohr bei diesem Problem nicht bloß um die physikalische *Größe* der Dinge handelt, sondern in erster Linie um die Kommunizierbarkeit eines physikalischen Begriffes.

For the requirement of communicability of the circumstances and results of experiments implies that we can speak of well defined experiences only within the framework of *ordinary concepts*. (Bohr (1937), 293, Hervorhebung von I.Ko)

Kommunizierbarkeit unter den Physikern ist praktisch eine basale Bedingung für die Aktivitäten, die dem Fachgebiet Physik überhaupt zugrunde liegen. Kommunizierbarkeit ist die Basis, auf der Physiker miteinander über die umliegenden Bedingungen und die Ergebnisse eines Experimentes diskutieren können, ohne welche währenddessen in der Tat keine Physik möglich wird. Diese Bedingung soll nach seiner Ansicht nur auf Grund der gewöhnlichen Sprache, d.h. der Sprache der klassischen Physik, erfüllt werden können. Meyer-Abich (1965) versucht, Bohr in diesem Punkt zu unterstützen, indem er wie folgt argumentiert:

Festzustellen ist aber, daß es de facto bis heute noch niemand gelungen ist, ein eindeutiges Versuchsprotokoll zu schreiben, in dem keine klassischen Begriffe benutzt werden, und daß über die bloße Beschreibung experimenteller Vorrichtungen hinaus auch die quantentheoretische Interpretation der beobachteten Phänomene nach wie vor unter Benutzung klassischer Begriffe erfolgt. (141)

Aber, daß de facto heute noch mindestens ein klassischer Begriff in dem Versuchsprotokoll eines Physikers auftaucht, besagt letztendlich nicht, daß ein Versuchsprotokoll, wenn es eindeutig geschrieben und verstanden werden möchte, in mindestens teilweise klassischen Begriffen geschrieben werden *muß*, und nicht anders sein kann¹⁴⁴.

Der Begriff der Kommunizierbarkeit schließt aber auch die Möglichkeit der Kommunikation von einem Physiker *mit sich selbst* ein. Das ist, anders ausgedrückt, die Verständlichkeit. Ein Physiker konzipiert ein Experiment, bringt alle Teile der Instrumente und so weiter nach seiner Konzeption in Ordnung, betätigt vielleicht einen Knopf oder etwas Ähnliches, und liest irgendwo die Data ab, wenn ich einen möglichen Vorgang eines Experiments grob vereinfachend schildere. Er muß in diesem Vorgang seine Konzeption des Experiments inklusive der theoretischen und auch technischen Hintergründe nicht nur gegenüber seinen Kollegen und anderen Physikern verständlich machen können, sondern auch, und zwar vor allem, muß er gegenüber sich selbst dasselbe tun können. Er kann kein Expe-

¹⁴⁴ Zum Beispiel Putnam argumentiert in der Gegenrichtung. Auch die kritische Diskussion von Feyerabend (1958) über die Bohrsche Unverzichtbarkeitsthese stellt die problematischen Punkte um dieses Thema klar dar.

riment erfolgreich durchführen, wenn er selber nicht klar versteht, was er in dem Experiment tut, und wie er es tun will. Die Unverzichtbarkeitsthese aufgrund der Kommunizierbarkeitsforderung kann in diesem Sinne auch ohne Bezugnahme auf die wirkliche Kommunikation unter den verschiedenen Physikern argumentiert werden.

Aber wenn man auch die Kommunizierbarkeit als eine Grundbedingung für die Physik annimmt, bleibt immer noch die Frage nicht zufriedenstellend geklärt, warum diese Bedingung ausschließlich im Rahmen der klassischen Begriffe zu erfüllen sein soll. Ich versuche auf dieses Problem zweierlei Erklärungen vorzulegen. Keine von ihnen würde auf einmal die ganze Problemlage klären, jedoch werden sie uns in der Diskussion ein Stück weiter bringen.

Erstens kommt die Forderung nach der Eindeutigkeit (*unambiguity*). Sie ist auch in der Kommunizierbarkeitsforderung enthalten. Dann ergibt sich daraus sofort die nächste Frage: Warum ermöglichen die klassische Begriffe Eindeutigkeit? Die klassischen Begriffe sind durch eine mehr oder weniger direkte Verbindung mit einer elementaren Aktivität der Messung zu veranschaulichen. Für die Messungen werden z.B. Uhren, Maßbänder, und Waagen¹⁴⁵ gebraucht. Befindet sich zum Beispiel 'Spin' nicht auf dem Status eines Begriffes mit solcher Eindeutigkeit? Nein, Spin läßt sich nicht¹⁴⁶ in dieser Weise veranschaulichen. Hier besteht jedoch der Verdacht, daß es sich vielleicht bloß um die Gewohnheiten handelt. Bieten die Impulse, oder kinetische Energie eines Teilchens, wirklich grundsätzlich mehr Anschaulichkeit als Spin eines Elektrons? Oder ist es so, weil wir uns in der Physik mit den ersteren deutlich länger vertraut gemacht haben? Solche Fragen lassen sich aber nicht an dieser Stelle weiter analysieren.

Zusammenfassend zu sagen, scheint die Unverzichtbarkeitsthese an sich philosophisch schwer zu begründen.¹⁴⁷ Diese These läßt sich meines Erachtens nicht im Sinne von Unverzichtbarkeit klassischer Begriffe überhaupt deuten, sondern am besten im Sinne von dessen Unverzichtbarkeit in der Lage, in der die Entwicklung der Quantenmechanik noch heftig im Gang war. Der Umfang, die Tiefe, und der Modus von der „Unverzichtbarkeit“ der Begriffe der klassischen Physik scheinen im Kontext der heutigen Physik anders als in der damaligen Situation, was auch den Gedanken unterstützt, daß die „Unverzichtbarkeit“ eine Erscheinung in einer gewissen Phase der Theoriendynamik gewesen ist.

Ich stelle hier eine weitere negative Stellungnahme über die Bohrsche Idee vor, und zwar von Putnam (1990). Putnams Ansicht zu diesem Punkt lautet wie folgt:

¹⁴⁵ In verschiedener Form (vielleicht auch in einer hochentwickelten Form) kommen diese Meßgeräte zum Einsatz.

¹⁴⁶ Nicht leicht, zumindest.

¹⁴⁷ Vgl. Feyerabend (1958).

Bohr's ideas were highly controversial, and remains so today. The first of the ideas that I mentioned — that quantum mechanics essentially presupposes the use of classical physics (to describe the measuring apparatus) — does not, I think, stand up. (5)

Putnam schätzt, es sei von Neumann (1955) gelungen zu demonstrieren, wie eine Messung in rein quantenmechanischen Begriffen zu analysieren ist. Er diagnostiziert auch weiter:

Very few physicists today would understand „complementarity“ as referring primarily to the complementarity use of *classical* concepts, as Bohr did. (6, Hervorhebung im Original)

Ich muß hier nicht zwischen der Meinung eines erstklassigen Physikers dieses Jahrhunderts und der von einem Philosoph entscheiden können. Es wäre auch in unserem Kontext irrelevant. Jedoch scheint das Folgende nahe zu liegen. Die Begriffe, die in klassischer Mechanik und Elektrodynamik benutzt wurden und werden, sind in der Physik zumindest nicht 'absolut' unverzichtbar, wie Putnam auch in seinem Einwand gegen die Bohrsche Unverzichtbarkeitsthese argumentiert. Weder besitzen die Physiker heute genau dieselbe Reihe zentraler Begriffe wie im 19ten Jahrhundert, noch scheint es der Fall zu sein, daß man mit der Entwicklung der Physik diese Reihe nur länger gemacht, und nie einen 'zentralen' Begriff gestrichen hat. Natürlich ergeben sich die schwierigen Fragen, welche Begriffe zentral sind, worin die Zentralität oder Basalität besteht¹⁴⁸. Dieses Problem soll uns aber nicht zu den folgenden Fragen weiterbringen; „Worin besteht die Basalität eines Begriffes?“ oder „Was ist das Kriterium für einen basalen, deswegen auch unerläßlichen, Begriff?“. Vielmehr scheint es sinnvoll zunächst zu fragen, welche Begriffe in der Tat da waren, die Bohr als unerläßlich vorkamen.

<Was sind klassische [ordinary] Begriffe?>

Diese Frage soll uns zu einem weiteren Schritt im Verstehen von Bohrs Komplementaritätsargument helfen, indem die jetzige Problemlage dadurch anschaulicher wird, und die Basis zum zweiten Antwortversuch hergestellt wird. Welche Begriffe sind in der Tat da, oder zweckmäßiger gefragt, welche Begriffe hatte Bohr in der Tat im Kopf, wenn es um klassische, und deswegen unverzichtbare Begriffe ging? Nicht erwartet wird damit ein vollständiges Aufzählen von allen entsprechenden Begriffen, jedoch wollen wir einige Beispiele dafür, um die Unverzichtbarkeitsthese konkreter verstehen zu können. Es scheint, daß einige aus dem Kontext des Como Vortrages zu holen sind, obwohl dort nicht ausdrücklich die

¹⁴⁸ Hier wurde die weitere wichtige Frage über die Begriffsänderung verschwiegen.

unverzichtbaren klassischen Begriffe genannt wurden. Diese sind Ort, Zeit, Energie, Impulse, und ferner, Masse, Geschwindigkeit, Wellenlänge, Schwingungszahl, und so fort. Im ersten Augenblick zu bemerken ist, daß sie hier keine ‘alltäglichen’ Begriffe im wörtlichen Sinne sind, sondern sie sind, wie Meyer-Abich es formulierte, „diejenigen Begriffe, [...] die in der klassischen Physik tatsächlich benutzt werden“.¹⁴⁹

Es ist im Auge zu behalten, daß bei Bohr die ‘*ordinary*’ Begriffe nichts anderes als die Begriffe der klassischen Physik waren¹⁵⁰. Aber wenn das so ist, dann scheint die Unverzichtbarkeitsthese noch schwieriger nachzuvollziehen zu sein. Sie besagt zwar nicht etwas, was eine Intuition leicht bejahen kann. Ich habe es zum Beispiel schwer, mir vorzustellen, daß ein Nichtphysiker den Begriff der Impulse für unverzichtbar im Umgang mit ‘Erfahrungsmaterialien’ halten würde und wenn ‘Erfahrungsmaterialien’ nicht auf den Kontext der Physik beschränkt verstanden werden. Hier ist die Schlußfolgerung zu ziehen, daß in Bohrs Unverzichtbarkeitsthese nicht die Unverzichtbarkeit der üblichen alltäglichen Begriffe, sondern Unverzichtbarkeit der *klassischen Begriffe im Kontext der klassischen Physik* gemeint ist. Die ‘klassischen’ Begriffe können abstrahiert von jenem Kontext keine eindeutige Rolle spielen.

Ich frage mich dann, ob die Unverzichtbarkeitsthese auch die Unverzichtbarkeit der klassischen Physik an sich impliziert. Diese Frage scheint auf keinen Fall uneingeschränkt positiv beantwortet zu werden. In der Anfangsphase der Formulierung der Quantentheorie war die Erkenntnis von großer Bedeutung, daß man etwas *anderes* oder *mehr* als die klassische Physik brauche, wobei die Gültigkeit von dieser grundsätzlich in Frage gestellt wurde und erheblichen Verlust hinnehmen mußte. Schwer verständlich kommt mir die Unverzichtbarkeitsthese über die klassischen Begriffe vor, wenn man diese völlig unabhängig von dem Problem des Status der klassischen Theorie nach dem Auftritt ihrer Nachfolgertheorie betrachten will. Diese Begriffe sind im Kontext der klassischen Theorie entstanden und haben im Zusammenhang mit den klassischen Problemen deren Status erworben.

Ein anderer Gesichtspunkt über die Unverzichtbarkeitsthese ist zu konstruieren, und zwar unter der Berücksichtigung der Tatsache, daß es sich hier um ein Vorgängertheorie-Nachfolgertheorie-Paar¹⁵¹ handelt. Wie wir schon vorher ausführlicher betrachteten, sagt

¹⁴⁹ Meyer-Abich (1965), 105.

¹⁵⁰ Bohr benutzte auch überwiegend den Ausdruck „*ordinary mechanics*“ für die klassische Newton-Hamiltonische Mechanik. Sein Begriff der Gewöhnlichkeit (*ordinary*) bleibt hierbei jedoch unexpliziert.

¹⁵¹ Streng genommen ist dies keine genaue sondern eine problematische Formulierung, und zwar im folgenden Sinne: ‘Nachfolger’ impliziert eigentlich, daß der Vorgänger schon abgelöst worden sei (Prof. Hoyningen-Huene hat mich auf dieses begriffliche Problem aufmerksam gemacht.) oder zumindest im Zustand von einem ‘*lame duck*’ sei, und folglich daß er nicht mehr (voll) im Amt bleibe. Aber wenn es um klassische und Quantenmechanik geht, dann könnte jene und diese jeweils als Vorgänger- und Nachfolgertheorie betrachtet werden, jedoch nicht im gerade genannten Sinne, daß diese jene vollständig abgelöst

uns dort das Korrespondenzprinzip zweierlei: Erstens, die Nachfolgertheorie müsse grundsätzlich die erfolgreichen Leistungen ihres Vorgängers wiederholen können, und zweitens, die Nachfolgertheorie wird durch ihre Konstruktion, durch die Heuristik mittels des Korrespondenzprinzips, weitgehend von ihrer Vorgängertheorie geprägt. Die quantenmechanisch geprägte heutige Physik als Nachfolgertheorie der vor-quantenmechanischen klassischen Physik, in der die Newtonsche Mechanik und Maxwellsche Elektrodynamik die wichtigsten Bestandteile sind, hätte nicht einmal entstehen können, möchte ich betonen, ohne diese klassischen Theorien als Basis solcher Entstehung. Sie waren dort nicht nur als Bezug für die Heuristik sondern überhaupt wurden die Probleme, die für die Entstehung der neuen Theorie Ansatz geworden waren, im Kontext dieser Theorien erkannt und auch als Probleme formuliert.

Die nächste Frage ist dann: Warum, in welchem Sinne, erscheinen Energie (E), Impulse (\mathbf{p}), Ort (\mathbf{x}), und Zeit (t) auch in der neuen Theorie als unverzichtbar? Eine Antwort auf diese Frage kann man im Como Vortrag finden. Erstens bilden in der klassischen Physik kausale und raumzeitliche Beschreibungen zusammen das Ideal von einer physikalischen Beschreibung, so daß auf keine von den beiden verzichtet werden könne. Solches Ideal für die physikalische Beschreibung, und zwar mit den beiden Komponenten von Kausalität und Raumzeitlichkeit, vergeht nicht einfach mit einem Theoriewechsel. Der raumzeitliche Zusammenhang läßt sich in den Variablen \mathbf{x}^{152} und t formulieren, und der kausale Zusammenhang in einem Phänomen wird physikalisch vor allem durch die Verhältnisse von Energie bzw. Impuls beleuchtet. Zweitens könnte man den Punkt nochmals berücksichtigen, daß die quantenmechanische Physik aufgrund der klassischen Mechanik und Elektrodynamik geboren wurde, und sich noch weitgehend auf deren Basis entwickelte, und infolgedessen die grundlegenden Begriffen von dieser Entwicklungsbasis weitgehend geerbt hätte.

Keine von den beiden Überlegungen bringt dennoch offensichtlich eine zufriedenstellende Antwort auf die gestellte Frage, weil sie besagen, warum die Energie und andere auch in der neuen Theorie auftauchen *könnten*, aber nicht warum sie das *müßten*. Das heißt, diese Überlegungen sind streng genommen für die *Unverzichtbarkeits*these nicht relevant. Wie auch vorab schon diskutiert, läßt sich diese These schwer begründen. Jedoch scheinen mir zwei Bemerkungen hier nötig. Erstens soll die Unverzichtbarkeit der klassischen Begriffen im Zusammenhang mit einer Unverzichtbarkeit oder, abgeschwächt formuliert, der Wichtigkeit der klassischen *Theorie* der Physik beleuchtet werden. Zweitens, wenn man auch annimmt, daß die Notwendigkeit oder zumindest die Wichtigkeit der klassischen Physik zum

hat. Es geht hier nämlich um eine Situation, wo der Vorgänger und sein Nachfolger in gewisser Weise zugleich im Amt sind.

¹⁵² Das heißt, zum Beispiel in einem dreidimensionalen Raum, (x, y, z) oder (r, θ, α) .

Zeitpunkt des Como Vortrags erkannt war, ist es jedoch möglich, daß es keine dauerhafte Situation in der Physik bedingt. Die Frage, ob und wie weit eine Theorie in einem Disziplinbereich als unerlässlich vorkommt, ließe sich nicht eindeutig beantworten. Vielmehr variieren Grad und Modus der Wichtigkeit der alten Theorie nach den unterschiedlichen Phasen der Entwicklung der neuen Theorie.

3.2.3. Die erste Version der Komplementarität (Como Vortrag)

Nachdem die Sachlage von besonderer Art vorgestellt wurde, geht Bohr im Como Vortrag zum nächsten Punkt über: Wie soll man mit dieser Sachlage umgehen? Zuerst möchte ich jedoch die Problemsituation noch konkreter betrachten, nämlich, wie sich damals die fundamentale Begrenzung der klassischen Begriffe darstellte.

Die Komplementaritätsthese von Bohr wurde in dem Vortrag zuerst in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Beobachtung und Definition eingeführt. Im Laufe des Vortrages zeigte es sich klar, daß das Komplementaritätspaar Beobachtung-und-Definition weiter mit anderen Paaren der physikalischen Quantitäten auf eine Ebene zusammenzubringen ist. Diese Paare sind nämlich Ort-und-Impuls [\mathbf{x} und \mathbf{p}] und Zeit-und-Energie [t und E]. Die gerade genannten Paare bezeichnen zwei repräsentative Fälle, in denen die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation bestehen soll. Als Folge sind aus dem Como Vortrag in der Tat drei verschiedene, dennoch miteinander eng verbundene, Zusammenhänge herauszunehmen, worin man die Bohrsche Komplementaritätsthese betrachten kann. Erstens ist der Zusammenhang von Definition und Beobachtung eines atomaren Systems zu betrachten.

3.2.3.1. Definition und Beobachtung

Einerseits verlangt die *Definition* des Zustandes eines physikalischen Systems, wie gewöhnlich aufgefaßt, das Ausschließen aller äußeren Beeinflussungen; dann ist aber nach dem Quantenpostulat auch jede Möglichkeit der *Beobachtung* ausgeschlossen, und vor allem verlieren die Begriffe der Zeit und [des] Raum[es] ihren unmittelbaren Sinn. Lassen wir andererseits, um *Beobachtungen* zu ermöglichen, eventuelle Wechselwirkungen mit geeigneten, nicht zum System gehörigen, äußeren Messungsmitteln zu, so ist der Natur der Sache nach eine eindeutige *Definition* des Zustandes des Systems nicht mehr möglich, und es kann von Kausalität im gewöhnlichen Sinne keine Rede sein. (*Como*, 37-38, Hervorhebungen von I.Ko)

Bohr macht im obigen Zitat klar, daß die Beobachtung eines atomaren Systems und die Definition dessen Zustandes nicht gleichzeitig erfolgen können. Diese beiden sollen sich zwar

gegenseitig ausschließen. Um es anschaulicher zu machen, denken wir an ein Wasserstoffatom. Wir nehmen an, das Elektron dieses Atoms befinde sich in einem bestimmten Energiezustand, den man durch eine frühere Messung definitiv feststellen konnte. Wenn man das Elektron raumzeitlich darstellen möchte, dann müßte man eine Beobachtung durchführen, und in dieser Angelegenheit hat man keinen anderen Weg, wie oben schon gesehen, außer einer Wechselwirkung mit dem Elektron. Aber man kann dann nicht feststellen, was diese Wechselwirkung zwischen dem Beobachtungsinstrument und dem Elektron seinem Zustand gebracht hat.

Die Definition des Zustands eines Systems soll hier konkret heißen das quantitative Feststellen der *kinematischen* Eigenschaften, wie z.B. der Energie oder des Impulses des Systems in einem definitiven Zustand. Wenn jedoch der Zustand eines Systems in einer nicht kontrollierten Art und Weise variiert, kann man unter dieser Bedingung keine sinnvolle Definition des Zustandes liefern. Im Begriff der Definition ist die Forderung nach der Eindeutigkeit inbegriffen. Die Isolation des Systems ist in diesem Sinne eine notwendige Bedingung für die Definition seines Zustandes¹⁵³. Alle äußere Beeinflussungen müssen ausgeschlossen bleiben, um eine Definition gültig zu machen. Wenn man aber dieses System beobachten will, möchte man sagen können, wie sich das Elektron raumzeitlich befindet, dann wird die Situation anders, weil man dafür unbedingt eine Wechselwirkung von dem System mit, zum Beispiel, einem Meßinstrument braucht. Eine umstrittene, aber anschauliche Formulierung wäre, daß eine Beobachtung von einer Begegnung des zu beobachtenden Systems mit dem Beobachtungsmittel ausgeht, und kein anderer Weg besteht.

In diesem Sinne schließt die Definition des kinematischen Zustandes eines Systems die Beobachtung aus, und eine Beobachtung läßt die Beständigkeit der Definition nicht zu. Bohr ging oben jedoch einen Schritt weiter, und sagte, daß die Definition des Zustandes auch *den unmittelbaren Sinn der Begriffe von Raum und Zeit* wegnehme. Ich möchte dies folgendermaßen verstehen:

Für den Begriff „Definition“ des Zustandes eines physikalischen Systems bleibt jede Möglichkeit zu einer Begegnung mit dem ‘Außen’ prinzipiell ausgeschlossen. Es heißt, daß in dem Moment der Definition jegliche Bezugnahme auf etwas, oder jegliche Relation zu etwas, was selbst nicht dem System gehört, abstrahiert werden soll. In dieser Sachlage finden die Begriffe des Ortes und der Zeit für das System an sich keinen Platz. Der Problemkontext, nämlich die Frage, „wie sich das System raum-zeitlich befindet“, ist völlig abstrahiert worden. Das System hat physikalische Eigenschaften, aber nur die ‘inneren’ und nicht diejenigen, die einen ‘äußeren’ Bezug in Anspruch nehmen. In diesem Sinne kann man argumentieren, die Definition schließt die raumzeitliche Beschreibung aus.

¹⁵³ Das lateinische Wort ‘definire’ hat die Bedeutung von ‘abgrenzen’.

Wie Bohr es darstellte, lag ein grundsätzlicher Bruch zwischen klassischer und quantentheoretischer Beschreibung darin, daß die letztere nicht 'die kausale raumzeitliche Beschreibung' liefern könnte, die eigentlich die Idee einer physikalischen Beschreibung in klassischer Physik war. Ein Kernpunkt der neuen Lage in der Atomtheorie war, wenn ich wiederholend formuliere, daß die eigentlich ideale Beschreibung *eines* Phänomens, die *sowohl* kausal *als auch* raumzeitlich sein soll, nicht möglich ist. Das Quantenpostulat hieße, „daß jede Beobachtung atomarer Phänomene eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung mit dem Messungsmittel fordert“ (37). Die Beobachtung beinhaltet notwendigerweise eine Wechselwirkung, nämlich von dem zu beobachtenden Gegenstand und dem Instrument für die Beobachtung. Die Beobachtung eines atomaren Systems verlangt in dieser Weise immer ein gewisses Opfer auf der Seite der Definition¹⁵⁴ des Systems. Diese Wechselwirkung ist aber streng genommen nicht zu kontrollieren. Um diese Wechselwirkung physikalisch quantitativ analysieren zu können, braucht man eine weitere Beobachtung, die jedoch wiederum eine zusätzliche Wechselwirkung bedeutet, die wiederum außer Kontrolle bleibt. Bohr formuliert dieses Problem durch das Begriffspaar von *Definition* und *Beobachtung* eines [atomaren] Systems. Seine Überlegung über die Komplementarität beginnt mit dieser Problemsituation.

3.2.3.2. *Kausalität und raum-zeitliche Beschreibung*

Die zweite Problemlage befindet sich direkt benachbart und verbunden mit der ersten.

Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns *also* damit begnügen, die *Raum-Zeit-Darstellung* und die *Forderung der Kausalität*, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre, aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhalts der Erfahrung aufzufassen, die die Idealisation der Beobachtungs- bzw. Definitionsmöglichkeiten symbolisieren. (*Como*, 38, Hervorhebungen von I.Ko)

Ich glaube, es ist nicht schwer zu merken, daß die Möglichkeiten zur Definition des Zustandes und zur Beobachtung, streng genommen auch abgesehen von der Begrenzung zwischen makroskopischer und atomarer Ebene, sich ausschließend vorkommen können, und zwar von der jeweiligen Idee der Definition und Beobachtung aus. Dieses Ausschließen heißt bei Bohr, daß es unmöglich sein soll, den zwei Forderungen in der physikalischen Beschreibung, nämlich der Forderung nach der raum-zeitlichen Darstellung und zur kausalen Beschreibung zugleich entgegenzukommen.

¹⁵⁴ Man darf hier einfach an die Definition des Impulses oder der Energie des zu beobachtenden Systems denken. Über diesen Punkt folgt eine weitere Diskussion in diesem Abschnitt.

Wie ist der Zusammenhang dieser beiden Komplementaritätspaare? In der oben zitierten Textstelle läßt sich Bohr so deuten, als ob die zwei Paare so verbunden sind, daß die Definition im ersten Paar der Kausalität[-sforderung] des zweiten Paares entspricht, und die Beobachtung der [Forderung nach der] raumzeitlichen Beschreibung. Die Verbindungen von 'Definition - kausale Beschreibung' und 'Beobachtung - raumzeitliche Beschreibung' wurde nicht klar genug ausgedrückt, aber die Parallelität zwischen zwei Komplementaritätspaaren tritt im Como Vortrag klar vor. Ich glaube, man könnte diese Parallelität zunächst folgenderweise verstehen.

Erstens ist es ohne große Gefahr anzunehmen, man erzielt in einer Beobachtung in erster Linie die raumzeitliche Beschreibung. Demnächst soll man dann Definition und Kausalität zusammenbringen, was mir aber viel problematischer aussieht. Ein möglicher Vorschlag wäre, daß es erforderlich ist, um die Kausalitätsforderung sinnvoll auftreten zu lassen, die Erhaltungssätze für die Energie und Impulse zu sichern. Es ergibt sich dabei natürlich, daß die Energie bzw. die Impulse eines Systems definitiv werden müßten.

Eine Frage ist, ob die Komplementarität nur für die atomare Ebene gültig ist, oder ob sie auch allgemein für den gesamten Bereich der Physik Geltung hat. Die Komplementarität zwischen Definition und Beobachtung und die zwischen Kausalität und raumzeitlicher Beschreibung scheinen im Grunde genommen nur im Gegenstandsbereich der Atomphysik zu gelten, und nicht für alltägliche Dinge, auch nicht allgemein für die Physik insgesamt. Bevor die Forschungen in Physik thematisch auf die Phänomene innerhalb der Atome konzentriert wurden, und bevor sie bestimmte Erfolge erzielten, war kein solcher Komplementaritätsbegriff notwendig gewesen. In dem makroskopischen Phänomenbereich, wo das Plancksche Wirkungsquantum h verhältnismäßig keine bedeutsame Rolle spielt, kommt die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation in ihrer Bedeutung erheblich schwächer vor.

Ein anderer, vielleicht naiver aber nicht einfach zu vernachlässigender Punkt ist, daß die makroskopischen Dinge aus den mikroskopischen Teilen bestehen. Die Komplementaritätsrelation zwischen Definition und der Beobachtung eines physikalischen Systems soll eigentlich auch in makroskopischen Dingen zu beobachten sein, obwohl möglicherweise irgendwie schwächer hervortretend, so daß man sie praktisch ignorieren dürfte. Aber in dem Fall muß man weiter fragen, wie diese Abschwächung stattfindet, und welches Kriterium man hätte, die relativiert abgeschwächte Komplementarität ignorieren zu dürfen.

In der Tat stellt uns bei der Beschreibung der atomaren Phänomene das Quantenpostulat vor die Aufgabe der Ausbildung einer „Komplementaritätstheorie“, deren Widerspruchsfreiheit nur durch das Abwägen der Definitions- und Beobachtungsmöglichkeiten beurteilt werden kann. (Como, 38)

Vielmehr stellen die beiden Auffassungen der Natur des Lichtes zwei verschiedene Versuche einer Anpassung der experimentellen Tatsachen an unsere gewöhnliche Anschauungsweise dar, durch welche die Begrenzung der klassischen Begriffe in komplementärer Weise zum Ausdruck kommt. (*Como*, 39)

Im letzten historischen Teil über die Komplementaritätsthese wird der Zusammenhang von der Bohrschen Komplementaritätsidee und der Unbestimmtheitsrelation betrachtet. Bunge (1955) schreibt zum Beispiel:

The doctrine of complementarity is an interpretation of Heisenberg's uncertainty relations. (1)

Auch für Held (1994) ist der Zusammenhang der beiden ebenfalls wesentlich. Er stützt sich auf eine Textstelle im Como Vortrag, wo über den „in dieser Unsicherheit hervortretende[n] komplementäre[n] Zug der Beschreibung“ (39) gesprochen wurde¹⁵⁵, er betont, daß die Komplementarität durch die Unbestimmtheitsrelation gezeigt wurde.

3.3. Komplementaritätsbegriff: Sich-Ausschließen und Sich-Ergänzen

So würde man enttäuscht, wenn man z.B. in jenem Comoer Vortrag von 1927 eine Definition des neueingeführten Begriffs der Komplementarität suchte. [...] Fast unmerklich schleicht sich das Wort „komplementär“ in einen Satz ein, und dann ist es da und wird gebraucht.¹⁵⁶ (Weizsäcker (1990), 290)

Dieser Abschnitt soll dem Zweck dienen, die Basis für weitere Schritte in der Komplementaritätsdiskussion vorzulegen, indem ich hier trotz mangelnder definitiver Klarheit im Bohrs eigenen Text über den Komplementaritätsbegriff versuche, die Komplementarität begrifflich zu analysieren.

Wie Bohr selbst mal annimmt, scheinen der Begriff eines Terminus und dessen Anwendung in komplementärem Zusammenhang zu stehen¹⁵⁷. In diesem Sinne werde ich dann im nächsten Abschnitt 3.4. drei Fallstudien des Komplementaritätszusammenhangs machen,

¹⁵⁵ Die 'Unsicherheit' hier ist eine andere Formulierung für die genannte Unbestimmtheit.

¹⁵⁶ Weizsäcker erinnert sich an dieser Stelle auch an einem Satz von Bohr, „daß das Wesen unseres Bewußtseins ein Komplementaritätsverhältnis zwischen der Analyse jeden Begriffs und dessen unmittelbarer Anwendung bedingt“ (Bohr (1931), 13).

¹⁵⁷ Siehe Bohr (1931), 13.

wobei wiederum einige Rückwirkungen, kritische Ansätze, und auch Spezifizierung bzw. Erweiterung für die Bestimmung hervorgebracht werden sollen.

Genau wie bei dem Korrespondenzprinzip wird der Komplementaritätsbegriff in Bohrs Schriften noch nicht einmal in definitorischer Form ausgedrückt, etwa in der Form, „Komplementarität heißt ... oder „A und B sind komplementär, [genau dann] wenn ...“. Ich glaube, bezüglich des Komplementaritätsbegriffs stützte sich Bohr so viel auf den alltäglichen Gebrauch dieses Begriffes, daß er keine dringende Notwendigkeit zur gesonderten Begriffseinführung oder -erläuterung sah.

Wenn man die ersten Textstellen im Como Vortrag betrachtet, wo der Komplementaritätsbegriff vorkommt, ist zunächst von diesem Begriff der Aspekt von ‘Sich-Ergänzen’ deutlich. Komplementarität wurde dort in Kontrast dargestellt zum Widerspruch. Zugleich leuchtet mir ein, wenn zwei Dinge, A und B, sich ergänzen sollen, dann muß A *etwas* haben, was B nicht hat, und zwar grundsätzlich, und auch umgekehrt. Mit ‘grundsätzlich’ meine ich, daß B dieses *etwas* nicht zufällig fehlt, sondern B es grundsätzlich nicht leisten kann. Man kann von dem Komplementaritätsbegriff zwei Aspekte herausnehmen, und zwar, das Sich-Ausschließen und das Sich-Ergänzen, worüber offensichtlich auch verschiedene Bohr-Interpreten Einstimmigkeit zeigen.

Komplementarität ist eine Eigenschaft, die eine Relation von zwei Dingen¹⁵⁸ beinhaltet. Und sie besteht aus zwei Charakteristika. Das eine ist gegenseitiges Ausschließen, und das andere ist die gegenseitige Ergänzung. Das erstere heißt, ein solcher Fall werde ausgeschlossen, daß die in Frage stehenden zwei Komponenten auf einmal zusammen vorkommen. Nicht auf einmal zusammen vorzukommen, kann im unterschiedlichen Kontext Unterschiedliches heißen. Zum Beispiel in dem Begriffspaar von Korpuskel- und Wellencharakter des Elektrons und in einem anderen von klassischer und quantenmechanischer Beschreibungsweise¹⁵⁹ sollte das Sich-Ausschließen jeweils anders gedeutet werden. Die gegenseitige Ergänzung heißt, daß die beiden Relata für eine bestimmte Vervollständigung einander ergänzen, so daß man ohne eins von beiden die erzielte Vollständigkeit verfehlen wird. Die beiden Komponenten sind nämlich in dem gegebenen Zusammenhang notwendig.

Ein bekanntes und auch vergleichsweise anschaulicheres Beispiel für einen Komplementaritätszusammenhang ist das vom Korpuskular- und Wellencharakter des Lichtes. An

¹⁵⁸ Im Abs 5.2. wird die Erweiterungsmöglichkeit des Komplementaritätsbegriffs zu den Fällen mit drei oder mehreren Komponenten betrachtet.

¹⁵⁹ Auf diese Beispiele werde ich im nächsten Abschnitt (3.3.) detaillierter eingehen.

diesem Beispiel versuche ich den bisher nur knapp und abstrakt dargestellten Komplementaritätsbegriff ein Stück näher und konkreter vorzustellen.¹⁶⁰

Was bedeutet es, daß Korpuskelcharakter und Wellencharakter des Lichtes komplementär seien? Nach der ersten Begriffsbestimmung oben sollen sich die beiden Charakteristika gegenseitig ausschließen, und zweitens sollen sie jedoch einander ergänzen, so daß beide zusammen eine Vollständigkeit bilden.

Man fragt sich jetzt konkreter: Was heißt hier gegenseitiges Ausschließen? Heißt es logisches oder begriffliches Ausschließen? Ein Ausschluß nach dem Naturgesetz, oder bloß ein faktisches Ausschließen? Und wenn logisches, in welcher Weise, und wenn faktisches, in welcher? Demnach ist auch zu fragen, wie sich die beiden in der Tat ergänzen. Oder, anders formuliert, was hier eigentlich mit 'ergänzen' gemeint ist. Und wenn es um irgendwelche Notwendigkeit geht, um welche denn? Ist es eine logische Notwendigkeit, oder etwas anderes?

Ein Teil dieser Fragen scheint aufgrund Bohrs Auffassung der Komplementarität zu beantworten zu sein. In diesem Komplementaritätspaar mit den zwei Aspekten der Lichtphänomene ist auffällig, daß die Komplementarität hier keine rein logische Relation heißt ist.

Logische Gegensätze scheinen im ersten Augenblick als gutes Beispiel für die Komplementarität. Ein Paar von logischen Gegensätzen erfüllt offensichtlich die beiden Voraussetzungen für die Komplementarität. A und Nicht-A schließen, logisch gesehen, gegenseitig aus. 'Logisch ausgeschlossen' dürfte eigentlich im Kontext einer theoretischen Überlegung 'am strengsten ausgeschlossen' heißen. Interessant ist weiter, daß A und Nicht-A zusammen in gewisser Weise eine Vollständigkeit besorgen. Eine Aussage mit logischer Struktur 'p oder nicht-p' ist immer wahr, die Menge $(A \cup A^c)$ beträgt wie die Gesamtmenge U. Der Fall, daß eine rationale Zahl x kleiner als 2 ist, und der Fall, daß diese Zahl x gleich oder größer als 2 ist, schließen sich zwar aus, und außerdem decken sie zusammen alle Möglichkeit für die Zahl x ab. Aber das Problem ist, daß man nicht im Bohrschen Sinne sagen könnte, ' $x < 2, x \in \mathbb{R}$ ' und ' $x \geq 2, x \in \mathbb{R}$ ' seien komplementär. Hier darf uns der mathematische Begriff der komplementären Menge nicht irreführen.

Die logischen Gegensätze, die zusammen notwendigerweise zu einem Widerspruch führen, lassen sich meines Erachtens nicht gerecht komplementär nennen. In unserem Beispiel erscheint es auch sehr schwer, die *Welle* und das *Teilchen* an sich direkt zu einer Kontradiktion zu führen. Der Wellen- und Korpuskelcharakter des Lichtes sind an sich keine

¹⁶⁰ Im Abs. 4.4.1. wird dieses Komplementaritätspaar nochmals, und auch gründlicher, in Betrachtung gezogen.

logischen Gegensätze. Rosenfeld (1961) sah im Folgenden die Komplementarität als eine logische Relation:

Complementarity denotes the logical relation, of quite a new type, between concepts which are mutually exclusive, and which therefore cannot be considered at the same time because that would lead to logical mistakes, but which nevertheless must both be used in order to give a complete description of the situation. (385)

Komplementarität ist nach ihm eine logische Relation zwischen den Begriffen (*concepts*). Die Begriffe schließen sich aus, daher können sie nicht zugleich berücksichtigt werden, weil sie zu einem logischen Fehler führen. Jedoch seien sie beide für eine vollkommene Beschreibung der Situation notwendig.

Es ist sicher nicht auszuschließen, daß die Komplementarität eine logische Seite hat, aber es scheint mir zugleich schwierig, die Komplementarität in der Sprache der Logik erschöpfend zu bestimmen. Der Ort x und der Impuls p von einem Teilchen, z.B. einem Elektron, dienen bei Bohr als ein Beispiel für einen komplementären Zusammenhang. Kein *logischer* Fehler fällt auf, wenn man zugleich x und p dieses Teilchens *berücksichtigt*, das heißt, wenn man zum Beispiel auf einmal diese zwei physikalischen Quantitäten feststellen möchte. Im Rahmen der Newtonschen Mechanik ist es völlig in Ordnung, dieses zu verlangen. Auch im neuen Rahmen der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ist es nicht einfach, nach einem *logischen* Fehler zu suchen. Einen logischen Fehler findet man vielleicht erst dann, wenn man einen bestimmten Problemkontext als Hintergrund angenommen hat, zusammen mit einer Reihe der [dafür angemessenen] Basistheorie und Randbedingungen. Was ich hier verneinen will ist die Konzeption, daß eine Komplementaritätsrelation festzustellen sei, wenn man zwei geeignete Begriffe und die Logik hat. Man braucht einen klar begrenzten Problemzusammenhang. Im nächsten Abschnitt 3.4. kann ich vielleicht an drei Beispielpaaren für Komplementarität über diese Bedingung konkreter diskutieren.

Obwohl die Komplementarität von Welle und Teilchen nicht besagt, daß sie logische Gegensätze seien, heißt es jedoch auch nicht, daß sie zwei grundsätzlich verschiedene Sachen sind. Von einem Gemälde sieht man die Farbe, und auch die Gestalt. Farbe und Gestalt in einem Gemälde, und auch Melodie und Rhythmus in einem Lied ergänzen sich mit Sicherheit. Außerdem sind die Melodie, oder Tonhöhe, und der Rhythmus, oder Tonlänge, zwei grundsätzlich verschiedene Dinge, die nicht zu verwechseln sind. Verläßt man den Kontext Bohrscher Komplementarität, dann könnte man unter Umständen sagen, Melodie und Rhythmus eines Liedes sind komplementär, oder Inhalt und Form einer Rede, und so weiter. 'Komplementär' heißt im Alltag meistens genau soviel wie 'sich ergänzend'. Dennoch sind die gerade genannten Paare nicht *im Bohrschen Sinne* komplementär. Woran

liegt es? Es liegt daran, daß sie sich nicht ausschließen. Anders ausgedrückt, wird nicht ausgeschlossen, daß sie unter einer und derselben Bedingung zugleich vorkommen. Im Gegenteil, für ein Lied müssen die Melodie und der Rhythmus beide zugleich da sein. Ein klarer Unterschied zwischen dem Bohrschen Komplementaritätsbegriff und dem alltäglichen wäre dadurch veranschaulicht worden.

Die erste Klausel, das Sich-Ausschließen, obgleich sie konkret auf verschiedener Ebene Verschiedenes bedeuten mögen, klingt nicht leer, sondern sie verbietet, daß die beiden beteiligten Komponenten zugleich auftreten. Grob formuliert, im Falle einer Komplementarität in der Physik, wie bei dem Paar 'Welle-Teilchen', soll es heißen, daß es *physikalisch* unmöglich sei, daß sie unter einer und derselben physikalischen Bedingung zugleich auftreten.

Wir nehmen auch die zweite Charakteristik, Sich-Ergänzen, nochmals näher unter die Lupe. In dem ersten Satz oben, wo gesagt wurde, was das Sich-Ergänzen heißt, waren zwei Sachen enthalten. Das Sich-Ergänzen heiße:

- 1) die beiden Relata ergänzen sich für *eine bestimmte Vervollständigung*; so
- 2) daß man ohne eins von beiden die erzielte Vollständigkeit verfehlen wird.

Im ersten Punkt wird gesagt, daß das Sich-Ergänzen einen Zweck hat, und dieser ist eine bestimmte Vollständigkeit. Eine Seite von dem sich ergänzenden Paar soll die Lücke ausfüllen, die die andere Seite übrigläßt. Der zweite Punkt besagt etwas mehr über das Sich-Ergänzen. Theoretisch ist es zwar möglich, daß die erzielte Vollständigkeit auch allein von einer Seite des Paares abgedeckt wird. Aber 2) besagt, daß das Sich-Ergänzen hier kein leeres Wort sein darf, und daß nichts von den beiden eines komplementären Paares fehlen darf. Jede komplementäre Seite hat einen *eigenen* Anteil an der Vollständigkeit, der nicht gleich Null ist. Und ein solcher Fall wird ausgeschlossen, so daß eine von beiden Seiten die andere als ihre Teil(-menge) enthält. In der Tat erscheint ein solcher Fall vom Enthaltenszusammenhang mit dem Aspekt des Sich-Ausschließens inkompatibel.

<Relata der Komplementaritätsrelation?>

Bevor ich diesen Abschnitt abschließe, scheint es sinnvoll, noch hier kurz auf die folgende Frage einzugehen: Was sind die Relata in der Komplementaritätsrelation? Dies erscheint genau analog zu einer früheren Frage bei dem Korrespondenzprinzip. Bei diesem versuchte ich, nach den geeignetsten Relata für die Korrespondenzrelation zu suchen, oder zumindest durch das Qualifikationsverfahren die Kandidatenliste kürzer zu machen bzw. dem einzelnen Kandidaten Status anzusetzen. Aber die Lage für die Komplementaritätsrelation sieht anders aus.

Zunächst braucht man eine Aufzählung. Hier sind die Relata-Kandidaten, auch diesmal ohne den Anspruch auf Vollständigkeit:

- Begriffe (z.B. MacKay (1958))
- Beschreibungen (z.B. Heilbron (1988))
- Beschreibungsweisen
- Bilder (z.B. Weizsäcker (1988))
- Charakteristiken
- Erkenntnisse (z.B. Meyer-Abich (1965))
- experimentelle Anordnungen (Bohr in Como, Bohr (1937))
- Gesichtspunkte
- Phänomene (z.B. Held (1994))
- physikalische Eigenschaften
- physikalische Größe/ Observable (z.B. Mittelstaedt (1989))
- Sprache (z.B. Frank (1946))
- Theorien
- Vorstellungen (z.B. Hoyningen-Huene (1992))

In der obigen Liste können zum Beispiel physikalische Größe und Observable auch auseinander genommen werden, und zwischen Beschreibungen und Beschreibungsweisen besteht vielleicht nur ein subtiler Unterschied. Es ist nämlich in dieser Liste nicht wichtig, wieviel Einträge man hat. Diese Liste kann man auch ohne große Mühe erweitern, indem man die Literatur über die Komplementarität genauer unter die Lupe nimmt.

Natürlich muß das Problem der Relata für die Komplementaritätsrelation, was und was zum Beispiel in dem Komplementaritätsbegriff bei Bohr in Como 1927 komplementär sind, grundsätzlicher und ausführlicher behandelt werden. Ich wollte mit obiger Liste nur darauf hinweisen, daß die Komplementaritätsrelation für die verschiedenartigen Relata offen ist, solange sie die basale Voraussetzung für einen komplementären Zusammenhang erfüllt. Die Komplementarität zwischen Wellencharakter und Korpuskularcharakter des Lichtes, und die zwischen Wellenmechanik und Matrixmechanik, befinden sich auf unterschiedlicher Ebene. Obwohl in dieser Arbeit nicht betrachtet, sind die vielseitigen Anwendungen, die der Komplementaritätsbegriff in anderen Wissenschaftsbereichen fand und noch erweitert wurden, wie zum Beispiel in Psychologie und Ökonomie, aufgrund dieser Offenheit des Komplementaritätsbegriffs möglich. Im nächsten Abschnitt werde ich ein paar Probleme um den Begriff der Komplementarität diskutieren, die insbesondere von Heilbron als Fragen gestellt worden sind.

3.4. Analyse drei weiterer Fälle der Komplementarität

3.4.1. Wellen- und Korpuskularcharakter des Lichts

Was ist Licht? Woraus besteht es? Ist es eine Art Undulationsphänomen, oder ist es ein Bündel von winzig kleinen Teilchen? Diese und andere Fragen nach dem Wesen des Lichts sind uralt. Gebildet wurden in der Physik zwei grundsätzlich kontrastierende Hypothesen bzw. Theorien über dieses Thema: „Das Licht sei eine Welle.“ und „Es bestehe aus Teilchen.“ Es hat sich jedoch von der seit Anfang des 18ten Jahrhunderts — bei Newton, *Opticks* (1704) — bestehenden Debatte in der Physik¹⁶¹, die zwar nicht ausschließlich auf dem Gebiet der Optik durchgeführt wurde, keine eindeutige Antwort auf die Entweder-Oder-Frage ergeben. Im letzten und diesem Jahrhundert fanden auch beide Seiten experimentelle und theoretische Unterstützungen. Bemerkenswert ist, daß sowohl für die Wellentheorie als auch für die Korpuskulartheorie des Lichts jeweils eine Reihe entscheidender Momente herangezogen werden können, wie z.B. der Photoeffekt von Einstein für die Korpuskelseite und das Interferenzphänomen für die Wellenseite. Dies impliziert, man kann auf keine der beiden Theorien verzichten, wenn man den gesamten Bereich des Lichtphänomens als Gegenstand einer ‘Theorie des Lichts’ haben möchte.

Die Komplementaritätsthese von Bohr ist auch als eine Antwort auf das Problem der Dualität des Lichts zu deuten. Auch Heisenberg zeigte die Dualität des Lichts auf als eigentlichen Ansatzpunkt zur Formulierung des Bohrschen Komplementaritätsgedanken¹⁶². In diesem Abschnitt wird analysiert, wie dieses Paar aus dem Blickwinkel des in Abs. 3.3. diskutierten Komplementaritätsbegriffs aussieht. Weiter gesehen wird auch, welche zusätzlichen Aspekte und Probleme dieses Paar umgekehrt zum Begriff der Komplementarität bringen kann.

Erstens wird das Sich-Ausschließen in der Relation des Paares analysiert. Man fragt hierfür: Schließen sich Wellencharakter und korpuskulare Charakter des Lichts aus? Wie sieht das Sich-Ausschließen dort aus?

Zunächst kommen die zwei Begriffe, Welle und Teilchen, kurz zur Betrachtung. Abgesehen vom Kontext der Physik betrachtet, treten die Wellen und das Teilchen begrifflich nicht als Gegensätze hervor. Eine lexikalische Definition für die Welle lautet, z.B.,

¹⁶¹ Vgl. Achinstein (1991), 13.

¹⁶² Zum Beispiel in einer Erinnerung schreibt Heisenberg (1951), „Bohr hatte inzwischen den Begriff der Komplementarität entwickelt, mit dem er das Verhältnis von Wellenbild und Korpuskularbild zu fassen suchte.“ (53) Stolzenburg (1977) beschreibt die Genese der Komplementaritätsidee von Bohr von diesem Standpunkt, nämlich *von der Dualität der Welle und der Teilchen im Licht zur Komplementarität*. Siehe weiter Stolzenburg (1977), 147ff.

„schwingende, sich von einem Punkt fortpflanzende Bewegung“ (Wahrig, 1986). Andererseits ist ein Teilchen ein „sehr kleines Teilstück“. (Ebd.) Ich sehe aufgrund dieser beiden lexikalischen Bestimmungen keinen Grund dafür, daß sich die zwei Begriffe an sich ausschließen sollen. Eine Bewegung von bestimmter Art und ein Teilstück können in unterschiedliche Kategorien klassifiziert werden, und zwar jeweils in die Kategorie von ‘Bewegung’ oder ‘Zustand’, und in die Kategorie von ‘Dingen’. Ich gehe in den Kontext der Physik über, wo vielleicht die sich ausschließende Relation zwischen beiden sichtbar wird, wenn überhaupt eine solche Relation dort besteht. Logisch gesehen ist das Sich-Ausschließen eine notwendige Bedingung für die Komplementarität. Wenn es nicht gelingt, das Sich-Ausschließen in diesem Paar festzustellen, gerät die Komplementaritätsrelation dort auch in Gefahr.

Der Begriff der Welle ist sehr umfangreich, wenn auch im physikalischen Kontext eingeschränkt betrachtet. Es gibt zum Beispiel die Welle auf der Meeresoberfläche, die auch physikalisch genähert beschrieben wird, die Welle mit dem Stoffband einer Rhythmussturnerin, und die Welle in der Akustik, und noch viele andere. Es gibt auch die Welle, die mit einem Erdbeben verbunden ist und auf einem Richtergerät anschaulich wird. Der Wellenbegriff in der Physik wird jedoch nicht in so einem sichtbaren bzw. hörbaren Bereich begrenzt. Die ‘Materiewelle’, mit einer Wellenlänge gleich der Planckschen Konstante durch den Impuls p , ist heute ein vertrauter Begriff in den Lehrbüchern der Physik, aber sie hat kaum etwas zu tun mit dem Sehen oder Hören.

Die Welle in der Physik ist, meiner Ansicht nach, keine Gattung des Existierenden wie Giraffe oder Säugetier, sondern ein Begriff für die Struktur einer mathematisch aufgebauten Theorie, womit man ein physikalisches Phänomen beschreiben bzw. ein physikalisches Problem behandeln kann. Es gibt Phänomene, die man *mehr oder weniger* gut mit dieser Struktur systematisch beschreiben, erklären und gegebenenfalls auch voraussagen kann. Wenn es einem sehr gut, oder sogar offensichtlich lückenlos gelingt, eine Reihe der Phänomene des Lichts wellentheoretisch zu erklären, dann wird gesagt, das Licht habe Wellencharakter. In der Tat gibt es eine Menge empirisch fundierte *Phänomene*, wie z.B. die Interferenz im Doppelspaltexperiment, wo sich eine wellentheoretische Behandlung effizient und fruchtbar erweist, und wo die empirischen Tatsachen den wellentheoretischen Bedingungen zu gehorchen scheinen, beispielsweise dem Superpositionsprinzip.

Betreffs des Teilchenbegriffes in der Physik findet man auch nichts klar Definitorisches. Wie in obiger lexikalischer Definition gesehen, würde man sich vielleicht ein kleines Stück Materie vorstellen. Aber wenn ein Physiker sagt, daß das Licht das Korpuskularcharakter habe, soll man ihn nicht weiterfragen, ob ein Lichtkorpuskel hart oder weich ist, ob es rund oder kantig ist, ob es transparent ist oder nicht, usw. Womit soll man dann im hiesigen Kontext ein Teilchen charakterisieren, daß man es der Welle gegenüber stellen kann?

Erstens hat ein Teilchen das Charakteristikum der Individualität, oder anders formuliert, der Diskontinuität. Die Individualität ermöglicht, daß man dem Teilchen je nach der Situation bestimmte Eigenschaften zuschreiben kann. Zum Beispiel soll es für ein Teilchen möglich sein, dessen Ort zu einem Zeitpunkt anzugeben, und es hat auch üblicherweise eine bestimmte Masse, Impulse, und Energie. Die Individualität bzw. die Diskontinuität bedeutet auch, daß die Teilchen zu zählen sind, was im sogenannten Einsteinschen Fotoeffekt (1905) eine Bedeutung hatte.

Weiterhin ist ein Teilchen vom Standpunkt der klassischen Physik etwas, was den Sätzen der Newtonschen Mechanik und klassischen Elektrodynamik unterliegt. Ein Teilchen mit elektrischer Ladung im elektromagnetischen Feld bewegt sich nach dem Coulombschen und Newtonschen Gesetz. Was aber für die Teilchen nicht gilt, ist das Superpositionsprinzip. Keine zwei Teilchen besitzen zugleich den gleichen Ort, die Superposition gilt nicht für Teilchen.

Wenn ich an dieser Stelle auf meine erste Frage zurückkomme, wie das Sich-Ausschließen in diesem Paar ist, dann werde ich zunächst sagen, daß nicht die zwei Begriffe an sich, Welle und Teilchen, gegeneinander stoßen. Wo sollte man dann die Relation des Sich-Ausschließens plazieren?

Vom Beispiel dieses Paares ist über das Sich-Ausschließen der Komplementarität eine erste Schlußfolgerung zu ziehen, daß das Sich-Ausschließen hier weder logisches Ausschließen¹⁶³ noch schlicht Verschiedenheit zwischen zwei Dingen heißt. Erstens kann dieses Paar nicht in dem Schema eines Zusammenhanges zwischen A und Nicht-A analysiert werden. In einer Komplementaritätsrelation schließen sich beide Relata *nicht in jeder Hinsicht* aus, sondern nur *in einem bestimmten Kontext*, wie z.B. in der physikalischen Behandlung des Lichtphänomens. Eine Welle und ein Teilchen schließen sich zwar nicht ontisch¹⁶⁴, sondern nur von einem bestimmten Gesichtspunkt her betrachtet aus, der wiederum den Hintergrund eines bestimmten (physikalischen) Problems voraussetzt. Eine ontologische Deutung des Sich-Ausschließens läßt das hier unentbehrlich auftretende Element des Problemkontextes oder Gesichtspunktes¹⁶⁵ wegfallen, deswegen ist es nicht geeignet.

¹⁶³ Vgl. Rosenfeld (1961), 385. Rosenfeld schreibt, „Complementarity denotes the logical relation...between concepts“. Er argumentiert dafür, daß zwei komplementäre Begriffe nicht zugleich zu berücksichtigen seien (weil sie sich ausschließen). Es führe zu einem logischen Fehler.

¹⁶⁴ Vgl. Held (1995), 875. Dort schreibt Held, daß die Komplementarität der Eigenschaften ontische Relation sei.

¹⁶⁵ Wenn man zum Beispiel fragt, ob Arbeiten und Spielen sich ausschließen, dann ist es nicht einfach, darauf entschieden bejahend oder verneinend zu antworten. Und zwar, weil es nicht klar ist, in welchem Zusammenhang über diese beiden die Rede ist. Es ist währenddessen klar, daß derjenige, der die zwei für sich ausschließend hält, bezüglich dieses Paares an etwas Anderes als derjenige denkt, der dort nein sagt. Sie sehen das Paar nämlich aus verschiedenen Perspektiven, und man kann nicht eine sinnvolle Entscheidung treffen, bevor der Problemkontext geklärt wird.

Zweitens, nachdem ich gegen die Deutung des Sich-Ausschließens als logischen Widerspruch argumentierte, muß ich hier eine Bemerkung hinzufügen, um die andere extreme Möglichkeit auch zu vermeiden. Sich-Ausschließen in dem Komplementaritätszusammenhang ist mehr als bloße Verschiedenheit zwischen zwei beteiligten Komponenten. Wenn man das Sich-Ausschließen mit Verschiedenheit gleichsetzt, dann wird die Bedingung des Sich-Ausschließens so schwach, daß jedem Paar von zwei nicht identischen Sachen das Sich-Ausschließen zugeschrieben wird.

Sich ausschließend können im gewissen Sinne zwei Mengen von Phänomenen sein, die jeweils einer von beiden Theorie unterliegt. Das Problem ist aber immer noch nicht geklärt, weil es in der Tat nicht der Fall ist, daß ein Phänomen immer entweder auf die Welle-Seite oder auf die Korpuskel-Seite auftritt, und zwar lückenlos entschieden. Für ein Phänomen ist ein wellentheoretischer Zugang immer nur *mehr oder weniger* gut, es lassen viele Phänomene beide theoretische Zugänge zu.

Bezüglich des Sich-Ausschließens zwischen Wellen- und Korpuskularcharakter des Lichts ist ein Punkt noch zu berücksichtigen: der Zusammenhang von diesem Sich-Ausschließen und den experimentellen Anordnungen. Dieser Zusammenhang wurde auch von Bohr selbst deutlich hervorgehoben. Ein experimentelles Setup, wodurch der Wellenaspekt des Lichts gezeigt werden soll, wie in dem Interferenzexperiment mit Doppelspalte, kann nicht zugleich den korpuskularen Charakter des Lichtes anschaulich machen, und *vice versa*.

Ich versuchte, das Sich-Ausschließen im Paar Welle-und-Teilchen des Lichts klar zu machen. Es gibt keine klare und eindeutige Antwort, jedoch einige Möglichkeiten zur Beantwortung und auch ein paar Schlußfolgerungen sind möglich: 1) Nicht an sich die zwei Begriffe, von Welle und von Teilchen, schließen sich aus. 2) Jedoch konkurrieren können zwei Arten des theoretischen Zugangs, nämlich wellentheoretische und teilchentheoretische, zu einem Phänomen, z.B. dem Fotoeffekt, oder Interferenz mit Doppelspalt. In der Tat fand das Gegenüberstehen von jenen zwei Ansätzen in diesem Zusammenhang statt, d.h. vom Standpunkt der Frage, welche theoretische Struktur dem Phänomen des Lichts die Erklärung noch zufriedenstellender und systematischer gibt. 3) Im Sinne von 2) sind zwei sich ausschließende Mengen *denkbar*, die jeweils Menge von den physikalischen Phänomenen ist und auch jeweils einem theoretischen Zugang unterliegt. Das Problem ist hier jedoch, daß man in Wirklichkeit den Fall treffen kann, wo man nicht klar weiß, zu welcher Menge er denn gehören soll. 4) Eine relativ klare Deutung fürs Sich-Ausschließen kann man zwischen zwei experimentellen Einrichtungen sehen, von wo her jeweils eine Reihe Ergebnisse für einen von den beiden Aspekten erworben wird.

Wenn es um das Sich-Ergänzen des Paares geht, kann man zunächst sagen, daß sich der Wellencharakter und der Korpuskularcharakter des Lichts so ergänzen, daß sich daraus der gesamte Charakter des Lichts ergibt. Wenn einem das eine davon oder das andere fehlt, besagt dort die Komplementaritätsthese, daß man nicht *den* Charakter des Lichtes umfassend erfaßt habe. Man brauche unbedingt die beiden Seiten.

Aber wenn man diesen Fall näher anschaut, merkt man, daß es sich hier auch nicht um eine Garantie der Umfassendheit handelt. Wellencharakter und Korpuskularcharakter des Lichts ergänzen sich, so daß die beiden *notwendige* Bedingungen für das umfassende Verstehen über das Licht sind. Aber meiner Ansicht nach reicht die Gesamtheit von beiden zusammen nicht unbedingt für eine *hinreichende* Bedingung für die Umfassendheit. Ich meine, es wird nämlich nicht völlig ausgeschlossen, daß irgendwann mal eine Reihe neuer Phänomene des Lichtes auftauchen können, die diesmal weder durch Wellen- noch Korpuskularcharakter erschöpfend aufgefaßt werden könnten. Dies impliziert eine wichtige Schlußfolgerung, wichtig auch in Bezug auf die Rolle der Komplementarität in der Theoriendynamik, über die ich im nächsten Kapitel diskutieren werde.¹⁶⁶ Komplementarität heißt nicht Abgeschlossenheit. Zu einem Zusammenhang, wo Komplementarität besteht, kann noch ein weiteres komplementäres Element hinzukommen, so daß eine neue Komplementaritätssituation entstehen wird. Komplementarität in diesem komplizierten entwickelten Zusammenhang kann jedoch durch das Sich-Ausschließen und Sich-Ergänzen in jedem Paar aus den drei Komponenten gesichert werden.

Eine Gefahr besteht hier, daß man den Eindruck bekommen kann, daß das Licht eigentlich von seinem Wesen her oder, anders formuliert, ontisch eine bestimmte Menge Eigenschaften hätte, und daß diese Eigenschaften in zwei unverkennbar unterschiedliche Teilmengen zu gruppieren wären, und zwar restlos. Es ist eine Gefahr, weil gerade dann der ontologische Gesichtspunkt den epistemologischen ersetzt, und zwar nochmals zu Unrecht wie bei dem Sich-Ausschließen.

Wichtig erschien in obiger Diskussion, daß das Komplementaritätsargument, sowohl auf dem Punkt des Sich-Ausschließens als auch auf dem Punkt des Sich-Ergänzens, einen bestimmten Problemkontext als Hintergrund verlangt. In diesem Sinne kann man weiter sagen, daß in der Tat zwei Theorien zu einem komplementären Kontrast kommen können, die jeweils mit Wellenaspekt und Korpuskelaspekt des Lichts verbunden sind. Auf das Problem der Komplementarität zwischen zwei (Hintergrund-)Theorien gehe ich im nächsten Abschnitt näher ein.

¹⁶⁶ Siehe Abs. 5.2.

3.4.2. Heisenbergsche Quantenmechanik und Schrödingersche Wellenmechanik

Sie waren die zwei Säulen der frühen Quantenmechanik: die Heisenbergsche Quantenmechanik und die Schrödingersche Wellenmechanik. Daß die zwei Theorien mathematisch äquivalent seien, wurde ziemlich bald nach ihrer Entstehung nicht nur klar erkannt sondern auch von Dirac und von Neumann rigoros gezeigt. Man muß jedoch darauf achten, daß sie von ihrer Genese her bis vor dem Como Kongreß 1927 eigentlich als Gegensätze angesehen wurden, wie wir in 3.1. betrachteten. Andererseits konnte man schon in einer Heisenbergschen Arbeit vom Jahre 1926 einen anderen Standpunkt erkennen, daß sie sich nämlich auch gegenseitig ergänzen sollen. Der Gegensatz und das Sich-Ergänzen von den zwei Theorien führen zusammen, so möchte ich denken, zu einer Komplementarität. Dieser Komplementaritätszusammenhang hat eine weitere Bedeutung, die am Ende des letzten Abschnittes kurz erwähnt wurde. Er kann nämlich in Verbindung zur Komplementarität zwischen dem Teilchen- und dem Wellenbild¹⁶⁷ betrachtet werden.

Bestimmt anders sieht die Komplementarität zwischen zwei Theorien aus als die zwischen zwei Begriffen oder zwei Vorstellungen. Ich komme in diesem Abschnitt zur Frage, wie sie aussieht, wie das Sich-Ausschließen und Sich-Ergänzen von zwei Theorien zu veranschaulichen sind.

Wie können sich zwei, zum Beispiel physikalische, Theorien ausschließen? Anders formuliert, unter welcher Bedingung kann gesagt werden, daß zwei Theorien sich ausschließen? Erstens ist dies aus einer logischen Perspektive zu betrachten. Es ist durchaus denkbar, daß zwei Theorien, zusammen genommen, das heißt, wenn man die *beiden* Theorien zugleich als 'wahre' Theorien annehmen würden, einen logischen Widerspruch auftreten lassen können. Anders ausgedrückt, sind die beiden Theorien dann logisch unvereinbar. Wenn zum Beispiel Theorie A besagt, „Die physikalische Quantität a ist konstant.“, während eine andere Theorie B, „ a ist nicht konstant, sondern variiert von b abhängig.“, dann kann man zwischen den beiden Theorien eine gewisse logische Unvereinbarkeit erkennen. Im Sinne einer solchen logischen Unvereinbarkeit kann das Sich-Ausschließen gedeutet werden. Zu beachten ist hier, wie Hoyningen-Huene (1992) diskutiert, daß man zum Beispiel die Newtonsche Gravitationstheorie und das Galileische Fallgesetz zu einem klaren logischen Widerspruch kommen lassen kann¹⁶⁸. Jedoch betrachtet man die zwei hauptsäch-

¹⁶⁷ Wenn wir hier unter vielen Möglichkeiten beliebig die 'Bilder' als das nehmen, was komplementär ist.

¹⁶⁸ Aus der einen (Newton) ist zu schließen, daß 'g', die Beschleunigung durch die Erdeanziehungskraft, variabel sein soll, und zwar variierend von dem Abstand zwischen dem in Frage stehenden Gegenstand und Erdezentrum abhängig, während in der anderen (Galilei), daß 'g' eine Konstante ist.

lich nicht als zwei unvereinbare Theorien, sondern sieht man im Galileischen Fallgesetz einen Spezialfall der noch grundlegenderen Gravitationstheorie von Newton.

Zweitens ist der folgende Fall denkbar, daß zwei Theorien zwei unterschiedliche Anwendungsbereiche haben, die sich wesentlich nicht überlappen.¹⁶⁹ Dann wäre zu sagen, daß ihr Zusammenauftreten nicht stattfinden werde, das heißt, daß sie nicht zugleich auf ein und demselben Problem bzw. Phänomen zur Anwendung kommen werden, und daß sie sich in diesem Sinne ausschließen. Diese Version scheint jedoch eine sofort bemerkbare Schwierigkeit zu haben, wenn wir uns daran erinnern, wie es schon klar wurde, daß für einen Komplementaritätszusammenhang ein gemeinsamer Bezug auf einen Gegenstand vorausgesetzt ist. Dies wäre dann auch so zu deuten, daß die zwei komplementären Theorien einen gemeinsamen Gegenstandsbereich besitzen sollen. Wenn man diesen Punkt berücksichtigt, so wie es gerade aussieht, dann kommt der zweite Fall mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen für die Komplementarität als nicht relevant vor. Ich finde dennoch, daß diese Möglichkeit mit sich ausschließenden Anwendungsgebieten einen interessanten Standpunkt bietet.¹⁷⁰

Um den Konflikt zwischen dieser Möglichkeit und der Forderung nach dem gemeinsamen Bezug im Komplementaritätszusammenhang zu vermeiden, sollte man in diesem Fall, Komplementarität zwischen zwei Theorien, den Begriff vom gemeinsamen Bezug modifizieren. Es geht nicht wirklich um eine Modifikation, sondern eher um eine Verschärfung. Im Fall von Komplementarität zwischen Wellen- und korpuskularem Charakter des Lichts nehmen die zwei komplementären Charakteristiken Bezug auf den gemeinsamen Gegenstand: *das Licht*. Zu beachten ist jedoch, daß diese gemeinsame Bezugnahme eben nicht bedeutet, daß die beiden Aspekte des Lichts auf ein und dasselbe Lichtphänomen ihren Bezug nehmen sollen. Unter den Lichtphänomenen sind diejenigen, für die die Wellenvorstellung als relevant auftritt, und andererseits sind auch diejenigen, wofür die Korpuskelvorstellung geeignet ist. Die Voraussetzung des gemeinsamen Bezugs wird hier erfüllt, indem jede Vorstellung, Welle und Korpuskel, für einen Teil vom gesamten Bereich des Lichtphänomens verantwortlich ist. Die Frage über die Komplementarität, ob die zwei einen gemeinsamen Bezug haben, kann meines Erachtens besser in folgender Weise umformuliert werden: Ob die zwei (Teil)Mengen (z.B. von den Phänomenen für die Wellentheorie des Lichts und von denjenigen für die Korpuskeltheorie) eine sinnvolle Gesamtmenge (die Lichtphänomene) bilden. Diese Diskussion der Komplementarität zwischen zwei Theorien angewandt kann man folgendermaßen argumentieren: Zwei Theorien mit zwei unterschiedlichen

¹⁶⁹ Es ist zu beachten, daß dieser zweite Ausschließensmodus auch mit dem ersten zusammenzustellen ist. Über diese Möglichkeit wird in den folgenden Kapiteln weiter diskutiert.

¹⁷⁰ Diese Möglichkeit wird im nächsten Abschnitt (3.4.3.) und auch in folgenden Kapiteln weiter betrachtet.

und nicht überlappenden Gegenstandsbereichen *können* komplementär sein, solange die zwei Gegenstandsbereiche einen sinnvollen einheitlichen Gegenstandsbereich bilden.

Drittens kommt eine andere Möglichkeit in Betracht. Zwei Theorien stehen auf zwei verschiedenen, und grundsätzlich unvereinbaren Vorstellungen, oder Ideen, und können nur auf solchen Basen jeweils als eine funktionsfähige Theorie auftreten. Solche Grundvorstellungen können von einer epistemologischen Art, oder von einer ontologischen, oder auch möglicherweise von einer nicht-wissenschaftlicher Art sein.¹⁷¹ Zwischen zwei Konkurrenztheorien können auch nicht einfache sondern mehrfach komplizierte Konflikte aufgrund mehrerer Unvereinbarkeiten bestehen. Man beachtet hier, daß zwischen der Heisenbergschen Matrizenmechanik und Schrödingersche Wellenmechanik schon längst mathematische Äquivalenz gezeigt worden war, als zwischen diesen immer noch, auch nach dem Como Kongreß, eine Konflikt- und Konkurrenzsituation bestand. Wir haben schon beobachtet, daß nicht die mathematische Struktur der neuen Schrödingerschen Theorie sondern eigentlich das physikalische Bild, worauf sie fußt, Heisenberg und auch Bohr in Kopenhagen nicht gefiel¹⁷². Die Schrödingersche Wellenmechanik an sich schließt nicht die Existenz der stationären Zustände des Atoms aus. In den heutigen Lehrbüchern der Quantenmechanik erscheint die Schrödingersche Wellenfunktion in Form der Zustandsfunktion, worin die Idee der sich in Diskontinuität befindenden Energiezustände des Atoms mit der wellenmechanischen Vorstellung harmonisch verschmolzen ist.

Sich-Ausschließen zwischen zwei Theorien heißt nicht, daß sich die zwei Theorien in jedem Punkt und in jeder Hinsicht ausschließen. Zwei konkurrierende Theorien können möglicherweise viel Gemeinsames und nur noch wenig Unterschiedliches beinhalten. Aber wenn sich diese Unterschiedlichkeit auf einem neuralgischen Punkt befinden würde, dann wäre eine Auseinandersetzung nicht zu vermeiden.

Vierte Möglichkeit ist, daß die basalen Begriffe in einer Theorie, oder einige davon, vom Standpunkt der anderen Theorie als etwas Unverständliches, und folglich als in dem Problembereich nicht anwendbare Begriffe erscheinen. Es heißt, wenn man eine Theorie voll akzeptiert, dann kann man nicht einmal mehr mit der anderen Theorie anfangen, weil die Begriffe dort unverständlich erscheinen. Hätte man die Korpuskeltheorie des Lichtes angenommen, dann wäre die 'Wellenlänge' oder die 'Schwingungszahl' des Lichtes etwas Rätselhaftes.

¹⁷¹ Zum Beispiel, von einer religiösen oder theologischen Art, wie in den Fällen von Auseinandersetzung zwischen der kirchlichen Lehre und einigen entgegengesetzten theoretischen Ansätzen.

¹⁷² Umgekehrt kann es auch geschildert werden. Für Schrödinger war der größte Stolperstein an der Kopenhagener Quantentheorie die Grundvorstellung von Bohr, daß es die Quantensprünge gibt, anders formuliert, daß im atomaren Bereich eine gewisse wesentliche Diskontinuität besteht.

Fünftens und letztens, können wir das Sich-Ausschließen von zwei Theorien auch in der sich ausschließenden Methodologie von den beiden Theorien beobachten. Was kann aber dann heißen, daß zwei Methodologie sich ausschließen? Das kann zunächst auch mit dem gerade diskutierten begrifflichen Sich-Ausschließen verknüpft betrachtet werden, denn, wenn die obige vierte Möglichkeit der Fall wäre, dann könnte man auch nicht einmal die Methodologie der zweiten Theorie in Gang bringen, weil die konstitutiven Begriffe in der Methodologie unverständlich sind. Aber auf dem Punkt des methodologischen Sich-Ausschließens muß ein weiterer Punkt berücksichtigt werden, ein zentraler Punkt in der frühen Version Bohrscher Komplementarität. Wenn man das ‘wellenartige’ Licht, oder anders gesagt die Wellenseite des Lichtes, beobachten möchte, müßte man ein experimentelles Setup einrichten, zum Beispiel eins mit Doppelspalten für das Interferenzphänomen. Daß man aus diesem Setup dann nicht die Korpuskelseite des Lichtes hervortreten lassen kann, besagt offensichtlich ein weiteres Sich-Ausschließen.

Jetzt kommt der andere Aspekt der Komplementarität in Betrachtung: das Sich-Ergänzen. In den vorherigen Diskussionen über den Begriff der Komplementarität sind einige Punkte bezüglich Sich-Ergänzen klar geworden: Daß sich die beiden komplementären Komponenten zu einer Vollständigkeit ergänzen sollen, und daß für die Vollständigkeit nichts von denen ausfallen darf. Es war jedoch im Komplementaritätsbegriff nicht enthalten, daß mit den zwei komplementären Seiten die Vollständigkeit garantiert erreicht wird. Diese Punkte betreffen auch die Komplementarität zwischen den Theorien. Wenn zwischen Heisenberg-scher und Schrödingerscher Quantenmechanik eine Komplementarität gesehen wird, dann heißt es, beide Theorien seien notwendig für eine vollständige quantenmechanische Beschreibung bzw. Erklärung physikalischer Phänomene, aber nicht jedoch, daß diese zwei zusammen eine hinreichende Bedingung für eine solche Vollständigkeit sichern können.

Nochmals konkret gefragt, *wie* können sich dann zwei Theorien ergänzen? Von den obigen fünf Punkten über das Sich-Ausschließen können wir zwei auch für Sich-Ergänzen anzuwenden versuchen: Sich-Ergänzen in dem Anwendungsbereich und in der Methodologie. Daß sich zwei komplementäre Theorien auf einen gemeinsamen Gegenstand beziehen müßten, und daß sie die sich ergänzenden Anwendungsbereiche besitzen, ist meiner Ansicht nach nicht etwas Widersprüchliches. Dies kann man nämlich wie folgt deuten: Obwohl zwei Theorien grundsätzlich einen gemeinsamen Gegenstand hätten, wie z.B. ‘physikalische Phänomene’ oder ‘Lichtphänomene’, ist eine Untergliederung zu machen, so daß zwei Theorien jeweils als zuständig für eine Teilmenge des eigentlichen Gegenstand[sbereich]s erscheinen sollen. Hier stellt sich die Frage, wenn man noch das Sich-Ausschließen dort berücksichtigt, ob es sich dann wirklich um *einen* Gegenstand handelt, oder ob es dort wie zwei ver-

schiedene Gegenstandsbereiche genommen werden sollte. Dies wäre jedoch eine Frage der Konvention.

3.4.3. Klassische Mechanik und Quantenmechanik

Zuletzt in diesem Kapitel möchte ich diskutieren, von einer Zeile im Bohrschen Vortrag ausgehend, „Licht und Leben“ (1933), über die Komplementarität zwischen der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik. Die Worte von Bohr waren wie folgt:

So besteht ein Komplementaritätsverhältnis zwischen jedem eindeutigen Gebrauch des Begriffs des stationären Zustandes und einer mechanischen Analyse der Bewegungen der Teilchen innerhalb der Atome. (1933, 188)¹⁷³

Hier und in den vorhergehenden Zeilen in dem Vortrag ist zu beobachten, daß Bohr das eigentliche Standardmodell für den Komplementaritätszusammenhang in den zwei Aspekten des Lichtes findet. Wir fragen: Wie steht die Komplementarität zwischen klassischer und Quantenmechanik gegenüber diesem Standardbeispiel? Hoyningen-Huene (1992) analysiert den ersteren Komplementaritätszusammenhang in drei Punkten. Erstens, „[s]owohl mit dem *Begriff* des stationären Zustands als auch mit einer mechanischen Analyse der Bewegung der Teilchen der Atome werden verschiedene, aber unentbehrliche Aspekte ein und derselben Sache erfaßt.“ (249, Hervorhebung von I.Ko) Zweitens, „[e]s besteht von einem bestimmten Standpunkt aus *theoretische Unvereinbarkeit* zwischen jedem eindeutigen Gebrauch des Begriffs des stationären Zustands und einer mechanischen Analyse der Bewegungen der Teilchen innerhalb der Atome.“ (249, Hervorhebung von I.Ko) Und als der dritte Punkt: „Aus physikalischen Gründen können der eindeutige Gebrauch des Begriffs des stationären Zustands und eine mechanische Analyse der Bewegungen der Teilchen innerhalb der Atome nicht in direkten Widerspruch kommen.“ (250) Die physikalischen Gründe bedeuten, daß eine Versuchsanordnung, bei der die (klassisch) mechanische Seite der Elektronenbewegung analysiert wird, nicht zugleich den Begriff der stationären Zustände sinnvoll anwendbar auftreten läßt.

¹⁷³ In der englischen Auffassung, die 1932 publiziert wurde, stehen diese Zeilen wie folgt: „Thus, the unambiguous use of the concept of stationary states stands in a similar relation of complementarity to a mechanical analysis of intra-atomic motions as do light quanta to the electromagnetic theory of radiation.“ (6) Eine auf der selben Linie zu deutende Formulierung über die Komplementarität zwischen klassischer Physik und der Quantenmechanik findet man auch in Bohr (1935): „Just as in the question discussed above of the mutually exclusive character of any unambiguous use in quantum theory of the concepts of position and momentum, it is the last resort this circumstance which entails the complementary relation between any detailed time account of atomic phenomena on the one hand and the unclassical features of intrinsic stability of atoms, disclosed by the study of energy transfers in atomic reactions on the other hand.“ (701)

Das Komplementaritätspaar vom letzten Abschnitt, Heisenbergsche und Schrödingersche Quantenmechanik, könnte für die Komplementarität in diesem Paar aufschlußreiche Analogie anbieten, solange es sich auch um die Komplementarität von zwei *Theorien* handelte. Die Komplementarität zwischen Theorien kann nämlich auf einer logisch-begrifflichen, einer methodologischen Ebene, und auf der Ebene des Anwendungsbereichs analysiert werden. Eine solche Analyse führe ich hier nicht analog wiederholend durch. Der Sinn dieses dritten Beispiels für einen Komplementaritätszusammenhang besteht darin, daß ich die Komplementarität in den Kontext der Theoriendynamik einführen möchte.

In Bezug auf die Theoriendynamik ist die Komplementarität zwischen klassischer Physik und der Quantenmechanik interessant, weil es sich dort möglicherweise um Vorgänger- und Nachfolgertheorie handelt. Genauer gesagt ist dies keine wirklich passende Bezeichnung, weil die klassische Theorie der Physik wie die Hamiltonsche Mechanik und Elektrodynamik gar nicht der Quantenmechanik ihren Platz vollständig geräumt hat, sondern die klassischen und quantenmechanischen Theorien heutzutage immer noch in der Physik nebeneinander stehen. Wie könnte man dann den Zusammenhang von den beiden Systemen physikalischer Theorie besser bezeichnen? Eine meines Erachtens treffliche Formulierung bezüglich dieses Problems ist bei Folse (1985) zu finden:

Bohr's conviction that the new mechanics was on the right track seems to be linked to the fact that it *limited*, but did not *discarded* the classical concepts used to express the mechanical pictures. (100, Hervorhebungen im Original)

Es ist auch nicht nur die Meinung von Folse. Bohr selber brachte auch an mehreren Stellen deutlich zum Ausdruck, daß die neue Mechanik nicht die globale Widerlegung, sondern eine Begrenzung (*limitation*) der klassischen Theorien der Physik sei. Und der Komplementaritätsbegriff diene, so Bohr (1933), „als Symbol für die in der Atomphysik auftretende fundamentale Begrenzung unserer gewohnten Vorstellung einer von den Beobachtungsmitteln unabhängigen Existenz der Phänomene.“(189) Eine solche „gewohnte“ Vorstellung einerseits verdankt sich den, und andererseits ist grundlegend für die, klassischen Theorien der Physik.

Daß die Quantenmechanik die Begrenztheit der klassischen Physik sichtbar werden ließ, heißt in der Tat zugleich, daß sie jenseits dieser Grenze, wo sich die klassische Theorie als unzulänglich erwies, als eine geeignete kompetente Theorie aufgekommen ist. Die Grundform der Bohrschen Darstellung dieser Lage sah in 20er Jahren etwa wie folgt aus: „Für den atomaren Bereich haben sich die klassischen physikalischen Ideen als nicht anwendbar gezeigt.¹⁷⁴ Durch die neue Atomtheorie, die in verschiedener Hinsicht fundamen-

¹⁷⁴ Siehe die ersten Zeile des Como Vortrages.

tale Abweichungen von den klassischen Ideen zeigt, kann man aber jetzt den Phänomenen in diesem Bereich auch gerecht werden.“ Wie wäre es dann für den sonstigen, und zwar, nicht-atomaren Bereich? Für diesen sonstigen Bereich, in dem sich die klassische Physik noch unter keine Begrenzung unterziehen mußte, wie z.B. im Problem der schiefen Ebene oder der Bewegung eines freien Elektrons in einem elektromagnetischen Feld, war damals noch keine ernsthafte Diskussion als Folge der Quantentheorie. Die Physiker arbeiteten an der Konstruktion einer neuen Theorie für einen wesentlich neuen Bereich der Phänomene, und diese Bemühungen trugen schnell Früchte.

Ich glaube, daß das Sich-Ausschließen in diesem Paar nicht schwer in verschiedenen Punkten sichtbar zu machen ist. Das Problem wäre dann das Sich-Ergänzen zwischen der klassischen Mechanik und Quantenmechanik.

Bei solchen Berechnungen haben wir es mit einer typischen Anwendung des sog. Korrespondenzargumentes zu tun, das ein Ausdruck für unsere Bestrebung ist, bei passend eingeschränkter Benutzung mechanischer und elektromagnetischer Vorstellungen eine statistische Beschreibung der atomaren Phänomene zu erhalten, die sich als eine rationale *Verallgemeinerung* der klassischen physikalischen Theorien darstellt, obwohl das Wirkungsquantum vom Standpunkt dieser Theorien aus als eine Irrationalität betrachtet werden muß. (187, Hervorhebung von I.Ko)

Eine Theorie, wie zum Beispiel die klassische Elektrodynamik, die auch anhand eines Lehrbuches unter dem selben Titel gelehrt und gelernt wird, ist in der Tat meist eine Zusammensetzung von verschiedenen Komponenten, wie zum Beispiel verschiedenen elementaren Begriffen, Gesetzen, Prinzipien, mathematische Verfahren, und Protobeispielen für die Anwendung, und so weiter. In dieser Zusammensetzung befinden sich solche Komponenten (z.B. zwei Gesetze), die voneinander logisch grundsätzlich unabhängig sind, so daß man logisch betrachtet keinen zwingenden Grund hat, beide zugleich in der Zusammensetzung einzubeziehen. Es ist auch kein seltener Fall, daß es in einer Theorie zwei einander nicht zusammenpassende Prinzipien oder Gesetze gibt, die in bestimmter Situation in Konflikt kommen können. Ein Gesetz, oder ein Prinzip, könnte aus der Zusammensetzung ausfallen, grundsätzlich ohne daß die anderen Bestandteile, oder zumindest einige davon, in keinem Falle von diesem Ausfall betroffen werden. Zum Beispiel wäre die Hamiltonsche Methode in der klassischen Mechanik ein solches Element, obwohl sie in der klassischen Mechanik im heutigen Stand fast unerläßlich scheint.

4. Kontinuität und Diskontinuität in der Theoriendynamik

4.1. (Dis-)Kontinuität in der Theoriendynamik und das Korrespondenzprinzip

Wie sieht die Theoriendynamik allgemein im wesentlichen aus: kontinuierlich oder diskontinuierlich? Diese zunächst ziemlich vage und undifferenzierte Frage steht im Mittelpunkt dieses kurzen Kapitels. Es handelt sich dabei um eine der zentralen Fragen der Wissenschaftstheorie, die in ganz unterschiedlichen Spielarten diskutiert worden ist. Zum Beispiel: Welches Schema bietet die beste Erklärung für die Theoriendynamik — Kontinuität oder Diskontinuität? Das heißt also, welches Schema ist besser, sowohl in systematischer Hinsicht als auch hinsichtlich des Umfangs der wissenschaftshistoriographischen Daten, die sie miteinzubeziehen erlaubt? Zu beachten ist, daß es gerade nicht in Frage steht, wie die Theoriendynamik tatsächlich *ist*, sondern wie wir sie besser verstehen beziehungsweise erklären können. Und auch in der ersten Formulierung war die Frage, wie die Theoriendynamik *aussieht*. Um diese Frage zu beantworten, müßte man zunächst den Gesichtspunkt oder die Perspektive festlegen, von der aus die Wissenschaftsgeschichte betrachtet wird. In einer Perspektive ist vieles enthalten, zum Beispiel, ob man sie von der Warte eines Philosophen oder Physikers oder eines Historikers einnimmt, und auf welcher Ebene des Details man sich in seiner Betrachtung und Diskussion befindet.

Ich glaube, ich könnte hier schon eine Antwort auf diese Frage bieten, und meines Erachtens sogar eine richtige: In der Theoriendynamik findet man *sowohl* Kontinuität *als auch* Diskontinuität. Kontinuität und Diskontinuität kommen in der Theoriendynamik als zwei einander komplementierende *Aspekte* vor, die erst zusammengenommen das Gesamtbild der Theoriendynamik ergeben werden. Auf der Grundlage dieser Antwort könnte man nun das Problem weiter verfolgen, indem man analysiert, welche (Dis-) Kontinuitätselemente in einem bestimmten Fall vom Theoriewechsel zu sehen sind. Das ist allerdings nicht meine Aufgabe in vorliegender Arbeit.

Vielmehr möchte ich im Folgenden den Zusammenhang zwischen Kontinuität und Diskontinuität in einem Theoriewechsel beleuchten, genauer formuliert, das Zusammenwirken von beiden Aspekten in einem Theoriewechsel, der sich aufgrund dieses Zusammenwirkens als ein wissenschaftlicher Fortschritt abzeichnen würde. Ich werde im nächsten Kapitel einen Modus für einen solchen Zusammenhang darstellen, aufgrund der Vorbereitung in diesem Kapitel, und anhand dieses Modus läßt sich zeigen, wie beide Aspekte einander komplementieren können. Der Kontinuitäts- und der Diskontinuitätsaspekt in der Theori-

endynamik sind jeweils schon von verschiedenen Autoren ausführlich analysiert worden, jedoch nicht unter dem Gesichtspunkt ihrer Komplementarität in der Theoriendynamik.

Theorien ändern sich. Keine einzige Theorie in den Wissenschaften bleibt so wie sie erfunden bzw. zum ersten Mal von einem Wissenschaftler in einer Fachzeitschrift vorgeschlagen wurde. Jede Theorie, die noch Gültigkeit besitzt, ist ständigen Korrekturen unterworfen, zum Beispiel in methodologischer oder logischer Hinsicht, und bleibt für Verbesserungen in ganz unterschiedlichem Sinne offen. Auch sieht sie sich immer wieder vor die Herausforderung zur Adaptation gestellt, muß den ständig neu aufkommenden empirischen Daten gerecht werden. Diese Prozedur führt auch in der Tat dazu, eine Theorie schrittweise zu verbessern. Wenn eine Theorie von den Herausforderungen überfordert wird und wenn eine offensichtlich bessere Alternative dafür im Blickfeld der Wissenschaftler ist, geschieht manchmal jedoch ein Theoriwechsel, durch den eine neue Theorie die herkömmliche Theorie ersetzt.

Der Ausdruck in englischer Sprache, *'change'*, umfaßt den Gebrauchsumfang von beiden Ausdrücken in deutscher Sprache, nämlich *'Änderung'* und *'Wechsel'*. Man könnte auch den ersteren mit oben dargestellter *'Korrektur'* und den letzteren mit dem *'Ersetzen'* verknüpfen. Aus wissenschaftstheoretischer Perspektive interessieren mit Bezug auf die Theoriendynamik beide Aspekte dieser Dynamik.

Betrachtet man die Theoriendynamik aus der Perspektive des *'change'* von oder in Theorien, und analysiert dafür zunächst den Begriff von *'change'*, so zeigt es sich, daß in der Theoriendynamik beide Aspekte enthalten sind, der Kontinuitäts- und Diskontinuitätsaspekt. Ich glaube, das Schema *'kontinuierlich-diskontinuierlich'* führt nicht nur dazu, die wissenschaftsphilosophische Behandlung der Theoriendynamik zu vereinfachen, sondern macht diesen Zugang in gleichem Maße auch kompliziert. Eine Formulierung mittels dieses Begriffspaares kann manchmal nützlich sein, manchmal aber auch irreführend. In der Kuhn'schen Theorie des Paradigmawechsels ist deutlich die Seite der Diskontinuität mehr hervorgehoben worden, als etwa im Popperschen Bild der Verisimilitude. Mir scheint jedoch, daß man mit der Frage, „ob Theoriendynamik eigentlich kontinuierlich *oder* diskontinuierlich ist“, die Weichen falsch stellt: man stellt die Frage in einer falschen Form, was für den oder die Fragende unnötigen und unproduktiven Aufwand bedeutet.

Ich formuliere die Frage hier anders, und zwar aufgrund der Annahme, daß im Prinzip in jedem Abschnitt der Theoriendynamik sowohl der Kontinuitäts- als auch der Diskontinuitätsaspekt zu finden sind: In welcher Form treten diese beiden Aspekte auf? Und ferner vor allem: Wie wirken sie in einem Theoriwechsel zusammen?

Eine Frage beschäftigt uns unvermeidbar an erster Stelle: Was bedeuten die Ausdrücke „Kontinuität“ und „Diskontinuität“? Wenn man sich auf die mathematische Lehre stützt, bedeutet die Kontinuität einer Funktion $f(x)$ die Abwesenheit der Diskontinuität, und

$f(x)$ ist diskontinuierlich, wenn sie nicht kontinuierlich ist. Es handelt sich hierbei nicht um einen Zirkel, wie es im ersten Augenblick den Anschein haben könnte. Die erste und zweite Kontinuität befinden sich auf unterschiedlicher Ebene. An einem Punkt ist Diskontinuität vorhanden, wenn es [die Funktion] *an dem Punkt* nicht kontinuierlich ist. Kontinuierlich ist eine Funktion auf einer *Domäne*, wenn sie an keinem Punkt innerhalb dieser Domäne diskontinuierlich ist. In Analogie zu diesem Bild würde sich ein historischer Abschnitt einer Disziplin, wie zum Beispiel der Physik im zwanzigsten Jahrhundert, als kontinuierlich erweisen, wenn sich in diesem Zeitraum keine Diskontinuität finden ließe. Unsere erste Frage, was die '[Dis-] Kontinuität in der Theoriendynamik' bedeutet, ist noch nicht beantwortet, jedoch wissen wir jetzt, daß wir zunächst die Kontinuität an einem Punkt innerhalb des betrachteten Zeitraums diskutieren müssen. Man fragt jetzt wieder: Was darf in der Wissenschaftsgeschichte mit 'Kontinuität auf einem Punkt' gemeint sein? Die Bedingung dafür, daß in der Mathematik eine Funktion $f(x)$ bei x_0 kontinuierlich ist, kann wie folgt dargestellt werden:

- i) Es gibt $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$, und
- ii) es gibt $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)$, und
- iii) es gibt $f(x_0)$, und
- iv) $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = f(x_0)$.

Der Punkt x_0 ist in diesem Zusammenhang analog zu dem Punkt innerhalb der Wissenschaftsgeschichte zu betrachten, mit Blick auf den hin untersucht werden soll, ob die Theorie dort Kontinuität oder Diskontinuität zeigt. Es handelt sich hier um eine Analogie, und wie manche Analogie hat auch diese hier offensichtlich eine Lücke, nämlich, daß man in ihr schwer das geeignete Analogon für $f(x_0)$ findet. Trotz dieses Mangels möchte ich diese Bedingung folgendermaßen (ohne $f(x_0)$ zu erwähnen) zusammenfassen: An einem Punkt x_0 stimmen das Linkslimit, das heißt, $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$, und das Rechtslimit, $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)$, überein.

An diese Analogie angelehnt möchte ich die *Diskontinuität* auf einem Punkt der Wissenschaftsgeschichte zunächst wie folgt formulieren:

Auf einem Punkt der Geschichte eines Disziplinbereichs wird Diskontinuität festgestellt, wenn die Theorien vor und nach diesem Punkt, die Vorgänger- und die Nachfolgertheorie auf dem Gebiet, also über eine und dieselbe Sache aus jenem Bereich zwei verschiedene, und auch nicht vereinbare Aussagen machen.

Ein Wissenschaftsgebiet läßt sich unter anderem durch seinen Gegenstandsbereich charakterisieren. Die Frage, mit welchen Problemen bzw. welchen Phänomenen die Wissenschaftler in der Forschung beschäftigt sind, erteilt einem Fachgebiet das entscheidende Profil. Es ist zwar möglich, daß zwei verschiedene Fachgebiete mit einem weitgehend übereinstim-

menden Gegenstandsbereich beschäftigt sind. Aber es ist meines Erachtens unsinnig zu sagen, daß die Vorgänger- und Nachfolgertheorie zwei so grundsätzlich verschiedene Gegenstandsbereiche haben, daß sie sich nicht einmal überlappen. Die Maxwellsche Lehre der Elektrodynamik kann in keiner Weise sinnvoll als eine Nachfolgertheorie von Darwinscher Evolutionstheorie angesehen werden, obwohl jene zeitlich nach dieser folgte. Das liegt vor allem daran, daß sie jeweils einen völlig anderen Gegenstandsbereich besitzen.

In der Tat entwickelt sich eine Theorie ständig, wobei sie auch immer etwas Neues über ihr Gebiet zur Kenntnis bringt. Jedoch wollen wir hier das Kontinuitätsproblem in der Theoriendynamik hauptsächlich in Bezug auf einen *Theoriewechsel* diskutieren, oder zumindest in Bezug auf eine solche gravierende Änderung in der Theorie, die sich in der Tat von einem Theoriewechsel nicht leicht unterscheiden läßt. Dann stellt man die Frage, ob zwischen den Theorien, vor und nach dem Wechsel bzw. der gravierenden Änderung, grundsätzliche Diskontinuität besteht. Nach meinem letzten (Definitions-) Vorschlag ist es der Fall, wenn die Vorgänger- und die Nachfolgertheorie über eine Sache etwas Unterschiedliches und Unvereinbares aussagen würden. Die Definition für einen *Theoriewechsel*, oder die Frage, unter welchen Bedingungen genau ein *Theoriewechsel* festzustellen ist, bildet an sich ein schwieriges Problem. Ich möchte mich hier nicht damit beschäftigen. Vielmehr möchte ich davon ausgehen, daß man hier und da in der Wissenschaftsgeschichte ziemlich klare Fälle sieht, die man Theoriewechsel nennen würde. Als Beispiel ließen sich nennen: der Wechsel von der Phlogistontheorie zur Sauerstofftheorie in der Chemie, oder die Entstehung der Quantenmechanik, und so weiter. Die Diskussion in diesem Kapitel setzt dort an, wo ein *Theoriewechsel* ziemlich deutlich gegeben ist.

Anhand eines solchen Theoriewechsels könnte man eine Liste aufstellen von den für die Diskontinuität relevanten Unterschieden zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie. Das heißt, nach der obigen Diskontinuitätsbestimmung, würde man dort wahrscheinlich nicht nur einen sondern mehrere Diskontinuitätspunkte aufzählen. Wenn ein Theoriewechsel stattfindet, dann sind die Unterschiede zwischen dem Davor und dem Danach nichts Unerwartetes, sondern etwas Natürliches, oder, anders formuliert, etwas Notwendiges. Aber dies heißt eben *nicht*, so möchte ich sofort hinzufügen, daß dann dort keine Kontinuität zu finden ist. Die letzte Bemerkung soll in zweierlei Hinsicht genauer erläutert werden: Erstens, obwohl Vorgänger- und Nachfolgertheorie über eine bestimmte Sache Unterschiedliches und Unvereinbares besagen, besteht durchaus noch in manchen anderen Punkten Einigkeit. Dieser Aspekt, nämlich der von Gemeinsamkeit der beiden Theorien trotz des tiefgehenden Bruchs, wurde auch im Kapitel 2 ausführlicher betrachtet. Wichtig erscheint noch, daß dieser Aspekt dem Diskontinuitätsaspekt im Theoriewechsel grundsätzlich nicht widerspricht, sondern beide Aspekte nebeneinander bestehen bleiben können.

Zweitens — und dies ist meines Erachtens ein noch interessanterer Punkt — kann Kontinuität auch an einem Diskontinuitätspunkt vorkommen. Ein Beispiel, in dem ich dieses Problem diskutieren möchte, entnehme ich Kapitel 1, der Geschichte des Korrespondenzprinzips. Einer von den grundsätzlichen Bruchstellen zwischen der klassischen mechanisch-elektrodynamischen Lehre und der Bohrschen Quantentheorie um ihre Entstehungszeit entstand dadurch, daß erstere die spektrale Strahlung der inneratomaren Bewegung des Elektrons zuschrieb, während letztere im Bohrschen Atommodell von 1913 der Transition zwischen den stationären Energiezuständen zugeschrieben wurde. Eine tiefgehende Differenz zwischen diesen Sichtweisen lag darin, daß in der letzteren nicht einer, sondern *zwei* (Energie-)Zustände eines Elektrons notwendig sind, damit eine Strahlung zustande kommt, während dafür in der ersteren *ein* Zustand, in dem sich die Bewegung des Elektrons befindet, hinreichend war. Die Schwingungszahl ω , die der Elektronenbewegung entspricht, und die Frequenz ν , die einer spektralen Linie entspricht, stellten in der klassischen Theorie zwei Seiten ein und derselben Sache dar, während es sich der Quantentheorie zufolge dabei um zwei grundverschiedene Dinge handelte, die prinzipiell gar nicht eng gekoppelt sein mußten.¹⁷⁵ Dies bezeichnet klar eine Diskontinuität, und zwar auf dem Punkt der Erklärung für die spektralen Strahlungen des Atoms.

Mit dem Korrespondenzprinzip von 1920 versuchte Bohr in dieser Situation, über diese tiefgreifende Uneinigkeit zwischen klassischer und quantentheoretischer Vorstellung eine Brücke zu bauen, und argumentierte, daß die zwei Quantitäten ω und ν , die aus dem aktuellen Gesichtspunkt auf wesentlich unterschiedliche Dinge Bezug nehmen, in einem Grenzbereich zur asymptotischen Übereinstimmung kommen.

Aufgrund dieser Geschichte des Korrespondenzprinzips könnte man sich ein Bild vorstellen, in dem die Diskontinuität auf dem Punkt ‘Spektrallinien’ nicht total sein muß. Wenn der genannte Theoriewechsel ausschließlich als Diskontinuität betrachtet worden wäre, das heißt also, die Theorie vor diesem Diskontinuitätspunkt lediglich als eine falsche Theorie angesehen würde, da sie an dem Punkt etwas mit der neuen Theorie Unvereinbares aussagt, dann wäre eine solche heuristische Anwendung des Korrespondenzprinzips in der Entwicklung der Quantenmechanik nicht Realität geworden. Das Korrespondenzprinzip war, wie wir gesehen haben, Ausdruck der Bemühungen, die bewährte klassische Theorie für den Bau der neuen Theorie maximal zu nutzen. Dies geschieht, indem man die Seite des Linkslimits, die Inhalte der alten Theorie auf dem Diskontinuitätspunkt nicht einfach außer acht läßt, sondern dort eine Verknüpfung baut, so daß die Diskontinuität zu einer Quasi-Kontinuität wird. Diese Quasi-Kontinuität hat sich im Korrespondenzprinzip in Form der folgenden Relation gezeigt: $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu = \omega$.

¹⁷⁵ Siehe ausführlichere Diskussion in Abs. 1.4.3.

Die vorhergehende Diskussion über die (Dis-)Kontinuität möchte ich im folgenden Absatz zusammenfassen: Innerhalb der Wissenschaftsgeschichte lassen sich klare Fälle von *Theoriewechsel* beobachten, bei denen das (Dis-)Kontinuitätsproblem in der Theoriendynamik auftreten. Es sind dort die Elemente einer starken Diskontinuität im Sinne einer unvereinbaren Diskrepanz zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie zu beobachten. Dies impliziert jedoch nicht, daß dort keine Kontinuität besteht. Kontinuität und Diskontinuität sind zwei Aspekte in der Theoriendynamik, die prinzipiell in jeder Phase als einander komplementierend vorkommen. Obwohl die letzte Bemerkung in diesem Sinne redundant wirkt, ist damit zumindest besagt worden, daß Kontinuität und Diskontinuität in der Theoriendynamik durchaus kompatibel sind. Die Frage, „Ob kontinuierlich oder diskontinuierlich?“, wenn sie sich überhaupt stellen läßt, tritt dort überwiegend als ein Problem der Perspektive und des relativen Gewichts auf, die sich grundsätzlich nicht in allen Hinsichten mit Eindeutigkeit beantworten läßt.

Die Entstehung der Quantenmechanik, beziehungsweise der Übergang von der vorquantenmechanischen zur quantenmechanischen Physik, stellt einen klaren Fall von Theoriwechsel in der Physik dar. Die Turbulenzen, die Anfang dieses Jahrhunderts die neue Physik hervorrief, widerspiegelten deutlich und lebhaft, wie groß und tiefgehend die Differenzen zwischen den ‘zwei Physik’ waren. In einer solchen Situation der ratlosen Hektik spielte das Korrespondenzprinzip von Bohr für eine bestimmte Zeit der Entstehung der neuen Theorie eine effiziente Rolle als Leitprinzip, wie wir bereits dargestellt haben. Interessant war jedoch, daß Bohr, trotz des tiefen Grabens zwischen der klassischen und der Quantentheorie, die letztere als eine *Verallgemeinerung* der ersteren zu fassen versuchte. Und Bohrs Verständnis von ‘Verallgemeinerung’, wie ich diesen Ausdruck analysiert habe, hatte zur Folge, daß er die neue Quantentheorie nicht als eine Substitution für die klassische Mechanik, sondern als eine sinnvolle Ergänzung dieser ansah. Diese Ergänzung bewahrt das Alte nicht vollständig, sondern verneint es zum Teil, oder genauer ausgedrückt, *schränkt* den Gültigkeitsumfang des Alten *ein*. Es ist hierbei zu beachten, daß man in den quantenmechanisch geprägten Teildisziplinen der heutigen Physik keine entsprechende Ersatzdisziplin für die klassische Mechanik oder Elektrodynamik finden kann. Hätte es sich um einen *Coup d'Etat* gehandelt, so hätten die dadurch freigewordenen Posten mit neuen Anwärtern besetzt werden müssen. Aber im unseren Beispiel war das nicht der Fall.

Die Quantenmechanik hat gezeigt, daß die Gesetze der klassischen Elektrodynamik im Bereich der (sub-)atomaren Phänomene, wie zum Beispiel für die Elektronenbewegung im Atom, nicht mehr gültig erscheinen. Nach der Spezialrelativitätstheorie gelten viele Sätze der klassischen Mechanik nicht mehr, zum Beispiel die Bestimmung der relativen Geschwindigkeit von zwei mit hoher Geschwindigkeit fortlaufenden Körpern. Aber hier möchte ich nochmals auf das Folgende aufmerksam machen: Es ist meines Erachtens in den

beiden Beispielen nicht der Fall, daß der Phänomenbereich, für den die neue Theorie die alte ablöst, auch vorher von der alten Theorie abgedeckt wurde, und die alte Theorie mit dem Auftreten der neuen ihren Gültigkeitsanspruch für diesen Bereich zurücknehmen mußte. Diese Bereiche lagen in der Tat nicht im Hauptinteresse der alten Theorie. Anders ausgedrückt, dieser problematische Bereich gehörte nicht zum eigentlichen Gegenstandsbereich der alten Theorie, jedoch blieb diese Begrenztheit unerkannt, bis die neue Theorie die Grenze der alten Theorie zeigte. Grob formuliert, haben die Physiker der alten Theorie lange nicht einmal ernsthaft in Frage gestellt, ob sich die klassische Dynamik und Elektrodynamik für die Elektronenbewegung im Atom bewähren würden. Als sie begannen, sich diese Frage zu stellen, war die neue Theorie bereits in Sicht.

Wenn man nochmals die aufgebaute und systematisch dargestellte Quantenmechanik mit der klassischen physikalischen Theorie vergleicht, könnte man dort viele Punkte aufzählen, auf denen die beiden Theorien unterschiedliche und auch unvereinbare Ansichten zum Ausdruck bringen. Wir fragen in dieser Situation nochmals, was für eine Bedeutung das Korrespondenzprinzip für zwei *entwickelte* Theorien noch haben könnte. Hier rücken zunächst zwei Punkte ins Blickfeld.

Erstens ist zu berücksichtigen, wie wir am Beispiel des Quantenchaos beobachten konnten, daß das Korrespondenzprinzip heute immer noch nicht seine heuristische Bedeutung in der Physik verloren hat, und das, obwohl die Quantenmechanik in der Physik schon lange eine systematisch etablierte Disziplin ist. Zweitens bekämpft das Korrespondenzprinzip nicht die Diskontinuität in jeder Hinsicht. Das heißt wiederum, daß es nicht in allen Hinsichten Kontinuität impliziert. Wir haben auch die Geschichte vom Versagen dieses Prinzips betrachtet, das Bohr und Kramers auf dem Wege der Erweiterung dieses Prinzips erfahren mußten. Es kann eine bestimmte Art der Kontinuität in der problematischen Situation retten und sicherstellen. Das Korrespondenzprinzip, oder genauer ausgedrückt, die Tatsache, *daß* das Korrespondenzprinzip im Aufbau der neuen Physik eine wichtige und erfolgreiche Rolle spielte, bietet ein Beispiel dafür, daß dadurch in einem Theoriewechsel zumindest ein konkreter Aspekt der Kontinuität der Theoriendynamik gesichert werden kann.

Folgende drei Behauptungen sollen unterschieden werden. *Erstens*, die Behauptung, daß man in einem Theoriewechsel das Korrespondenzprinzip als Heuristik anwenden oder zumindest berücksichtigen *sollte*; *zweitens*, die These, die Kuhn in *SSR* (p.25) vorgebracht hat, daß sich zumindest ein Teil von der Leistung der Vorgängertheorie als permanent erweist; und *drittens*, die Vorstellung, daß in einem Theoriewechsel eine gewisse Kontinuität durch die Korrespondenzrelation gesichert werden *kann*. Diese drei Thesen gilt es auseinanderzuhalten.

Die erste These läßt sich wissenschaftsphilosophisch schwer begründen. Die Anwendung des Korrespondenzprinzips könnte höchstens nachdrücklich empfohlen werden, dies ist jedoch wissenschaftstheoretisch ohne zwingende Kraft. Die zweite These erscheint plausibel, aber plausibel in einem Grade, der sie zu einer Trivialität werden läßt. Die dritte These besagt noch nicht viel Konkretes. Bei ihr ist nicht klar, was für eine interessante Kontinuität durch das Korrespondenzprinzip sichergestellt werden kann. Ich möchte später versuchen, die weitere Bedeutung der Korrespondenz in der Theoriendynamik zu beleuchten.

Greifen wir auf den Fall zurück, in dem eine neue Theorie durch die Tatsache gestützt wird, daß ein Ergebnis sowohl von ihr als auch von der Vorgängertheorie erreicht wurde, und die jeweils auf unterschiedlichem Wege erbrachten Ergebnisse quantitativ übereinstimmen. In welchem Sinne kann die neue Theorie dadurch gestützt werden? Die Übereinstimmung ist ein positives Zeichen für die neue Theorie, nur wenn sich die alte Theorie auf den Punkt bewiesenermaßen als gute Theorie bewährt hat. Wir haben gesehen, daß Bohr den quantenmechanischen Wandel eigentlich als eine Verallgemeinerung der klassischen Theorien verstehen wollte. Verallgemeinerung bei Bohr in diesem Punkte wäre am besten im Sinne von 'Erweiterung' zu deuten, und zwar Erweiterung des Umfangs des Anwendungsgebietes. Am Anfang der neuen Theorie stand die Erkenntnis, daß in dem atomaren Phänomenbereich die herkömmlichen Theorien damals nicht mehr anwendbar erschienen. Die Aufgabe für die Physiker in dieser Lage war dann, eine neue Theorie aufzubauen, die (zunächst) nur in *diesem* Bereich gelten sollte. Sie wollten eine neue Theorie für die neuen Phänomene.

Das Projekt zur *Erweiterung* wurde intensiv und auch erfolgreich betrieben, und die Quantenmechanik ist schnell in eine systematische Theorie gewachsen, die auch an innerer Kohärenz die Höhe der klassischen Physik erreicht. Aber man muß sich hier fragen, ob wirklich mit dieser neuen Theorie eine Erweiterung geschaffen wurde. Wenn man die Geschichte der Quantenmechanik betrachtet, merkt man, daß die Frage, ob und wie man die Quantenmechanik bis in den *klassischen* Bereich allgemein geltend machen kann, erst spät entstand, und daß sie auch offenbar bis heute keine befriedigende Antwort gefunden hat.¹⁷⁶ Der Zusammenhang zwischen Quantenmechanik und klassischer Physik läßt sich noch nicht in aller Klarheit darstellen. Wenn es sich unter diesen Umständen um eine Erweiterung handeln soll, müßte man zunächst die alte Theorie dort bestehen lassen, wo sie sich als gut erwiesen hat. Würde man die alte Theorie mit der Entstehung der neuen Theorie als nicht mehr gültig verkünden und in die Glasvitrine eines Museums stellen, während die neue

¹⁷⁶ In diesem Punkt ist die Quantenmechanik mit der (speziellen) Relativitätstheorie zu vergleichen, wo der klassische Phänomenbereich mathematisch als Grenzgebiet am Rande des umfangreicheren Ganzen dargestellt werden könnte.

Theorie noch nicht das ganze Gebiet der alten Theorie zu decken vermag, dann hätte man keine Garantie für die erwartete Erweiterung.

Es war offensichtlich nicht der Fall, daß die klassische Physik als die *alte* Theorie mit der Entstehung der neuen Theorie, der Quantenmechanik, einfach als eine obsolete Theorie zu einem Kapitel der Physikgeschichte erklärt wurde. Vielmehr nimmt sie heute noch in der Physik ihren Platz als aktuelle Theorie ein. Sie ist noch aktuell in dem Sinne, daß sie immer noch Anwendung bei den aktuellen Problemen eines Physikers findet, und zwar manchmal sogar schneller oder effektiver als der quantenmechanische Zugang, und manchmal sogar dort, wo die Quantenmechanik noch keinen entsprechenden Zugang zum Problem bietet. Ich möchte daher sagen, daß die klassische Theorie der Physik, wie die klassische Mechanik und klassische Lehre des Elektromagnetismus, 'Seite an Seite' mit der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie steht. Ich möchte in der Tat über diese Seite-an-Seite-Relation hinausgehend noch einen Schritt weitergehen und argumentieren, daß sie sich auch komplementieren. Diese Komplementarität haben wir im letzten Kapitel (Abs. 3.4.3.) betrachtet. Im nächsten Kapitel werden wir diese Beziehung des 'Sich-komplementierend-Seite-an-Seite-Stehens' der klassischen und quantenmechanischen Theorie der Physik weiter erläutern.

Zurück zum Thema 'Korrespondenz': Welche Bedeutung hat die Korrespondenz, etwa diejenige, die im Quantenkorrespondenzprinzip impliziert ist, in der heutigen Situation der Physik? Bevor ich diese Frage näher analysieren werde, möchte ich eine Unterscheidung in Betracht ziehen: die Unterscheidung zwischen trivialer und nicht-trivialer Korrespondenzrelation.

4.2. Triviale Kontinuität und Nichttrivialität der Korrespondenzrelation

My claim is not merely that there is an element of continuity in *change*, which is necessarily the case in all human activity, but that in science part of the content of the old theory is preserved, as far as one can tell, for ever; not just in the next theory, but throughout all future theories. (Post, 238)

In diesem Zitat scheinen zwei verschiedene Arten von Kontinuität in der Theoriendynamik dargestellt zu sein; eine schwache und eine starke. Die schwache Art besagt, daß es in einem Theoriewechsel (zumindest) ein Kontinuitätselement festzustellen gibt, woran jedoch Post anscheinend nicht sehr interessiert ist. Eine starke Kontinuitätsthese fordert währenddessen, daß ein Teil der alten Theorie auf ewig in allen nachfolgenden Theorien erhalten bleiben soll. Eine andere Möglichkeit für die starke Auffassung wäre die Forderung, daß

der *ganze* Körper der vorherigen Theorie in *irgendeiner* Form wiederzufinden sein soll, das heißt, möglicherweise übersetzt in die neuen Begriffe, in der Nachfolgertheorie. Eine typische starke Auffassung für die Kontinuität in der Theoriendynamik würde damit besagen, daß die Theoriendynamik ein prinzipiell kumulativer Prozeß sei. Das heißt, was die vorherige Theorie erworben habe, gehe nicht (endgültig) verloren, sondern lagere sich in einer Schicht der ewigen [oder beinahe ewigen] Wissenschaft ab und werde in der Weise zu einem Stück Ewigkeit.

Die beiden als Beispiel genannten Auffassungen haben in solcher extremen Form schwerwiegende Probleme. Die erstere, in dem Zitat von Post vertretene, Auffassung besagt, daß *jede* Theorie auf einem Fachgebiet mindestens einen Aspekt adäquat erfaßt hat, der bis in die Ewigkeit von der Wissenschaft beibehalten würde. Man müßte dann anhand einer offensichtlich als falsch erwiesenen Theorie, wie zum Beispiel der Phlogistontheorie in der Chemie 17. Jahrhunderts, auch zeigen können, welches die darin enthaltenen Erkenntniselemente sind. Diese Auffassung kann jedoch mit einem solchen Problem weitgehend dadurch umgehen, daß sie sich in ihrem Argumentationsumfang auf einen wohl definierten Disziplinbereich beschränkt, und damit eine Grenze zieht, die absurde Beispiele auszuschließen erlaubt. Bestimmt man einen Disziplinbereich jedoch einzig zu diesem Zweck, so heißt das meines Erachtens, daß dadurch die argumentative Kraft dieser Position auch weitgehend verloren geht. Die zweite Auffassung trägt offensichtlich noch schwerere Lasten. Sie soll zeigen können, daß kein einziges Element der vorhergehenden Theorie in der nachfolgenden Theorie verloren gegangen ist. Das scheint mir, mit den Tatsachen der Wissenschaftsgeschichte einfach nicht übereinzustimmen. Eine solche extrem kumulativistische Sicht über die Theoriendynamik ist offensichtlich nicht geeignet, einleuchtende und umfassende Erklärungen über die Tatsachen der Wissenschaftsgeschichte zu liefern. Es ist zum Beispiel schwer zu argumentieren, daß Physiker heute alles, was Newton in seinen *Principia* schrieb, in der Physik in ihrem Sinne immer noch beibehalten. Die Lage sieht nicht wesentlich anders aus, wenn man einen kürzeren Ausschnitt aus der Geschichte der Physik betrachtet. Die Rutherford'sche Atomtheorie überlebte auch nicht den weiteren Werdegang der Atomtheorie des 20. Jahrhunderts. Vielleicht hat der Kumulativismus in Bezug auf das letzte Beispiel noch etwas zu erwidern, und zwar, daß jeweils nur die gut bestätigte Theorie die Qualifikation erlangt, über die sie erst kumuliert wird. Aber vom Standpunkt der sogenannten pessimistischen Meta-Induktion gesehen, würde sich keine Theorie auf ewig als gut bestätigte Theorie erweisen. Das heißt andererseits, die Unterscheidung zwischen einer gut bewährten und nicht gut bewährten Theorie würde auch nicht dauerhaft stabil bleiben. Geht dann damit gleich der Kontinuitätsstandpunkt mit Kumulativismus zugrunde? Ich denke nein. Der kumulativistische Standpunkt könnte sich der Situation besser anpassen, wenn er sich auf die These beschränken würde, daß nicht alles, jedoch die wesentlichen Aspekte der

bewährten Leistungen der vorherigen Theorie in der nachfolgenden erhalten blieben, und sich so akkumulierten. Eine andere interessante Frage ist dann, ob *diese* Akkumulation auch den *nächsten* Theoriewechsel überleben würde, das heißt, ob sie, oder zumindest ein wesentlicher Teil von ihr, in der Nachfolgertheorie der zweiten Generation in der Akkumulation erhalten bleiben würde. Aufgrund der bisher geführten Diskussion über das Korrespondenzprinzip lassen sich keine zwingenden Gründe für diese Annahme anführen. Dieser Punkt wird im nächsten Abschnitt diskutiert werden. Zusammenfassend ist festzustellen, daß die beiden genannten Auffassungen von starker Kontinuität schlechte Chance besitzen. Sie sollen sich den wissenschaftshistoriographischen Daten entsprechend modifizieren lassen.

Andererseits sagt die schwache Auffassung, zufolge der zwischen zwei aufeinander folgenden Theorien in einem Theoriewechsel nicht totale Unüberbrückbarkeit besteht, zu wenig Interessantes aus. Kontinuität in diesem trivialen Sinne wird in der folgenden Diskussion nicht weiter beachtet.

Vergleicht man hiermit das vorher untersuchte Korrespondenzprinzip Bohrs, so zeigt sich, daß es sich hier *nicht* um eine triviale Behauptung handelt. Die von Bohr angenommene asymptotische Übereinstimmung von v und ω war weder aus den klassischen Theorien noch aus der Quantentheorie ableitbar. Sie basiert interessanterweise auf dem Zusammenhang von zwei logisch eigentlich unabhängigen Begriffen: vom Begriff der Elektronenbewegung und dem der Transition zwischen unterschiedlichen Energiezuständen. Aber durch das Korrespondenzprinzip, genauer gesagt, durch die Erfolge der heuristischen Anwendung dieses Prinzips, hat dieser Zusammenhang seine Bedeutung erhalten.

Wenden wir uns der Frage zu, in welchem Zusammenhang Korrespondenzprinzip und Kontinuität stehen. Sorgt das Korrespondenzprinzip für die Kontinuität in einem Theoriewechsel? Meine Antwort auf diese Frage lautet: Ja. Dann folgt die nächste Frage: Wie stellt das Korrespondenzprinzip Kontinuität her, und ferner, welche Art der Kontinuität soll durch das Korrespondenzprinzip in einem Theoriewechsel gesichert werden?

Wir erinnern uns daran, daß Bohr die Quantentheorie — gemeint ist hier die ganze Geschichte der neuen Physik mit der Quantentheorie von vor 1925 wie auch der Quantenmechanik nach 1925 — als ein Projekt der Verallgemeinerung klassischer Theorien ansah, wobei „Verallgemeinerung“ im Sinne von „Erweiterung“ zu verstehen ist.¹⁷⁷ Die Geschichte der Quantentheorie begann mit der Erkenntnis über die Unzulänglichkeit und damit der beschränkten Gültigkeit der klassischen Vorstellungen, insofern als sie sich nicht zufriedenstellend auf diese anwenden ließ. Für den Bereich der Atomphysik mußte deswegen eine neue Theorie entworfen werden, und das Ergebnis der Bemühungen stellte die Quanten-

¹⁷⁷ Vgl. Abs. 4.1.

theorie [bzw. die Quantenmechanik] dar. Eine Bemerkung muß hier noch angefügt werden. Das Bohrsche Korrespondenzprinzip spielte bei dieser Aufgabe eine im wesentlichen heuristische Rolle. An dieser Stelle geht es jedoch nicht um diese heuristische Seite des Prinzips, sondern um dessen wissenschaftsphilosophische Bedeutung.

Ich beschränke mich auf die Geschichte von ν und ω . Die Quantität ν in der Quantentheorie, die einer bestimmten Transition zwischen zwei stationären Zuständen entspricht, besaß in der klassischen Elektrodynamik keine entsprechende Quantität. Solche Transitionen finden prinzipiell nur im Gebiet der Atomphysik statt. Die Schwingungszahl ω verliert ihre Bedeutung, wenn es sich um das (sub-)atomare Gebiet handelt. Der Bahnbegriff, der zur Geltendmachung einer solchen Schwingungszahl ω notwendig ist, hat dort keine Bedeutung mehr.

Wir können uns jetzt zwei Gebiete vorstellen, die nebeneinander liegen: das Innere des Atoms, wo ν , und nicht ω , relevant auftritt, und das Außerhalb des Atoms, wo ω Bedeutung haben kann, ν aber nicht.¹⁷⁸ Offensichtlich werden diese zwei Gebiete im Augenblick von zwei verschiedenen Theorien beherrscht, solange sich die Quantentheorie, die sich für den subatomaren Bereich durchgesetzt hat, noch keine darüber hinausreichende Allgemeingültigkeit bewiesen hat. In dieser Lage, so möchte ich formulieren, schafft die Relation von ' $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu = \omega$ ' einen glatten Übergang zwischen diesen verschiedenen Gebieten, so daß diese trotz der begrifflichen Diskontinuität in quantitativer Hinsicht als kontinuierlich angesehen werden können.

In dieser Situation, in der es noch nicht klar ist, ob die Quantentheorie auch das Gebiet der klassischen Mechanik und Elektrodynamik erfolgreich und in vollem Umfange der Erklärung und Vorhersagekraft abdecken könnte, ließe sich von „Erweiterung“ nur in dem Sinne vernünftigerweise sprechen, in dem die Physik jetzt neben den klassischen Theorien für den Phänomenbereich, auf den sie immer noch erfolgreich anwendbar erscheint, über eine weitere grundsätzlich andere Theorie verfügt. Diese weitere Theorie ist nämlich die Quantentheorie, die auf diesem Gebiet erfolgreiche Anwendung findet, zu dem man auf der Grundlage der klassischen Physik keinen erfolgreichen Zugang haben konnte. Der Umfang der physikalischen Theorien ist dadurch erweitert worden, da sie jetzt einen neuen Phänomenbereich beherrscht, der vor der Quantentheorie physikalisch nicht erfaßbar war. Das Problem, das sich nun stellt, ist der Zusammenhang dieser beiden Teilgebiete. Wenn die Zusammensetzung beider Theorien kein bloßes Nebeneinander, sondern eine Erweiterung darstellen soll, dann muß die Zusammenfügung der zwei Theorien in einer Weise erfolgen, in der eine *Stetigkeit auf ihrer Grenzlinie* bewahrt wird, folglich, in einer Weise, in der das

¹⁷⁸ Hier heißt es nur, daß außerhalb der Grenze von ' $n \rightarrow \infty$ ' die Frequenzzahl ν für die Transition keine Bedeutung hat, und *nicht*, daß die Quantentheorie nur innerhalb von dieser Grenzlinie ihre Gültigkeit besitzt.

gesamte Gebiet in sich keine Bruchstelle enthält. In dieser Weise könnte eine gewisse Einheit¹⁷⁹ in dem Gesamtbereich hergestellt werden.

Das Bohrsche Korrespondenzprinzip garantierte hierbei, daß das Linkslimit [der v -Wert unter Bedingung $n \rightarrow \infty$] und das Rechtslimit [ω -Wert unter Bedingung $n \rightarrow \infty$] auf der Grenzlinie, oder dem Grenzgebiet, übereinstimmen, wodurch der Übergang von einem Gebiet zum anderen glatt oder, anders ausgedrückt, kontinuierlich wird. Hier möchte ich jedoch betonen, daß ein „glatter“ Übergang im Sinne einer Übereinstimmung von Links- und Rechtslimit keine globale innere Konsistenz in der Gesamtheit von zwei Theorien impliziert. Wenn man sich eine solche Gesamttheorie als Ergebnis der Zusammenfügung der alten und neuen Seite vorstellt, so zeigt sich — wie dies schon zu Beginn der Quantentheorie schon erkannt wurde — daß gravierende Konsistenzprobleme, auftreten.

Bevor wir weiter über Kontinuität ohne globale Konsistenz diskutieren, habe ich eine Bemerkung, bezüglich der Kontinuität im Sinne von Übereinstimmung zwischen Links- und Rechtslimit zu machen. Für den Limitsbegriff im Fall des kontinuierlichen Übergangs von klassischer zur Quantentheorie wurden ω und v einbezogen. Strenggenommen ist es hier dennoch problematisch, über Rechts- und Linkslimit zu sprechen, berücksichtigt man, daß v und ω nicht auf denselben Gegenstand bezogene Variablen sind. Aus dieser Perspektive betrachtet, wird *entweder* i) *oder* ii) der Bedingungen für Kontinuität¹⁸⁰ nicht erfüllt. Es fehlte entweder das Links- oder das Rechtslimit. Wir haben in Kapitel 1 beobachtet, daß das Korrespondenzprinzip auch nach 1925, das heißt, nachdem der Bahnenbegriff aufgegeben worden war und die Schwingungszahl ω ihre ursprüngliche physikalische Bedeutung verlor, nicht einfach obsolet wurde, sondern in abstrakterer Form weiter beibehalten wurde.

Kommen wir zum Thema der Kontinuität durch das Korrespondenzprinzip zurück. Wenn ich das Korrespondenzprinzip nicht auf quantentheoretischen Wandel beschränken, sondern im allgemeinen Kontext geltend machen möchte, dann muß ich auch mit einem verallgemeinerten Korrespondenzprinzip handeln. Dies war unser Thema im Kapitel 2. Mir scheint die *Fadnersche* Auffassung, und zwar mit *operational equations* als Relata der Korrespondenzrelation, in unserem Kontext am naheliegendsten zu sein. Die *Fadnersche* Auffassung sollte jedoch meines Erachtens anhand folgender Bemerkung modifiziert werden: im Falle einer Korrespondenzrelation werden nicht alle *operational equations* der alten Theo-

¹⁷⁹ Vgl. hier das Stetigkeitsprinzip von Leibniz: Cassirer (1957, 309) berichtet, im Hintergrund der modernen Physik stehe das Kontinuitätsprinzip als eine Grundvoraussetzung, die schon ausdrücklich bei Leibniz zu finden sei. Der Leibnizsche *Stetigkeits*begriff habe Mathematik und Naturerkenntnis miteinander verknüpft und diese zu einer Einheit zusammengeschlossen. Bei ihm ist der Gedanke, daß das Naturgeschehen in stetigen und differenzierbaren Funktionen beschrieben werden soll, zu einem obersten Grundprinzip des exakten Wissens von der Natur erhoben worden.

¹⁸⁰ Siehe Abs. 4.1.

rie, sondern nur bestimmte davon den Anschluß an die neue Theorie finden.¹⁸¹ Ob (fast) alle *operational equations* der alten Theorie durch die Korrespondenzrelation entsprechende *operational equations* in der neuen Theorie finden werden oder nur einige davon, hängt davon ab, welcher Art der betreffende Theoriewechsel ist. Wenn ich hier ohne ausführlichen Beleg vergleiche, so scheint ein großer Teil der *operational equations* der klassischen Mechanik ein Gegenstück zu der relativistischen zu finden, während ein solches „Mapping“ zwischen der klassischen und der Quantenmechanik nur in einem beschränkten Ausmaß stattzufinden scheint. Das heißt, in letzterem Zusammenhang werden manche der *operational equations* in der klassischen Physik kein entsprechendes rein *quantenmechanisches* Gegenstück zu besitzen.

Unsere Diskussion in der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit dem quantenmechanischen Wandel. In diesem Wandel kommt die Korrespondenzrelation in ihrer Eigenschaft mit gewisser Lokalität auf, während im Wechsel zur Relativitätstheorie eine solche Lokalität nicht ausgeprägt erscheint. Ein detaillierter Vergleich zwischen den beiden Szenen des Wandels in der Physik in Hinsicht auf solche Lokalität wäre Thema einer separaten Studie.

4.3. Korrespondenz, nicht global, sondern lokal

Im letzten Abschnitt wurde argumentiert, daß eine nicht-triviale Korrespondenzrelation, wie sie zum Beispiel in dem Quantenkorrespondenzprinzip impliziert wurde, eine Relation zwischen zwei nicht aufeinander reduzierbaren, oder nicht voneinander deduzierbaren, Theorien darstellt. Das heißt wiederum, sie beschreibe die Relation von im Feyerabendischen Sinne inkommensurabler Theorien.¹⁸² In diesem Abschnitt werde ich zwei Eigenschaften für die Korrespondenzrelation zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie nennen: erstens Lokalität im Sinne von *Berührungsmodus* und zweitens Lokalität im Sinne von *Nichttransitivität*. Die erste „Lokalität“ kommt direkt aus der Analyse der Korrespondenzrelation zwischen klassischer und quantenmechanischer Physik, die zweite als eine Schlußfolgerung aus der ersten Lokalitätsthese. Diese Lokalität beleuchtet wichtige Aspekte der Theoriendynamik, und im nächsten Kapitel wird sie im allgemeinen Zusammenhang von Theoriendynamik an die Diskussion über den ‘wissenschaftlichen Fortschritt, jedoch ohne Reduktion’ Anschluß finden.

¹⁸¹ Über diesen Punkt sagt Fadner (1985) nicht ausdrücklich, ob er in seiner Auffassung von AKorr alle oder nur bestimmte *operational equations* im Sinne hat.

¹⁸² Siehe Abs. 5.1.2. für Feyerabendischen (1977) Inkommensurabilitätsbegriff.

4.3.1. Lokal im Sinne von im Berührungsmodus

Durch das Korrespondenzprinzip wurde in der Relation zwischen Quantentheorie und den klassischen Theorien der Physik nicht der gesamte Umfang der jeweiligen Theorien in Verbindung gebracht. In seiner frühen Form fußte das Korrespondenzprinzip auf der Bedingung $n \rightarrow \infty$, und die mathematische Struktur der Theorie auf dieser Seite der Grenze war grundsätzlich verschieden von der jenseits der Grenze. Anschaulich ausgedrückt: nur indem sich die Theorien dieser Grenze näherten, konnten sie über die bestimmten Punkte näher und näher übereinstimmende Aussagen beibringen. Solche Übereinstimmung macht vor allem in den quantitativen numerischen Aussagen Sinn.

Drei Modi habe ich im Abschnitt 2.6. für Korrespondenz eingeführt: Enthaltens-, Überlappens-, und Berührungsmodus. Wie eben und auch in Kapitel 1 diskutiert, wurden durch das Korrespondenzprinzip nicht alle Punkte der klassischen Physik mit denen der Quantentheorie in Verbindung gebracht. Der Enthaltensmodus, in dem die eine Theorie [Vorgängertheorie] in der anderen Theorie [Nachfolgertheorie] als Spezialfall, oder Grenzfall, restlos *enthalten* wird, scheint mir auf diesen Fall von Theoriewechsel nicht zu passen.¹⁸³

Für den Fall des quantenmechanischen Wandels in der Physik sollen nun die anderen Korrespondenzmodi in Betrachtung gezogen werden: Berührungs- und Überlappensmodus. Erstens, stützte sich das Bohrsche Korrespondenzprinzip in seiner ersten Formulierung auf die asymptotische Übereinstimmung der von den beiden Theorien berechneten Strahlungsfrequenzen *im Limit der hohen Quantenzahl*, was sich mittels des Berührungsmodus analysieren läßt. Zweitens fand das Korrespondenzprinzip, wie wir schon gesehen haben, mit der Zeit auch über diese Übereinstimmung hinausgehend Anwendung für die niedrige Quantenzahl. Die Anwendung des Korrespondenzprinzips erweiterte sich auch auf die Probleme von Intensität und Polarisation spektraler Strahlungen. Auf diesem Wege sind Begriffe, Formeln, beziehungsweise mathematische Methoden von der klassischen Physik in die neue Theorie, die Quantenmechanik, überliefert worden. In diesem Sinne ist der Überlappensmodus von Korrespondenz zu berücksichtigen.

Der Überlappensmodus bedeutet, daß die neue Theorie (betrifft bestimmter Relata) nicht im ganzen Umfang, sondern nur zu einem — allerdings nicht trivialen — Teil mit der alten Theorie überlappe. Analog zur Relata-Diskussion in Abs. 2.4. sind hier auch weitere Sub-Modi vorzustellen, und zwar mit Hinblick darauf, ob das Überlappen in Begriffen, in den Zahlen in quantitativer Aussage bzw. Vorhersage, oder in größerer mathematischer Struktur stattfindet, und so weiter. Solche Sub-Modi schließen einander nicht aus. Holland

¹⁸³ Die These, daß in der neuen Theorie, solange sie wirklich eine grundsätzlich neue Theorie ist, ein Teil der Errungenschaft der alten Theorie verloren gehe, scheint mir in diesem Sinne zutreffend zu sein.

(1996) beobachtet zum Beispiel im Zusammenhang von Quanten- und klassischer Mechanik das (eingeschränkte) Überlappen in numerischer und begrifflicher Hinsicht.¹⁸⁴

Meines Erachtens erweist sich jedoch in unserem Kontext der Berührungsmodus als noch interessanter, wenn er eigentlich auch als Grenzfall des Überlappensmodus zu betrachten wäre. Für den Berührungsmodus scheinen dennoch nicht alle Relata geeignet zu sein, diesen Modus sinnvoll zu machen.¹⁸⁵ Daß man sich noch für den Berührungsmodus interessieren soll, wird aufgrund der Berücksichtigung der Geschichte des Quantenkorrespondenzprinzips sichtbar. Die klassisch berechnete Frequenz ω für die atomische Strahlung stimmt strenggenommen *nirgendwo* genau mit der quantentheoretisch berechneten Größe ν überein. Eine noch grundsätzlichere Barriere zwischen ω und ν stellt, wie wir schon diskutierten, die Tatsache dar, daß ihr jeweiliger theoretischer Hintergrund sich unterscheidet. Die klassische ω soll *einem* Zustand der Bewegung entsprechen, während man mit einem einzigen Zustand keine quantentheoretische ν zu berechnen beginnen kann. Die asymptotische Übereinstimmung von ω und ν , von der ausgehend Bohr zum ersten Mal sein Korrespondenzprinzip vorlegte, bedeutet in diesem Sinne betrachtet zunächst bloß eine quantitative Annäherung, die nur auf der Grenze von $n \rightarrow \infty$ zu einer mathematischen Begegnung der beiden Quantitäten führt.

Der Berührungsmodus der Korrespondenz ist, wie in Abs. 2.6. eingeführt wurde, gegeben, wenn sich die neue Theorie einem Teil der Vorgängertheorie *asymptotisch* nähert. Zu beachten ist, daß in der Charakterisierung des Berührungsmodus nicht nur der Umfang, sondern auch die Art der Übereinstimmung ('asymptotisch') zwischen den Theorien in Frage kommen soll. Wenn wir hier die drei Modi von Korrespondenz aus einer mengentheoretischen Perspektive betrachten, kommt die Schnittmenge von zwei Theorien im Fall des Berührungsmodus als Nullmenge vor, während die in den anderen Modi, Enthalten und Überlappen, nicht der Fall ist. Problematisch ist dann jedoch, daß man den Fall von Berührung und den zweier getrennter Mengen mengentheoretisch schwer unterscheiden kann. Der Berührungsmodus impliziert, daß die zwei beteiligten Seiten der Korrespondenzrelation eine gemeinsame Grenzlinie besitzen. Der Berührungsmodus impliziert ferner die Differenz oder, genauer ausgedrückt, die sich-ausschließende Relation der beiden Seiten diesseits und jenseits der Grenzlinie. Was auf dieser Seite gilt, gilt (strenggenommen) nicht auf der anderen Seite der Grenzlinie. Auf der Grenzlinie treffen sich die eigentlich inkompatiblen Theorien, indem sie in Bezug auf ein Problem annähernd übereinstimmende quantitative Ergebnisse bieten.

¹⁸⁴ Holland (1996), 109.

¹⁸⁵ Nicht alle Relata, die für den Überlappensmodus relevant erscheinen, kommen für den Berührungsmodus geeignet vor, z.B. die Begriffe.

An diesem Punkt erinnern wir uns an die Bemerkung in Abs. 2.6., daß ein Korrespondenzmodus mit bestimmten *Relata* nicht unbedingt einen anderen Korrespondenzmodus ausschließt, sondern auch mit ihm kompatibel sein kann. So ist zum Beispiel Korrespondenz über die Formel im Berührungsmodus nicht nur kompatibel mit Korrespondenz über die Begriffe im Überlappensmodus, sondern diese bildet eine Voraussetzung für jene.

Korrespondenz im Berührungsmodus regelt einen „glatten“ Übergang zwischen zwei inhomogenen Theorien auf ihrer Grenzlinie.¹⁸⁶ Eine solche Korrespondenz *verknüpft* in dieser Weise zwei Theorien miteinander, die nicht global, etwa durch Reduktion, zu vereinigen sind, und zwar unter Bewahrung der Heterogenität. Ein solcher Übergang, oder eine solche Verknüpfung geschieht —wie ich wiederholen möchte— lokal. Auf ein Beispiel angewandt heißt dies zum Beispiel, daß zwischen zwei Theorien in der Physik die asymptotische Übereinstimmung nicht bezüglich aller sondern nur bezüglich bestimmter physikalischer Quantitäten oder Variablen stattfinden würde. Mir ist noch nicht klargeworden, ob für die Korrespondenz im Berührungsmodus die asymptotische Übereinstimmung in den *Quantitäten* die einzige Möglichkeit zur Definition wäre, oder welche Varianten noch denkbar sind.

4.3.2. Lokal im Sinne von nicht transitiv

Der Korrespondenzrelation möchte ich noch eine weitere Lokalität als Eigenschaft zuschreiben, indem ich die Korrespondenz als eine zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie bestehende Relation betrachte. Die Korrespondenzrelation ist lokal in dem Sinne, daß sie nicht transitiv ist. Man müßte diesmal nicht *ein* sondern mindestens zwei solcher Paare ins Auge fassen, das heißt, mindestens drei Theorien in einer Reihe auf einem Disziplinbereich — also zum Beispiel T_k , T_{k+1} , und T_{k+2} — um über diese Art der Nichttransitivität zu reden. Die Nichttransitivität der Korrespondenzrelation impliziert, daß das Folgende *nicht* gilt:

Wenn zwischen einer Theorie T_k und ihrer Nachfolgertheorie T_{k+1} eine Korrespondenzrelation besteht, und auch zwischen T_{k+1} und deren Nachfolgertheorie T_{k+2} eine Korrespondenzrelation, dann ist zwischen T_k und T_{k+2} ebenfalls eine sinnvolle Korrespondenzrelation aufzustellen.

Da die gerade formulierte These impliziert, daß zwischen T_k und T_{k+n} für beliebige $n \geq 1$ eine Korrespondenzrelation aufzustellen ist, besagt die Nichttransitivitätsthese als ihre Negation in direkter Schlußfolgerung, daß T_{k+n} ($n > 1$) mit einer der vorhergehenden Theorien T_k mög-

¹⁸⁶ Siehe ferner die Diskussion unter Abs. 5.2.2.

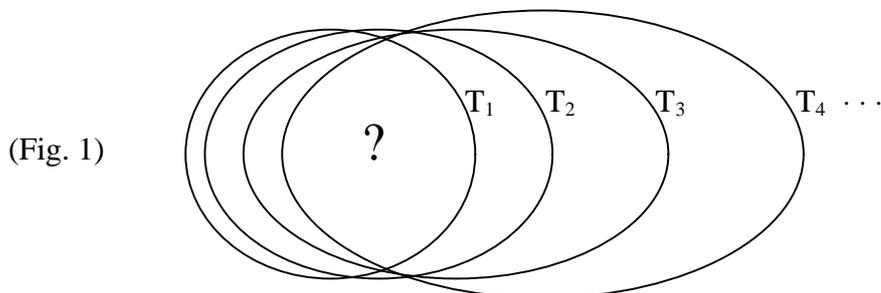
licherweise nicht in Korrespondenzrelation steht. Eine solche Korrespondenzrelation wird dennoch nicht ausgeschlossen, das heißt also, diese Nichttransitivitätsthese besagt keine Antitransitivität über die Korrespondenzrelation.

Der Referenzfall der vorliegenden Arbeit, der quantenmechanische Wandel in der Physik, kann allein prinzipiell keinen Beleg für diese Lokalitätsthese bieten. Dies ist logisch, da in die These zumindest drei aufeinanderfolgende Generationen der Theorie auf einem Gebiet miteinbezogen werden. In der vorliegenden Arbeit wird diese These jedoch nicht an einem konkreten Fallbeispiel mit drei oder mehreren sukzessiven Theorien in der Physik oder in anderen Wissenschaftsgebieten diskutiert werden.

Die These von der Nichttransitivität ist eigentlich als eine logische Folgerung aus der Lokalitätsthese im ersten Sinne zu betrachten, nämlich der Korrespondenz im Berührungsmodus. Es ist nicht notwendig, daß die Grenzlinie oder das Grenzgebiet zwischen T_k und ihrer Nachfolgertheorie T_{k+1} , wo der korrespondenzmäßige Anschluß stattfindet, im nächsten Theoriwechsel oder in der Entwicklung einer neuen Theorie T_{k+2} wieder als das neue Grenzgebiet auftritt, auf dem der korrespondenzmäßige Anschluß zwischen T_{k+1} und T_{k+2} stattfinden soll. Zum Beispiel war der erste Anschlußpunkt im Quantenkorrespondenzprinzip die Frequenz der spektralen Strahlungen, und es ist aufgrund der Nichttransitivität so nicht notwendig, daß die Schwingungszahl der spektralen Strahlungen im nächsten Theoriwechsel, von der Quantenmechanik zu ihrer Nachfolgertheorie, wieder die Rolle einer solcher Brücke übernehmen muß. Aufgrund der folgenden Überlegung erscheint dies auch in Wirklichkeit unwahrscheinlich: Die Grenzlinie wird durch die Grenzbedingung charakterisiert, und die Grenzbedingung wird meines Erachtens mit dem Term der neuen Theorie formuliert, und zwar mit dem, der *nicht* in der vorherigen Theorie enthalten war. Die Grenzbedingungen zwischen T_k und T_{k+1} würden mit den Termen von T_{k+1} , und zwischen T_{k+1} und T_{k+2} mit den Termen von T_{k+2} ausgedrückt werden. Die erste und die zweite Grenzbedingung können dann prinzipiell nicht übereinstimmen, und so auch nicht die zwei Grenzlinien bzw. Grenzgebiete.

Für eine eigentlich gleiche Begründung der Nichttransitivität kann man auch wie folgt argumentieren: Die Korrespondenzrelation kommt im Prinzip nur transitiv vor, wenn sie in jedem Paar von Vorgänger- und Nachfolgertheorie im Enthaltensmodus enthalten ist. Wenn die Korrespondenzrelation nicht im Enthaltensmodus gegeben ist, dann wird die Transitivität nicht garantiert, und ist genau das, was die Nichttransitivitätsthese besagt. Dieses Argument ist jedoch nicht lückenlos, wenn hier nur der Enthaltensmodus ausgeschlossen wird. Diese Lücke bedeutet, daß unter dem Überlappensmodus der Korrespondenz die Transitivität nicht garantiert wird, jedoch gegeben sein könnte, wenn es dort so etwas wie einen Kernbereich (von wissenschaftlicher Leistung bzw. Errungenschaft) gibt, der von *jeder* Theorie auf dem Disziplinbereich unbedingt abgedeckt wird. (Siehe Fig. 1.)

Weil die Nichttransitivität mit einer solchen Möglichkeit logisch nicht in Widerspruch gerät, dürfte die eben geführte Argumentation an dieser Möglichkeit im wesentlichen keinen Schaden nehmen.



Ob in der Wirklichkeit der Theoriendynamik ein solcher Kernbereich des Überlappens beobachtet wird, der von jeder früheren (und zukünftigen) Theorie abgedeckt wird, bleibt hier eine offene Frage. Ich glaube jedoch nicht daran, und zwar aufgrund der Berücksichtigung des Bestehens des Berührungsmodus der Korrespondenz. Zumindest ist mir noch kein Grund dafür bekannt, der dafür spräche, an einen solchen Kernbereich zu glauben.

Mit der Nichttransitivitätsthese wird *nicht* behauptet, daß die im ersten Theoriewechsel durch das Korrespondenzprinzip bewahrte und in die neue Theorie überlieferte Leistung von der alten Theorie *nicht* im zweiten Theoriewechsel weiter bewahrt und überliefert würde. Diese Frage bleibt im Moment noch offen. Die Nichttransitivitätsthese besagt aber, daß sowohl der Anschlußpunkt, als auch die Anschlußbedingungen zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie im ersten und zweiten Theoriewechsel nicht gleichbleiben, sondern sich wahrscheinlich verändern. Konkreter: Der Anschlußpunkt für das Bohrsche Korrespondenzprinzip um 1920 waren die Frequenzen der Spektrallinien und die Anschlußbedingung $n \rightarrow \infty$. Wenn eines Tages die Quantenmechanik eine grundsätzliche Begrenztheit zeigen und aufgrund deren durch eine neue physikalische Theorie ersetzt werden müßte, so würde die Korrespondenzrelation zwischen der Quantenmechanik und ihrer Nachfolgertheorie nicht auf dem Punkt der Strahlungsfrequenz und unter der Grenzbedingung $n \rightarrow \infty$ liegen, sondern an anderer Stelle und unter anderen Grenzbedingungen. Die Grenzbedingungen betreffend kann ich diese These noch mit dem folgenden Argument erläutern: Die Grenzlinie der klassischen Physik konnte erst durch die quantenmechanischen Begriffe konkret gezeichnet werden, obwohl die Tatsache, 'daß die klassische Physik ihre Grenze hat' schon früher, vor der Entstehung der Quantentheorie, deutlich erkannt wurde. Die Grenzbedingungen für die Korrespondenzrelation, $n \rightarrow \infty$ für Bohr (1920) und später auch $h \rightarrow 0$, sind in den Termini der Quantentheorie formuliert, und nicht in denen der klassischen Physik. Ich glaube, dies ist zu verallgemeinern. Die Grenzlinie einer empirisch be-

währten Theorie wird nicht in den eigenen Termini, sondern durch die Begriffe der neuen und über diese Grenze hinausgehenden Theorie ausgedrückt.

Was in einem Theoriewechsel korrespondenzmäßig bewahrt wird, ändert sich von Theoriewechsel zu Theoriewechsel. Und wenn eine Leistung, die im letzten Theoriewechsel die Brückenrolle gespielt hat, von der alten Theorie auch nicht im nächsten Theoriewechsel direkt als falsch oder unbrauchbar abgewiesen wird, kann die alte Leistung mit der Verschiebung des zentralen Interesses durch den Theoriewechsel in einen wenig beachteten und vergessenen Winkel des Gebietes verdrängt werden.

5. Fortschritt in der Wissenschaft, und Zusammenspiel von Korrespondenz und Komplementarität

In diesem abschließenden Kapitel nehme ich die Gelegenheit wahr, aufgrund der in vorhergehenden Kapiteln durchgeführten Analyse eine systematische Diskussion über ein wissenschaftsphilosophisches Thema durchzuführen und dadurch meiner vorliegenden Arbeit einen in sich zusammenhängenden Sinn zu geben. In den vorhergehenden Kapiteln habe ich mich zum großen Teil mit der Darlegung der Tatsachen aus der Wissenschaftsgeschichte beschäftigt, vor allem der Physikgeschichte unseres Jahrhunderts. Bevor ich zu der Frage komme, was für eine wissenschaftsphilosophische Bedeutung die vorliegende Arbeit aufzuweisen vermag, möchte ich mich kurz mit dem Gedanken über ein allgemeines und grundlegendes Problem in der Wissenschaftstheorie befassen: mit der Beziehung zwischen Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsgeschichte.

Es scheint erst seit kurzem ein enger und auch spannungsgeladener Zusammenhang zwischen Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsgeschichte zu bestehen. Mitte dieses Jahrhunderts war es Kuhn mit seinem *SSR*, der die Priorität der Geschichte gegenüber der Logik in der Wissenschaftstheorie behauptete¹⁸⁷, und damit die Wissenschaftsgeschichte als die höhere Instanz in der Wissenschaftstheorie definierte. Es entstand nach Kuhns *SSR* und Feyerabends *Against Method* ein enthusiastischer Trend zu einem integrierten Unternehmen 'Geschichte und Philosophie der Wissenschaften [History and Philosophy of Science: HPS]'. Um eine wissenschaftsphilosophische These erfolgreich aufzustellen, genüge es nicht, sich innerhalb des Territoriums des logischen Denkens aufzuhalten, sondern man müsse die Belege für seine These auch in der Wissenschaftsgeschichte finden.

In der 60er Jahren kamen neue Zeitschriften, neue Abteilungen und Programme in den Hochschulen zustande. Aber, wie Nickles (1995) berichtet, kühlte dieser Trend schnell spürbar ab, und eine große Zahl von diesen Zeitschriften und Programmen war schon in den 80er Jahren entweder verschwunden oder in irgend eine andere Form transformiert. Das heißt jedoch nicht, daß der Zusammenhang zwischen den beiden so lose und schwach geworden war, daß ein globales Projekt unter dem Motto HPS gar nicht mehr in Frage kam. Die Situation von Wissenschaftsphilosophie, Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftssoziologie, und darüber hinaus in diesen Jahren auch noch die 'cognitive science', war einfach so kompliziert geworden, daß kaum eine klare Linie darin zu erkennen ist.

Von den 60er und 70er Jahren nach Kuhnschem Einfluß bis heute noch ist ein Aspekt zu beobachten in dem Trend der Wissenschaftsphilosophie, die sogenannte

¹⁸⁷ Vgl. Nickles (1995), 139.

„Fallstudienmethode“. Um eine wissenschaftsphilosophische These zu vertreten oder zu kritisieren, ist man nach diesem Trend von einer (oder mehreren) Fallstudie(n) in der Wissenschaftsgeschichte ausgegangen. In diesem Geist hätte dann diejenige wissenschaftsphilosophische These als gut begründet gelten können, die offensichtlich durch möglichst viele Fallstudien bestätigt und gestützt wird, oder anders gesagt, die möglichst nicht den Ergebnissen der Fallstudien widerspricht. Gegen diese Fallstudienmethode als Standardmethode in der Wissenschaftsphilosophie in den 60er und 70er Jahren wurde jedoch u.a. von M. Hesse Kritik ausgeübt.¹⁸⁸ Auch Nickles spricht auf dieser kritischen Linie interessante Worte:

Too often philosophers yanked specially selected cases out of time and historical context to support a favorite thesis. Too often they drew conclusions about science-in-general from one or two cases from centuries ago, before the scientific field in its modern form had yet emerged. And indeed, historical case studies can be too much like Bible in the respect that *if one looks long and hard enough, one can find an isolated instance that confirms or disconfirms almost any claim.* (Nickles (1995), 141, Hervorhebung von I.Ko)

Es sei ein naiver Gedanke, meint Nickles, daß man eine wissenschaftsphilosophische These auf eine Fallstudie in der Wissenschaftsgeschichte begründen könne. Bedeutet das dann, daß die beiden, Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsgeschichte, zwei unabhängige Unternehmungen seien? Nein, es ist bloß eine andere extreme Sicht, die weder den Tatsachen entspricht, noch beiden Seiten etwas Nützliches bringen kann. Sicher ist, daß der Zusammenhang zwischen Philosophie und Geschichte der Wissenschaften nicht einfach und unproblematisch ist. Genau das Gegenteil ist der Fall.

Die Fallstudienmethode zu kritisieren, kann wiederum einem neuen Trend zugeordnet werden. Man möchte nicht von der Wissenschaftsgeschichte eine Verallgemeinerung auf die Wissenschaftsphilosophie unternehmen, sondern bei möglichst detaillierten und exakten Schilderungen der Geschichte bleiben. Man kann sich auf jeden Fall sicher fühlen, wenn man sich nicht oder nur wenig möglichen Angriffen gegen die gewagte Verallgemeinerung aussetzt. Aber dort meint Nickles:

My own view is that generalist intellectuals are still needed. Both history and philosophy have become overspecialized. Both used to be of wide intellectual and even public interest. A philosophical role that I find attractive is that of a generalist who can help specialists and local disputants to view their work from different perspectives, to make connections to new precedents and exemplars. (149)

¹⁸⁸ Siehe Hesse (1980).

In der Tat sind verschiedene Arten der Verknüpfung mit verschiedenen Bindungsstärken zwischen Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsgeschichte möglich. Es ist keine Frage von 'richtig-oder-falsch', sondern eine Frage der Einstellung, und zwar der, wie man Wissenschaftsphilosophie *und/oder* Wissenschaftsgeschichte treiben will, in welcher Form man in seiner wissenschaftlichen Tätigkeit als ein/e Wissenschaftsphilosoph/in oder Wissenschaftshistoriker/in diese beiden auf den Arbeitstisch bringt.

Nach der Minnesota Konferenz von 1969 in Wissenschaftsphilosophie schrieb Giere über die Relation der Geschichte und Philosophie der Wissenschaft einen Aufsatz „History and Philosophy of Science: Intimate Relationship or Marriage of Convenience?“ (1973), wo er die Frage formulierte, ob zwischen diesen eine 'intime Relation' besteht, oder ob es sich bloß um eine Vernunfttheirat (*marriage of convenience*) handelt. Und seine Antwort war, nachdem er die dreizehn Beiträge der Minnesota Konferenz sorgfältig analysiert hatte, daß es keinen Grund gebe, die Beziehung als mehr als eine Vernunftehe einzuschätzen. Trotzdem hieße dies nicht, daß diese Ehe besser gebrochen werden solle.

The proliferation of centres, departments and programmes for history and/or philosophy of science during the past decade shows that neither historians nor philosophers of science are happy with their parent disciplines¹⁸⁹. In these circumstances a marriage of convenience may currently be the most practical institutional arrangement. Whether this arrangement will prove to be relatively permanent or only transitional remains to be seen. (Giere (1973), 296)

Dagegen schrieb Burian (1977) in Antwort auf Giere:

[H]istorical inquiries are of central importance in the philosophy of science. More specifically, the choice among differing rational reconstructions of an explanation or a theory ... ought to depend ... [also] on the best available interpretation of the historical record. This is the way to minimize the risk of anachronism and irrelevance, always serious in abstract philosophical treatments of science. (38)

Zu beachten ist hierbei, daß er über „the best *available* interpretation of the historical record“ spricht. Dies ist wichtig, denn:

history of science itself is undergoing significant historical *change* that undermines earlier conceptions of the field. (Nickles (1995), 148)

Wenn Wissenschaftsphilosophie auch in engem Zusammenhang mit der Geschichte der Wissenschaft bleiben soll, was mir an sich durchaus sinnvoll erscheint, garantiert diese Verbindung dennoch nicht die eindeutige und immer feiner werdende Aufzeichnung wissenschafts-

¹⁸⁹ Das heißt jeweils 'Geschichte' und 'Philosophie'.

philosophischer Thesen. Immerhin ist diese Verbindung für die Wissenschaftsphilosophie sehr wichtig. Geschichte hilft den Philosophen, „*in touch with real science*“ zu bleiben¹⁹⁰, so daß es nicht zu der ironischen Lage kommt, in der sie den Kontakt mit dem Gegenstand ihrer Forschung verloren haben. Nicklessche Antwort auf die Frage der Zukunft von der Geschichte-und-Philosophie-der-Wissenschaft ist „vorsichtig bejahend“. Die beiden sollen in größerem Umfang in der Wissenschaftstheorie zusammenarbeiten.¹⁹¹ Für diese Zusammenarbeit gibt es keine fest etablierte Methodologie; und auch kein Tabu. Jedoch ist nicht zu vergessen, daß die Wissenschaftsgeschichte eine unendliche Geschichte ist, was wiederum impliziert, daß die Wissenschaftsphilosophie als ihr Partner höchstwahrscheinlich auch eine unendliche Geschichte haben wird.

Dargestellt wird im Folgenden dieses Kapitels eine mögliche Form der wissenschaftsphilosophischen Überlegung über ein Thema, in dem die Rücksichtnahme auf die Wissenschaftsgeschichte auf keinen Fall ausgeklammert werden kann. In der Diskussion möchte ich eine Möglichkeit zeigen, daß eine wissenschaftsphilosophische Untersuchung ein Klassifikations- und weiter Evaluationsschema über (verschiedene Typen von) Theoriendynamik vorlegen kann, das uns einen weiteren systematischen Überblick auf die Resultate der wissenschaftshistoriographischen Untersuchungen ermöglichen würde.

5.1. Ein in der Tat sehr problematisches Thema: Fortschritt in der Wissenschaft

Machen die Wissenschaften Fortschritt? Obwohl man bei dieser Frage möglicherweise zögern könnte, eine Antwort zu geben, — vielleicht weil man sich nicht sicher ist, was eigentlich mit der Frage gemeint wird — schätze ich, daß wohl die Mehrzahl heute dazu eine positive Antwort geben würde.

An dieser Stelle möchte ich die Möglichkeit zu einem Mißverständnis beseitigen, das in unserer Diskussion über das Thema ‘Fortschritt nicht schwer auszuräumen ist. Man könnte nämlich unsere eigentliche Frage mit einer anderen verwechseln, und zwar der, ob die Wissenschaften unserem Leben (oder unserer Welt usw.) Fortschritt bringt, was offensichtlich nicht im Sinne der eigentlichen Frage ist. Diese andere Frage, ob Wissenschaft uns ein besseres Leben und eine bessere Welt bringt, die vielleicht viel häufiger in verschiedenen Kontexten des Alltags gestellt und diskutiert würde, steht aber in dieser Arbeit nicht zur Debatte.

¹⁹⁰ Nickles (1995), 161.

¹⁹¹ Vgl. Nickles (1995), 159.

Auf unsere erste Frage ist im Prinzip entweder mit Ja oder Nein zu antworten. Wenn man sich ein Gespräch vorstellt, in dem einer diese Frage stellt und ein anderer mit (zum Beispiel) Ja antwortet, folgt aber sofort die Idee einer möglichen Fortsetzung des Gesprächs. „In welchem Sinne machen die Wissenschaften Fortschritt?“ Oder anders formuliert lautet die Frage: „Wenn du Ja sagst, welche Vorstellung von Fortschritt hast du dabei? Was ist dein Kriterium für Fortschritt?“ Auf die letzte Frage, die Kriterien für den Fortschritt in der Wissenschaft, möchte ich zum Abschluß meiner Arbeit eingehen.

Die traditionelle Sicht der Wissenschaft schrieb der Wissenschaft generell kumulativem Fortschritt zu¹⁹², wissenschaftliche Entwicklung könne und solle im Prinzip als *‘process of accretion’* dargestellt werden¹⁹³. Aber es war in der Tat eine wichtige Motivation für T.S. Kuhn zu seinem Werk *SSR*, daß die Wissenschaftshistoriker, Kuhn selbst eingeschlossen¹⁹⁴, in ihrer Forschung immer mehr Schwierigkeiten sehen mußten, wenn sie die Wissenschaftsgeschichte aus der Sicht von *‘development-by-accumulation’* zu verstehen und darzustellen versuchten¹⁹⁵. Diese Art des Fortschrittes der Wissenschaft, nämlich als Akkumulationsprozeß, soll bei Kuhn in *SSR* keineswegs die ganze Geschichte sein, wenn sie auch nicht ganz geleugnet werden sollte¹⁹⁶. Ich möchte mich im Folgenden darum bemühen, einen haltbaren Fortschrittsbegriff vorzulegen, der mit der Kuhnschen Wissenschaftstheorie über Theoriendynamik verträglich ist und sie auch noch sinnvoll ergänzen soll.

Was heißt eigentlich der „Fortschritt“ in den Wissenschaften? Diese Frage ist meines Erachtens eine zentrale und fundamentale Frage in den wissenschaftsphilosophischen Debatten über die Theoriendynamik. Hoyningen-Huene (1989) betont in diesem Punkt zu Recht, daß in der ganzen Debatte um den Fortschritt in der Wissenschaft die Frage eine zentrale Rolle spielt, *welcher Fortschrittsbegriff dort verwendet wird*. Meine erste Aufgabe ist, eine systematische und annehmbare Basis für die weitere Diskussion des Themas Wissenschaftsfortschritt durch eine brauchbare Definition des Fortschrittsbegriffes zu schaffen. Die erste Frage dazu lautet: *Welcher Fortschrittsbegriff für Theorie wäre verwendbar?* Was für Kriterien für den wissenschaftlichen Fortschritt *können* eigentlich aufgestellt werden, wenn man über den Fortschritt in der Wissenschaft reden und diskutieren will? Es soll beachtet werden, daß es hier zunächst nicht um die geeigneten oder haltbaren, sondern nur um die möglichen Kriterien geht.

¹⁹² Hoyningen-Huene (1989), 251.

¹⁹³ *SSR*, 3.

¹⁹⁴ Siehe *Preface* von *SSR*.

¹⁹⁵ *SSR*, 2.

¹⁹⁶ Hoyningen-Huene (1989), 251.

Zuerst möchte ich argumentieren, daß zwischen dem Fortschritt (*progress*) und der Entwicklung (*development*) begrifflich zu unterscheiden ist¹⁹⁷. Die Unterscheidung sei die, daß 'Fortschritt' ein Werturteil einschließt, d.h. einen evaluativen Faktor, während dies für die 'Entwicklung' nicht unbedingt der Fall ist. Eine Entwicklung kann sowohl einen Fortschritt als auch einen Rückschritt bedeuten, oder auch möglicherweise keines von beiden. Anders formuliert, der Fortschritt, in welchem Sinne man diesen Begriff auch verwenden mag, zeigt in eine bestimmte Richtung¹⁹⁸, und zwar in eine positiv gewertete Richtung. In diesem Sinne heißt wissenschaftlicher Fortschritt;

(0) daß die neue akzeptierte Theorie *besser* als die alte Theorie ist.

(0) scheint mir analytisch wahr zu sein, da die Negation von (0) selbst widersprüchlich ist. Im Begriff des Fortschrittes ist die Richtung zum *Besseren* wesentlich. Die nächste Frage soll daher lauten: Besser in welchem Sinne? Besser unter welchen Kriterien? Ich lege eine Reihe von möglichen Antwortvarianten vor. Fortschritt in der wissenschaftlichen Theorie würde bedeuten:

- (1) daß die neue Theorie *etwas* kann, *was die alte Theorie nicht konnte*, was aber von ihr zu wünschen war; oder
- (2) daß die neue Theorie *alles* kann, *was die alte Theorie konnte*, und auch etwas *mehr*; oder
- (3) daß die neue Theorie wesentlich *effizienter/ schneller/ mit weniger Aufwand* als die alte Theorie die Probleme löst; oder
- (4) daß die neue Theorie wesentlich *genauere* Lösung[en]/ Voraussage[n] als die alte Theorie liefert; oder
- (5) daß die neue Theorie *keine innere Inkonsistenz* zeigt, wo die alte Theorie das Konsistenzproblem hatte; oder, daß die neue Theorie global gesehen wesentlich weniger Konsistenzprobleme hat als die alte Theorie.

Ich behaupte weder, daß diese Liste alle Möglichkeiten erschöpfend abdeckt, noch, daß die verschiedenen Varianten voneinander völlig unabhängig sind. Was anders formuliert auch heißt, daß sie sich nicht ausschließen. Sie bietet jedoch einen systematischen Hinblick auf unser Problem, welche sinnvollen Konzepte und Kriterien für den wissenschaftlichen Fortschritt verwendbar sind. Aufgrund dieser Aufzählung werde ich meine Fragestellung einen Schritt weiter bringen. In der Tat ist eigentlich eine völlig andere Liste der Kriterien ebenso

¹⁹⁷ Diese Unterscheidung ist auch in Collingwood (1963) sichtbar.

¹⁹⁸ Jeder, der den Fortschrittsbegriff akzeptiert und Inkohärenz vermeiden möchte, muß eine bestimmte Richtung [das beinhaltet auch das Kriterium dafür] *vorziehen* und auch konsequent beibehalten/ darauf bestehen. Es scheint mir problematisch, wenn Kuhn in seiner Wissenschaftstheorie den wissenschaftlichen Fortschritt beibehalten möchte, wenn er keine über mehrere Revolutionen hinaus gehaltene Richtung zu erwähnen vermag. Vgl. Hoyningen-Huene (1989).

möglich, zum Beispiel, 'daß die neue Theorie zum Weltfrieden mehr beiträgt'; oder 'daß sie im Endeffekt mehr Arbeitsplätze im Inland schafft', etc. Aber ich beschränke mich hier nur auf die Ansicht, was die Theorie an sich [den Wissenschaftlern] zu bieten hat. Ich möchte damit den Gesichtspunkt außer acht lassen, was die Theorie in Bezug auf etwas außerhalb des Territoriums der in Frage stehenden Wissenschaft bedeutet.

In diesem Sinne haben die obigen sechs Gesichtspunkte einiges gemeinsam. Sie bieten die Kriterien für den Vergleich, in dem zwei Theorien vor dem Hintergrund der Wissenschaft, und nicht anderer Verhältnisse verglichen werden können. Wenn der Vergleich erfolgreich durchgeführt worden ist, soll die Schlußfolgerung in der Form, 'Es ist Fortschritt', oder 'Es ist kein Fortschritt', möglich sein, und zwar unabhängig von der jeweiligen Perspektive¹⁹⁹. Weiter, werden *zwei zeitlich aufeinander folgende Theorien* verglichen, *die im wesentlichen mit dem selben Themenbereich beschäftigt sind*. Mein Interesse richtet sich dann auf die Frage der Natur dieses Vergleichs.

Von (1) bis (5) sagt jeder Kandidat etwas Unterschiedliches über diese Frage. (1) und (2) stellen die Fähigkeit der Theorie, und zwar, wieviel (quantitativ) eine Theorie kann, als Kriterium. Im Interesse ist nur die Frage, *ob* ein Problem mittels einer Theorie gelöst wird, und nicht *wie*. Die zwei sagen aber unterschiedliche Dinge. In (1) wird nicht in Frage gestellt, ob oder wieviel die neue Theorie kann, was die Alte konnte, sondern nur, was die neue Theorie neu zu bieten hat, was die alte nicht hatte, und von welcher Wichtigkeit diese neue Leistung ist. In (2) ist zentral, ob keine Leistung der alten Theorie durch den Wechsel wegfällt, und ob weitere Leistung hinzukommt, wie gering sie auch sein mag.

(3) und (4) bieten einen Blick auf andere Aspekte der Leistungen einer Theorie, die auch 'qualitativ' zu nennen sind. Diese spiegeln jeweils zwei verschiedene und wesentliche Gesichtspunkte in der Bewertung der wissenschaftlichen Leistungen wider. Hier wird gefragt, *wie* eine Theorie die Probleme löst, und nicht *ob* sie das tut. (5) stellt einen anderen und weiteren Standpunkt in der Kriteriumsfrage dar, der in diesem Problem essentiell erscheint: die innere Konsistenz einer Theorie.

Die fünf Punkte von (1) bis (5) sind so formuliert, daß sie sich zumindest auf der logischen Ebene nicht widersprechen. Das heißt, alle Kombinationen von diesen fünf sind im Prinzip möglich. Wenn man zum Beispiel (1) und (2) zusammenfügt, heißt das, daß die neue Theorie alles kann, was die alte konnte, und zusätzlich noch etwas, was in der alten Theorie eigentlich sehr wünschenswert war, aber nicht geboten werden konnte. Natürlich ist [(1) ohne, d.h. mit Ablehnung von, (2)] oder [(2) ohne (1)] auch möglich. Wenn man zum Beispiel (2), (3) und (4) zusammen nimmt, dann heißt die Alternative diesmal, daß die

¹⁹⁹ Diese Unabhängigkeit heißt, der Fortschritt solle nicht bloß heißen, daß die neue Theorie den meisten Wissenschaftlern besser gefällt.

neue Theorie alles kann, was die alte konnte, aber noch effizienter und mit höherer Genauigkeit²⁰⁰. Rein arithmetisch kalkuliert gibt es hier mindestens 31 mögliche Varianten, also $(2^5 - 1)$.

Ich versuchte in der obigen Darstellung kurz anschaulich zu machen, daß der Fortschrittsbegriff vielseitig ist, und daß die verschiedenen Komponenten in diesem Begriff nicht homogen sind. Wenn man also mit dem Thema 'Fortschritt in der Wissenschaft' beschäftigt ist, muß man sich dieses Faktums bewußt sein, und auch der Möglichkeit, daß die verschiedenen Komponenten eventuell in Konflikt kommen können, etwa in der Frage, ob es einen wissenschaftlichen Fortschritt gab oder nicht; oder, ob die Wissenschaft allgemein Fortschritt macht.

5.1.1. Wissenschaftsfortschritt bei Kuhn: Fortschritt ohne Ziel, Evolution ohne *Telos*

Hier soll nun der Fortschrittsbegriff bei T.S. Kuhn betrachtet werden. Hoyningen-Huene (1989) stellt in der Kuhnschen Wissenschaftstheorie die Problemlösefähigkeit (*problem solving power*) als das Kriterium für den wissenschaftlichen Fortschritt fest. Der Fortschritt in der wissenschaftlichen Theorie heißt in Kuhnscher Wissenschaftstheorie,

daß die neue Theorie mehr *Problemlösefähigkeit* als die alte Theorie besitzt. (Hoyningen-Huene (1989), 251).

5.1.1.1. Das Kriterium: *Problemlösefähigkeit*

Der Zuwachs der Problemlösefähigkeit im Kuhnschen Kontext wird wie folgt gedeutet: *Daß die Wissenschaftler einen größeren Bereich von Phänomenen oder die schon bekannten Phänomene mit größerer Genauigkeit behandeln können*²⁰¹. Dieses Kriterium sieht wie eine Mischung von einigen nicht homogenen Kriteriumskomponenten aus. Wenn man dies mittels der Kriterien (1) bis (5) formulieren würde, ist im Kuhnschen Kriterium nämlich (1) und/oder auch eine variierte Form von (2) enthalten, und weiter, ist auch (4) enthalten. Wenn das der Fall ist, und wenn man dieses Kriterium in einem konkreten Kontext anwenden möchte, taucht ein Problem auf: Wenn man zugleich mehrere Kriterien für ein Wertur-

²⁰⁰ Man merkt, daß es hier problematisch werden kann, wie man das Element von neuer Leistung in 3) mit 4) bzw. 5) zusammenbringen soll. Jedoch im Moment steht das Problem gar nicht zentral in dem Kontext.

²⁰¹ Hoyningen-Huene (1989), 251. Vgl. Kuhn in *SSR*: „[S]cientists were able to account for a wider range of natural phenomena or to account with greater precision for some of the previously known.“ (66)

teil hat, wie soll man dann diese in einer möglichen Konfliktsituation zwischen den verschiedenen Kriterien in eine Ordnung bringen?²⁰²

Zunächst soll untersucht werden, ob dies in der Tat eine inhomogene Mischung ist, und ob wirklich eine solche Konfliktmöglichkeit besteht. Der Zuwachs an Problemlösefähigkeit heiße zunächst, daß die Wissenschaftler einen größeren Phänomenbereich zur Verfügung haben²⁰³. Was bedeutet aber das Größerwerden hier genauer? Es ist ein klarer Fall, wenn kein Teil vom alten Phänomenbereich verloren gegangen ist. Dann bedeutet das Hinzukommen eines kleinen Stückes zum verfügbaren Phänomenbereich den gewünschten Zuwachs. Dies deckt sich mit Fall (2) auf meiner Liste. Es ist eine Möglichkeit, daß das obige Kriterium von Kuhn als die Vektorsumme von (2) und (4) gelesen wird. Bei Kuhn jedoch scheint dies kaum der Fall zu sein. In jedem Theoriewechsel, der durch eine wissenschaftliche Revolution erfolgt, ist der sogenannte Kuhn-Verlust ein typisches Begleitsymptom²⁰⁴, das in Kuhnscher Revolutionsstruktur auch einen wesentlichen Aspekt bildet²⁰⁵.

Dabei stellt sich die Frage, wie ein Zuwachs zu veranschaulichen bzw. zu messen wäre. Berücksichtigt man hierbei die sogenannten Kuhn-Verluste, sollte es möglich sein, im gesamten Bereich einen Zuwachs auszumachen, selbst wenn ein Teil des alten Problembereichs verloren geht. Dies kann nur heißen, daß ein *größerer* Bereich von den gelösten beziehungsweise zu lösenden Problemen durch die neue Theorie dazu gewonnen wurde als durch den Wechsel verloren ging. Wie erfolgt aber dieser Vergleich zwischen dem verlorengegangenen und neugewonnenen Teil des Problembereichs? Aus der Kuhnschen Sicht der wissenschaftlichen Revolution ist solch ein objektiver Standpunkt „von Außen“ unhaltbar²⁰⁶. Wie ist dann der Zuwachs zu retten? Diese Frage führt uns zu einem wichtigen Punkt in dem Fortschrittsbegriff in der Kuhnschen Wissenschaftstheorie. Kurz gesagt, der Vergleichsbegriff ist im Kuhnschen Schema nur dann in sich konsistent, wenn man annimmt, daß der Vergleich *lokal* zu machen ist. „Lokal“ in dem Sinne, daß der Vergleich immer aus dem Standpunkt der jeweiligen neu(est)en Theorie erfolgt. Diese Lokalität bezieht sich eigentlich auch auf die im Abschnitt 4.3. diskutierte Lokalität, und zwar im Sinne von Nichttransitivität. Der Vergleich erfolgt zwar zwischen T_k und T_{k+1} , und nicht zum Beispiel

²⁰² Prof. Hoyningen-Huene hat mich auf die Möglichkeit aufmerksam gemacht, daß diese Frage an sich aufgelöst werden kann, aufgrund des Argumentes, daß die wissenschaftliche Gemeinschaft solange unentschieden bleiben werde, wie es ihr unklar ist.

²⁰³ „Phänomenbereich zur Verfügung“ heißt hier solchen Bereich der Phänomene, der bereits der theoretischen Behandlung(-sfhigkeit) der Wissenschaftler unterliegt, und nicht bloß den Umfang der Phänomene, der vor die Wissenschaftler als Gegenstand ihrer Forschung gestellt wird.

²⁰⁴ „In the process the community will sustain losses.“ (SSR, 170)

²⁰⁵ Hoyningen-Huene (1989, Abs.7.6.b)) beschreibt diesen Verlust als eine „Qualifikation“ des wissenschaftlichen Fortschrittes durch die Revolution.

²⁰⁶ Prof. Hoyningen-Huene hat mich auf diesen Punkt aufmerksam gemacht.

zwischen T_k und T_{k+2} oder T_{k+3} . In dem Vergleich zwischen T_k und T_{k+1} treten nur die zwei Gesichtspunkte für die Entscheidung als relevant auf, nämlich die von T_k und T_{k+1} . Kein weiterer, 'idealer' Standpunkt wird in den Vergleichszusammenhang einbezogen.

An mehreren Stellen in *SSR* bekommt man bei Kuhn den Eindruck, daß er den Fortschritt in der Wissenschaft irgendwie als eine Selbstverständlichkeit annimmt. In dem bekannten, von Lakatos und Musgrave herausgegebenen Band, der in dem selben Jahr mit der zweiten, erweiterten Auflage seines *SSR* erschienen ist, schreibt er:

[W]e must explain why science — our surest example of sound knowledge — progress *as it does*, and we must first find out how, in fact, it does progress.
(Kuhn (1970b), 20, Hervorhebung von I.Ko)

Daß die Wissenschaft Fortschritt macht, ist von ihm bereits als evident angenommen. Er nimmt dann nur die Frage als seine Aufgabe wahr, *wie* sie Fortschritt macht. *SSR* läßt sich auch, so schätze ich, als eine systematische Antwort auf diese Frage lesen. In *SSR* schreibt Kuhn:

To a very great extent the term 'science' is reserved for fields that do progress in obvious ways. (160)

Er meint, zwischen unserem Begriff von der Wissenschaft und vom Fortschritt bestehe eine „unentrinnbare Verbindung“ (inextricable connections)²⁰⁷, so daß offensichtlich 'Fortschritt' in hohem Grade exklusiv für die 'Wissenschaften' als ihr Vorrecht reserviert worden ist. Diese unentrinnbare Verbindung kommt jedoch andererseits auch als eine Art Redundanz vor, worin es in der Tat nichts wirklich Spannendes zu sehen gibt. Dieser Aspekt soll näher betrachtet werden.

5.1.1.2. Fortschritt in einer Normalwissenschaft und Fortschritt durch die Revolution

Der Fortschritt in der Wissenschaft als Zuwachs der Problemlösefähigkeit wird in *SSR* in zwei Hinsichten betrachtet. Erstens erwähnt Kuhn das Wachsen der Problemlösefähigkeit in *einer* Normalwissenschaft als Fortschritt. Innerhalb eines Paradigmas wächst die Zahl der gelösten Probleme im Prinzip *monoton*, und in dem Sinne ist dieser Fortschritt *kumulativ* zu bezeichnen. Und,

it is only during periods of normal science that progress seems both obvious and assured. (*SSR*, 163)

²⁰⁷ *SSR*, 161.

Das Ergebnis von der Tätigkeit der wissenschaftlichen Gemeinschaft als problemlösender Korpus scheine sogar unvermeidbar Fortschritt zu sein. Wie meint er das?

In its normal state, then, a scientific community is an immensely efficient instrument for solving the problems or puzzles that its paradigms define. Furthermore, the result of solving those problems must *inevitably* be progress. (SSR, 166, Hervorhebung von I.Ko)

Was in einer Normalwissenschaft getan wird, läßt sich in Analogie zum Rätsellösen (*puzzle solving*) verstehen.²⁰⁸ In der Aktion des Rätsellösens wird keine grundsätzliche Innovation als Ziel gesetzt. In einer Normalwissenschaft werden nur solche Probleme für die Forschungen gefunden und als Probleme anerkannt, die im Prinzip in diesem Paradigma gelöst werden können. Was bedeutet dann konkret unter diesem Umstand der Fortschritt innerhalb *einer* Normalwissenschaft? Kuhn schreibt, dank der Natur von wissenschaftlicher Gemeinschaft wird die Liste der gelösten Probleme *und* auch die Genauigkeit der einzelnen Problemlösungen immer noch wachsen²⁰⁹. Das heißt, die *Zahl der gelösten Probleme*, oder auch anders formuliert, die Zahl der zu lösenden Probleme in einer Normalwissenschaft nimmt monoton zu²¹⁰, und die Lösungen werden immer feinere Übereinstimmung mit den empirischen Daten zeigen. In diesem Sinne kann man das Wachsen einer Normalwissenschaft als kumulativ betrachten²¹¹. Hier ist jedoch eine Bemerkung notwendig. Der Zuwachs in der Problemlösefähigkeit in einer Normalwissenschaft soll in einem beschränkten Sinne verstanden werden, da in dem Fortschritt in der Normalwissenschaft wesentliche Innovation (in der Aktivität des Rätsellösens) ausgeschlossen bleibt. Dennoch, trotz dieses Mangels an Innovation, ist der Fortschritt als Resultat aus den normalwissenschaftlichen Tätigkeiten ungefährdet. Folgende Worte von Kuhn setzen einen Schlußpunkt in dem Problem des Fortschritts innerhalb einer Normalwissenschaft.

Viewed from within any single community, however, whether of scientists or of non-scientists, the result of successful creative work *is* progress. How could it possibly be anything else? (SSR, 162, Hervorhebung im Original)

²⁰⁸ SSR, 35ff.

²⁰⁹ „Yet despite these and other losses to the individual communities, the nature of such communities provides a virtual guarantee that both the list of problems solved by science and the precision of individual problem-solutions will grow and grow.“ (SSR, 170)

²¹⁰ Daß die Menge von den zu lösenden Problemen und den gelösten Problemen im Prinzip für identisch zu halten sind, liegt in der Eigenschaft der Normalwissenschaft in ihrer Art der Entdeckung, Auswahl bzw. Identifizierung der Forschungsprobleme.

²¹¹ Siehe auch Hoyningen-Huene (1989), 180f.

Ich betrachte nun das zweite Konzept des wissenschaftlichen Fortschrittes bei Kuhn, und zwar eines Fortschritts durch wissenschaftliche Revolutionen. Ich untersuche weiter, ob und wie die zwei Arten des Fortschritts unter *einen* Begriff eingeordnet werden können. Die andere Art des Fortschrittes finde durch die wissenschaftliche Revolution statt. Obwohl das Kriterium 'das Wachsen in der Problemlösefähigkeit' nach wie vor grundlegend in seinem Fortschrittsbegriff zu sehen ist, erscheint die Situation um dieses Wachsen und der Verlauf des Wachstums anders und auch komplizierter, als beim Fortschritt in einer Normalwissenschaft. Hierbei entsteht nämlich eine neue Situation.

Im letzten Kapitel der *SSR* beschäftigt sich Kuhn mit der Frage des Fortschrittes durch Revolutionen. Wenn man seine Paradigmentheorie zusammen mit der Idee der Inkommensurabilität ins Auge faßt, dann wird schnell fraglich, welchen konsequenten Begriff des Fortschrittes seine Wissenschaftstheorie vorlegen könnte. Fortschritt spricht, wie oben gesehen, ein Werturteil aus. Dieser Begriff beinhaltet in sich eine Richtungskomponente, und zwar in Richtung zu einer besseren Theorie. Die Frage ist dann: Kann man zwei inkommensurable Theorien, zwischen welchen eine wissenschaftliche Revolution liegt, in dem Sinne vergleichen, daß man eine davon besser als die andere beurteilen kann? Wenn Ja, heißt es dann, es gebe ein Maß, nämlich einen dritten, *objektiven* Standpunkt, wovon aus die Beurteilung sinnvoll erfolgen kann?

Auf die erste Frage antwortet Kuhn mit einem deutlichen 'Ja', während er auf die zweite keine klare Antwort bieten würde, oder anders ausgedrückt, würde sich diese Frage bei Kuhn nicht sinnvoll stellen lassen. Wie ist dieser augenscheinliche Zwiespalt zu verstehen: Vergleichbar aber ohne eine dritte Perspektive?

Die Kuhnsche Position sagt zu dieser Frage, der Vergleich finde nur *entweder* aus der Perspektive der alten Vorgängertheorie, *oder* der neuen, Nachfolgertheorie statt. Dies bringt uns zu einem zentralen Punkt des Kuhnschen Fortschrittsbegriffes in *SSR*. Die Anhänger der zwei Lager der jeweiligen Theorie sprechen möglicherweise, vielleicht sogar meistens, verschiedene Ergebnisse des Vergleichs an. Eine Entwicklung in der Theorie, die für die einen deutlich einen Fortschritt bedeutet, kann für die anderen als Rückschritt erscheinen. Die Frage ist nur, wer aus dieser gesamten Situation als Sieger hervorgeht. Wichtig ist für eine Revolution, daß die Perspektive des Verlierers, d.h. der Vorgängertheorie, vernachlässigt wird²¹². Die Verliererperspektive wird nicht nur vernachlässigt, sondern sie unterliegt der Gewalt der Sieger.

[T]he member of a mature scientific community is, like the typical character of Orwell's *1984*, the victim of a history rewritten by the powers that be. (*SSR*, 167)

²¹² *Op.cit.*, 253f.

Die Autorität der Sieger läßt die Geschichte neu schreiben, und zwar so, daß der Sieger selbst als ein durchaus verdienter Sieger hervortritt, und der Verlierer in dem Theorienvergleich offensichtlich seine Inferiorität gegenüber dem Sieger erwiesen hat. Geschichtsbeschreibung soll in dieser Weise in den nach der Revolution neu geschriebenen Lehrbüchern zu beobachten sein. Ist die Geschichte des Fortschritts durch eine Revolution, wie oben geschildert, nicht unfair? Folgendes Zitat könnte einen solchen Verdacht noch untermauern.

There are losses as well as gains in scientific revolutions, and scientists tend to be peculiarly blind to the former. (*SSR*, 167)

Diese Neigung der Wissenschaftler, den von einer Revolution verursachten Verlusten keine große Aufmerksamkeit zu widmen, bildet einen wesentlichen Aspekt wissenschaftlicher Revolution. Die Vergleichsmöglichkeiten der beiden aufeinander folgenden Theorien, zwischen denen eine Revolution liegt, wird auf keinen Fall durch die Inkommensurabilität gänzlich verneint. Jedoch wird der Vergleich immer nur von *einem* der beiden Paradigmen durchgeführt. Wenn ein Vergleich von einem 'dritten' Standpunkt aus vorstellbar ist, und auch durchführbar sein soll, sieht die Situation nicht wesentlich besser aus.

Im Kuhnschen Begriff des wissenschaftlichen Fortschritts wird die *objektive* Überlegenheit einer neuen Theorie gegenüber der alten Theorie nicht fundiert. Obwohl seine Wissenschaftstheorie die 'Rationalität' in der Theoriewahl nicht ausschließen mag, kann diese Rationalität im Prinzip keine weitere Geltung über diese bestimmte Theoriewahl hinaus in Anspruch nehmen. Bei Kuhn ist klar zu beobachten, daß er selbst auch bei diesem Problem auf einer schwankenden Position sitzt. Vor den vielfältigen Kritiken, die — zum Teil berechtigt — die problematischen Punkte bzw. Darstellungen von Kuhn in *SSR* aufzeigen, wurde Kuhn nicht eindeutiger in seiner Position. Das heißt, er entschied sich nicht für eine von den beiden Möglichkeiten des Fortschrittsbegriffs, nämlich zwischen Redundanz des Begriffs und dem objektiven Zuwachs, sondern die Schwankung in seiner Position geht weiter und wird auch in bestimmtem Sinne noch deutlicher. Zum einen macht er die Position klarer, indem er in der Theoriewahl allgemein *die* gemeinsame Basis findet.

These five characteristics - accuracy, consistency, scope, simplicity, and fruitfulness - are all standard criteria for evaluating the adequacy of a theory. [...] Together with others of much the same sort, they provide *the* shared basis for theory choice. (Kuhn (1977), 322, Hervorhebung im Original)²¹³

²¹³ Dieses Artikel in Kuhn (1977), „Objectivity, Value Judgment, and Theory Choice“, stammt aus einem unpublizierten Vortrag vom 30. November 1973.

Zum anderen aber betont er den Punkt, daß nicht die Kriterien, sondern die Wissenschaftler die Entscheidungen über die Theoriwahl treffen. Wenn man die obigen zwei Punkte zusammen nimmt, lautet die Pointe, wie er sie selber formuliert;

that every individual choice between competing theories depends on a mixture of objective and subjective factors, or of shared and individual criteria. (Kuhn (1977), 325)

Einerseits, so möchte ich formulieren, ist er offen und redlich, aber andererseits spricht er hier nur etwas Triviales aus. Insbesondere in Bezug auf das Problem des Fortschrittsbegriffes löst eine solche Position nicht das Problem, sondern vergrößert es eher. Seine 'Mischung' der objektiven und subjektiven Komponente besteht in der Tat aus den augenscheinlich festgelegten Kriterien als gemeinsamer Basis und unterschiedlicher Interpretation dieser Kriterien sowie verschiedenen Reihenfolgen der relativen Wichtigkeit einzelner Kriterien. Damit stellt er sich vor die Doppelaufgabe, zweierlei zu erklären: wie diese 'gemeinsamen' Kriterien als solche zustande kommen, und wie die Begründung von diesen Kriterien als *die* relevanten Kriterien vorgelegt werden kann; und wie eine wissenschaftliche Gemeinschaft als die selbständige höchste Instanz in einer Theoriwahlsituation tatsächlich anhand solcher Kriterien zu einer Entscheidung kommt.

Das erste Problem impliziert zudem weitere Probleme. Wenn z.B. die 'Exaktheit' einer Theorie in so unterschiedlicher Weise verstanden oder interpretiert werden kann, daß man in einer konkreten Vergleichssituation beliebig viele verschiedene Beurteilungen erzielen könnte, dann kommt die Frage auf, in welchem Sinne hier von *den* Kriterien gesprochen werden kann. Wo befindet sich dann die Exaktheit einer Theorie als Kriterium? Auf dieses Problem antwortet Kuhn, indem er die Entscheidung, oder die Wahl zwischen den Konkurrenztheorien, nicht einem individuellen Wissenschaftler sondern der wissenschaftlichen Gemeinschaft zuschreibt. Folgende Worte in *Postscript* sind diesbezüglich zu beachten:

If two men disagree, for example, about the relative fruitfulness of their theories, or if they agree about that but disagree about the relative importance of fruitfulness and, say, scope in reaching a choice, neither can be convicted a mistake. [...] There is no neutral algorithm for theory choice, no systematic decision procedure which, properly applied, must lead each individual in the group to the same decision. In this sense it is the community of specialists rather than its individual members that make the effective decision. (SSR, 199f.)

Wie in diesem Zitat zu sehen ist, trifft bei Kuhn nicht der Wissenschaftler als Individuum, sondern die Gemeinschaft der Wissenschaftler die Entscheidung bezüglich der Theoriwahl. In diesem Sinne betrachtet ist die Natur, und zwar die Struktur und der innere Mechanismus bzw. des Entstehens- und Abgangsmechanismus, der wissenschaftlichen Gemeinschaft ein

sehr wichtiges Thema in der Wissenschaftstheorie, für dessen nähere Analyse ich jedoch in vorliegender Arbeit keinen passenden Platz finde und dies deshalb für eine andere Arbeit vorsehe. Als eine Anmerkung füge ich dennoch hinzu, daß die Relation zwischen dem Paradigma und der wissenschaftlichen Gemeinschaft als ein wichtiger Punkt zu klären ist. Im folgenden Satz wird diese Relation als 1-zu-1 Korrespondenz dargestellt:

A paradigm is what the members of a scientific community share, and, conversely, a scientific community consists of men who share a paradigm. (176)

In den folgenden Zeilen wird eine wissenschaftliche Gemeinschaft dargestellt, als ob sie den Paradigmawechsel überlebend besteht.

We have already observed that a group of this sort must see a paradigm *change* as progress. [...] The scientific community of a supremely efficient instrument for maximizing the number and precision of the problem solved *through paradigm change*. (169, Hervorhebung von I.Ko)

Eine mögliche Lösung für das Problem wäre, zwischen dem Begriff der wissenschaftlichen Gemeinschaft als Träger eines Paradigmas (der Fall für 1-zu-1 Korrelation) und der Gemeinschaft als der Gesamtheit der Wissenschaftler auf einem speziellen Fachgebiet (Paradigmawechsel überlebende Gemeinschaft) zu unterscheiden.

Ich möchte hier zurück zum Thema Fortschritt kommen, und zwar zu dem Problem der Revolution, die nach Kuhn von Verlusten begleitet wird, und dem Fortschritt. Erstens wäre in dieser Lage zu berücksichtigen, daß eine Revolution gewiß destruktiv, jedoch *nicht* unbedingt *vernichtend* wirkt. Nach dem Angriff der neuen Theorie bleibt ein immer noch beachtbarer Teil des alten Gebäudes. Wo es wirklich total zertrümmert ist, sieht man auch noch hier und da die alten Ziegelsteine, vielleicht bis es dort neu aufgebaut wird. Es ist wichtig, daß es in einer wissenschaftlichen Revolution nicht um das *Abschaffen des alten Paradigmas durch die Falsifikation* geht, wobei eine Falsifikation heiße, „daß die entsprechende Theorie in der wissenschaftlichen Praxis wegen ihrer erwiesenen empirischen Falschheit nicht mehr verwendet wird“²¹⁴. Das alte wird weder falsifiziert, noch irgendwie anders allein wegen seines eigenen Mangels abgeschafft, sondern nur durch einen Vergleich substituiert²¹⁵. Im Kuhnschen Sinne ist eine wissenschaftliche Revolution ‘konstruktiv-

²¹⁴ Hoyningen-Huene (1989), 231.

²¹⁵ Eine wichtige Zielscheibe für die Kuhnsche Kritik ist der Poppersche Falsifikationismus. Siehe auch Hoyningen (1996), Draft S.12.

destruktiv'²¹⁶. Sie ist nämlich weder rein kumulative Konstruktion auf dem alten Fundament noch bloße Vernichtung von dem alten. Sie müsse hingegen 'sowohl .. als auch' sein.

Für das konstruktive Moment der Revolution steht die Intention der wissenschaftlichen Gemeinschaft, die Problemlösefähigkeit zu sichern, und darüber hinaus den Zuwachs dieser Fähigkeit anzustreben. Eine wissenschaftliche Gemeinschaft entscheidet sich für die neue Theorie aufgrund von wissenschaftlichen Werten und zwar insbesondere wegen der Argumente, die für die größere Problemlösefähigkeit der neuen Theorie sprechen. Die neue Theorie muß zum großen Teil die Leistung der alten Theorie wiederholen können, und noch zusätzlich mit den Anomalien fertig werden, die die alte Theorie in die Krise geführt haben.²¹⁷ Die eine wissenschaftliche Revolution begleitenden Verluste werden auf der destruktiven Seite einer solchen Revolution verbucht. Zu diesem Verlust gehören der Verlust an Erklärungskraft für bestimmte anerkannte Phänomene, der Verlust von wissenschaftlichen Problemen an sich, oder die Verengung des Forschungsgebietes.²¹⁸

Kuhn unterscheidet betont zwischen der Zunahme der Problemlösefähigkeit und dem Schritt in die Wahrheitsnähe.²¹⁹ Das erstere könnte als eine notwendige Bedingung für das Zweite betrachtet werden, jedoch nicht als hinreichende Bedingung. Kuhn erkennt die Zunahme der Problemlösefähigkeit, schließt aber den Begriff der Wahrheitsnähe aus. Die Idee der Wahrheitsnähe sei bei Kuhn nicht nur unnötig, sondern sogar, wenn man seine spätere Arbeiten berücksichtigt, unhaltbar²²⁰.

Zum Abschluß dieser Debatte soll die Aufmerksamkeit in diesem Kapitel einem bereits einigermaßen diskutierten Punkt gelten. Wie wird bei Kuhn die Wertung von Gesamtnote „Plus“ für eine wissenschaftliche Revolution vorgelegt, auf welcher Basis errechnet er die Bilanz 'konstruktiv (Fortschritt) + destruktiv (Rückschritt) = Fortschritt'? Die Kuhn-sche Antwort auf dieses Problem lautet: die augenscheinlichen Minus-Punkte, die Kuhn-Verluste, zählen nicht als Minus; die Verluste werden nicht als Rückschritt anerkannt. Was er im folgenden Zitat bezüglich dieses Problems schreibt, ist sehr beachtenswert.

Why should progress also be the apparently universal concomitant of scientific revolutions? Once again, there is much to be learned by asking what else the result of a revolution could be. Revolutions close with a total victory for one of the two opposing camps. Will that group ever say that the result of its victory has been something less than progress? (166)

²¹⁶ Siehe Hoyningen-Huene (1989), Kap. 5 und 7, insbes. 7.6. über den 'Fortschritt durch Revolution'.

²¹⁷ Hoyningen-Huene (1989), 251.

²¹⁸ *Op.cit.*, 252f.

²¹⁹ Siehe Hoyningen-Huene (1989).

²²⁰ Hoyningen-Huene (1989), 254.

Er scheint zu meinen, daß es unsinnig und auch unzulässig wäre, wenn das Ergebnis einer Revolution, d.h. eines glorreichen Sieges, ein Rückschritt sein sollte. Wenn man seine Logik in diesem Punkt verstehen will, muß man darauf aufpassen, daß er in diesem Kontext nicht einen dritten Standpunkt, sondern nur den Standpunkt der die Revolution durchführenden wissenschaftlichen Gemeinschaft ins Auge faßt. Ein 'dritter' Standpunkt macht für ihn keinen Sinn. Man merkt dann vielleicht, daß hierin anscheinend ein zirkelhafter Gedanke enthalten ist. Wenn man sich das Folgende fragt: Ist eine Theorie, die Fortschritt bringt, deswegen ein Sieg der Revolution, oder bedeutet eine Revolution gleich Fortschritt. Anders formuliert: Ist die Revolution erfolgreich weil die Theorie dadurch Fortschritte macht, oder ist da ein Fortschritt in der Wissenschaft, weil eine Revolution erfolgreich durchgeführt wurde?

We must learn to recognize as causes what have ordinarily been taken to be effects. ... Does a field make progress because it is a science, or is it a science because it make progress? (162)

Aus dieser Problemsituation soll es sich ergeben, so interpretiere ich Kuhn, daß der 'wissenschaftliche Fortschritt' sich als eigentlich redundanter Begriff erübrigt. Ein Rückschritt *geschieht* nur aus der Perspektive der ausscheidenden alten Theorie oder möglicherweise unter einem späteren Gesichtspunkt, vielleicht dem einer noch weiter entwickelten Theorie. Aber der Standpunkt solcher noch weiter entwickelten Theorie ist ein dritter Standpunkt, der eben im Kontext der Fortschrittsentscheidung als irrelevant ausgeschlossen wird (s.o.).

Ich möchte ihn folgenderweise deuten: Wir müssen erkennen, daß es nicht die zutreffende Schilderung der Sachlage ist, eine Theorie gehe als Sieger aus einer Revolution hervor, weil sie die bessere Theorie sei, und es sei ein Fortschritt, weil die bessere Theorie den Status der Normalwissenschaft übernimmt. In der Tat müssen wir anders argumentieren, daß die neue Theorie die bessere Theorie *ist*, weil sie als Sieger hervorgeht. Diese Revolution kann nichts anderes als einen Fortschritt bedeuten, und zwar für *die* wissenschaftliche Gemeinschaft, die durch die Revolution in eine neue Ordnung gekommen ist. Die schon zitierte Bemerkung von Kuhn über den Fortschritt in der Wissenschaft, „Viewed from within any single community, however, whether of scientists or non-scientists, the result of the successful creative work *is* progress. How could it possibly be anything else?“, gilt meines Erachtens nicht nur innerhalb einer Normalwissenschaft sondern auch über eine wissenschaftliche Revolution hinaus.

Kuhn sieht offensichtlich keinen vernünftigen Grund zur Annahme eines dritten und objektiven Gesichtspunktes in der Wissenschaftsgeschichte, was ein objektives Urteil aussprechen würde, welche Theorie wirklich die bessere Theorie sei, oder ob eine bestimmte

Revolution wirklich einen Fortschritt in der Wissenschaft bedeute. Das mächtigste, und deswegen entscheidende Urteil werde immer von der *aktuellen* wissenschaftlichen Gemeinschaft ausgesprochen. Dieses Urteil, oder die Gesamtbewertung, über den Schritt in die neue (revolutionäre) Theorie kann nichts anderes als ein Fortschritt sein. *Wie könnte es anders sein?*

Oben wurde der Begriff des Fortschrittes im Kontext der Kuhnschen Paradimentheorie in zweierlei Zusammenhang betrachtet, und zwar in dem *einer* Normalwissenschaft und dem der wissenschaftlichen Revolution. Jetzt sollen diese beiden Zusammenhänge in einem Begriff vereinbart werden. Anders formuliert: Wie kann die Gesamtbewertung 'Fortschritt' über die abgeschlossene Revolution²²¹ einmal gerechtfertigt werden, insbesondere wenn man die Verluste durch die Revolution ins Auge faßt?

Ich glaube, die Problemlösefähigkeit ist hier konsequent in der Frage des Fortschrittes als Leitfaden im Auge zu behalten. Wie sieht der Zuwachs der Problemlösefähigkeit durch eine Revolution aus? Ich möchte hier zunächst auf den Punkt hinweisen, daß die Probleme in einem Wissenschaftsgebiet unterschiedliches Gewicht haben. Es gibt zentrale, wichtige Probleme, und weniger wichtige Probleme. Die Verluste durch eine Revolution, das Wegfallen von den gelösten bzw. lösbaren Problemen, können als Wegfallen von den wesentlich weniger wichtigen Problemen angesehen. Werden sie können in manchen Fällen auch sogar als Befreiung von Scheinproblemen oder von Scheinerklärungen aufgefaßt werden.²²² In diesem Begriff des unterschiedlichen Gewichts ist auch das Element des unterschiedlichen Grades von Aktualität oder von dringlichem Interesse enthalten.

Mit der Entwicklung eines Wissenschaftsgebietes kommt es immer wieder zur Verschiebung des dringlich aktuellen Interesses. Nochmals zu beachten ist, daß mit dem Auftreten eines Paradigmas nicht alle im Rahmen dieses Paradigmas zu lösenden bzw. zu erklärenden Probleme auf einmal gegeben werden, sondern es ist ein primitiver Anfang, auf den dann die Kumulation gelöster Problemen folgt. Es erscheint durchaus natürlich, daß das aktuellste Interesse der Forschungen immer weiter verschoben wird. Die Stärke einer Theorie in einem sehr aktuellen Problem wirkt auf den Wissenschaftler in der Forschungsarbeit viel imponierender als die Kompetenz in einem vergangenen Forschungsthema.

In diesem Sinne möchte ich folgendermaßen argumentieren: In einer Revolution würde der Zuwachs in der Problemlösefähigkeit nicht *netto* gerechnet, sondern hauptsächlich die noch hinzugewonnene Fähigkeit würde konzentriert beleuchtet. Die Rücksichtnah-

²²¹ Wir erinnern uns, daß der Fortschritt im Sinne von Zuwachs der Problemlösefähigkeit innerhalb eines Paradigmas unumstritten vorkam.

²²² Siehe Hoyningen-Huene (1989), Abs.7.6.

me auf den Verlust wirkt in diesem Fall abgeschwächt, wodurch das Urteil über den Zuwachs in der Problemlösefähigkeit eigentlich nicht problematisch erscheint.

Die bisherige Diskussion über die Kuhnsche Position weist abgeschwächt dennoch wieder auf seine Bemerkung über den 'wissenschaftlichen Fortschritt als redundanter Begriff' hin. Es ist in dem Sinne, daß jedesmal das Urteil von der wissenschaftlichen Gemeinschaft ausgesprochen werde, und sie ihren eigenen Schritt in die revolutionäre Theorie als nichts anders als einen Fortschritt bezeichnen kann. Aber uns bleibt die Frage, ob und was für ein über diese Redundanz hinausgehender Fortschrittsbegriff bei Kuhn konstruiert werden könnte.

Zu beachten ist die Spannung zwischen der Redundanz des Fortschrittsbegriff und der Kuhnschen Neigung? zu einem nicht leeren Fortschrittsbegriff für die Wissenschaft, die in den nächsten Zeilen zu erkennen ist:

It can, however, only clarify, not solve, our present difficulty to recognize that we tend to see as science any field in which progress is marked. There remains the problem of understanding why progress should be so noteworthy a characteristic of an enterprise conducted with the techniques and goals this essay has described. (SSR, 162)

Für Kuhn ist der wissenschaftliche Fortschritt wohl nicht nur etwas per Definition gegebenes, und zwar im Sinne von „was der Sieger geschaffen hat, gesehen aus der Siegerperspektive“. Über diesen zu reden ist nicht nur auf dem jeweiligen Standpunkt der wissenschaftlichen Gemeinschaft beschränkt, sondern auch ohne dessen Einschränkung. Im nächsten Abschnitt betrachten wir diese Möglichkeit.

In seinem bekannten Buch *The Idea of History* (1946)²²³ behandelt Collingwood das Problem des Fortschrittes. Zwischen seiner Behandlung und der eben bei uns geschilderten Problemsituation bei Kuhn ist eine enge und aufschlußreiche Parallelität zu betrachten, die ich hier darstellen möchte. Er unterscheidet zwischen dem Fortschritt in der Natur und dem in der Geschichte. Fortschritt in der Natur ist in der Evolution in den Naturprozessen zu beobachten. „Evolution“ ist, so schreibt er, „a term applied to natural processes in so far as these are conceived as *bringing into existence new specific forms* into nature“ (321, Hervorhebung von I.Ko). Über die Frage, ob dieser Evolutionsbegriff einen wohl definierten Begriff von 'Verbesserung' oder 'Bessersein' enthält, ist er skeptischer Ansicht.

In dem historischen Fortschritt tritt das Element von Verbesserung neben dem Neuheitselement als noch wichtigerer Bestandteil auf. Zum Beispiel:

²²³ Collingwood (1963).

Suppose, for example, a man or a community had lived on fish, and, the fish-supply failing, had sought food in a new way, by digging for roots. (Collingwood (1963), 324f.)

Dies bezeichne noch keinen Fortschritt, meint Collingwood, solange die im Beispiel aufgetretene Transition in der 'food-supplying' Methode noch keine klare Verbesserung aufzeigt. Währenddessen, „if a community of fish-eaters had *changed* their method of catching fish from a less to a more efficient one, by which an average fisherman could catch ten fish on an average day instead of five“ dann bedeutet das einen Fortschritt. Hier kommt die Frage auf: Unter welchem Gesichtspunkt wird es eine Verbesserung? Das Problem der *Perspektive* wird im nächsten Beispiel mit Fischergenerationen anschaulich:

[T]he older generation [is] still practising the old method while the younger has adopted the new. In such a case the older generation will see no need for the *change*, knowing as it does that life can be lived on the old method. And it will also think that the old method is better than the new; not out of irrational prejudice, but because the way of life which it knows and values is built round the old method. [...] To [a man of the older generation], therefore, the *change* is no progress, but a decadence. (*op.cit.*, 325)

Dieses Problem scheint mir entweder nicht oder nur in einer trivialen Weise lösbar zu sein. Wenn man aufgrund der gerade zitierten Problemsituation Collingwood und Kuhn vergleichend fragt, welche Schlußfolgerungen sie aus ihr ziehen würden, dann hätte der eine gesagt, „Also das Problem ist unlösbar.“, und der andere, „Also es ist ein Fortschritt (aus der Siegerperspektive).“ Offensichtlich ist, daß diese beiden Schlußfolgerungen sich bis auf diesen Punkt sehr nahe sind: Der eine nennt einen dritten, objektiven Standpunkt für das Ideal, zum Beispiel für einen Historiker, obwohl er zugleich ausdrücklich macht, daß es einen solchen in Wirklichkeit nicht gebe, während der andere einen solchen Objektivitätsbegriff für nicht sinnvoll hält und deswegen nicht verfolgt.

Um Collingwood gerechter zu werden, müßte ich hier folgende Bemerkung hinzufügen. Er bleibt in der geschilderten Problemlage nicht allen möglichen Fortschrittstypen gegenüber pessimistisch, sondern er möchte vielmehr auf möglichst vielen Feldern den „Fortschritt“ retten. Zum Beispiel ist für ihn über den Fortschritt in der Kunst oder Moral nicht zu reden, aber dies sei über Fortschritt in der Religion oder Philosophie möglich. Über diese Möglichkeiten zu diskutieren ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, einen Punkt möchte ich jedoch kurz erwähnen: daß Collingwood auch Fortschritt in der Wissenschaft für möglich hält. Interessant ist hierbei zu beobachten, daß er im Jahre 1946 schon die Problemlösefähigkeit in den Zusammenhang der Fortschrittsfrage einbezieht.

There is only one genuine meaning for this question. If thought in its first phase, after solving the initial problems of that phase, is then, through solving these, brought up against others which defeat it; and if the second solves these further problems without losing its hold on the solution of the first, so that there is gain without any corresponding loss, then there is progress. (329)

Oder in anderer Formulierung:

Progress in science would consist in the supersession of one theory by another which served both to explain all that the first theory explained, and also to explain types or classes of events or 'phenomena' which the first ought to have explained but could not. (332)

Mit diesen Bemerkungen scheint Collingwood jedoch zu der problematischen Lage zurückzukehren, in der die Frage, „wenn die neue Theorie nicht all die Problemlösefähigkeit sondern nur einen Teil davon wiedergeben könnte?“ beantwortet werden muß. Wenn man nicht unbedingt den sogenannten Kuhn-Verlust berücksichtigt, scheint die Collingwoodsche Bedingung, 'neue, über den alten Umfang hinausgehende Problemlösefähigkeit zu erwerben, ohne bereits vorhandene Problemlösefähigkeit zu verlieren', zu streng zu sein, so daß man aufgrunddessen kein gutes Beispiel für einen Fortschritt aus der Wissenschaftshistoriographie formulieren könnte. Mir scheint daß sich in diesem Sinne die beiden, Kuhn und Collingwood, bezüglich des Fortschrittsproblems in einem gewissen Spannungsfeld zu befinden. Die beiden tun sich schwer, das intrinsische Perspektivitätsproblem aufhebend den Begriff eines objektiven Fortschritts aufzustellen, dennoch wollen sie für die Wissenschaft einem nicht nur perspektivenabhängigen Fortschrittsbegriff Platz bieten. Wie soll das ermöglicht werden? Weder in *SSR* noch in *The Idea of History* könnte man eine zufriedenstellende Antwort auf diese Frage finden, was für ein in sich geschlossener Begriff des wissenschaftlichen Fortschrittes aufzustellen ist. Ich versuche im nächsten Abschnitt aus *SSR* von Kuhn eine weitere Möglichkeit herauszuholen.

5.1.1.3. Wissenschaftlicher Fortschritt als evolutionärer Entwicklungsprozeß

Wie wir schon betrachteten, macht Kuhn deutlich, daß im Thema des Wissenschaftsfortschritts für die Begriffe von „Wahrheitsnähe“ oder „Verisimilitude“ kein Platz ist. Die Ideen von Wahrheitsnähe oder Verisimilitude sind bei ihm nicht nur etwas Vermeidbares, sondern sogar inakzeptabel. Statt jener beschreibt er den wissenschaftlichen Fortschritt auf globaler Ebene²²⁴ mittels des Begriffs der Evolution. Er beruft sich auf den Darwinschen Evoluti-

²²⁴ Siehe noch Abs. 5.1.3. dazu, und zwar, für den Zusammenhang von Zuwachs der Problemlösefähigkeit und der Evolution in seinem Fortschrittsbegriff.

onsbegriff. Der Darwinsche Evolutionsbegriff beinhaltet, anders als in der traditionellen Evolutionstheorie vor ihm, wie z.B. bei Lamarck, Chambers oder Spencer, keinen Telosbegriff. Es ist Evolution, so formuliert Kuhn, die einen primitiven Beginn hat, in einem primitiven Zustand beginnt, die jedoch kein Ziel zu erreichen hat.²²⁵ Evolution heißt hier keine Verwirklichung einer geplanten Form, von *causa finalis*, obwohl dies für manche Ohren auch widersprüchlich klingen mag. Kuhn schreibt:

Instead, natural selection, operating in the given environment and with the actual organisms presently at hand, was responsible for the gradual but steady emergence of *more elaborate, further articulated, and vastly more specialized* organisms. (SSR 172, Hervorhebungen von I.Ko)

Analog zur biologischen Evolution könnte man diesem Kontext entnehmen, was Kuhn mit der evolutionären Entwicklung in den Wissenschaften vor Augen hat; kompliziertere, weiter artikulierte und spezialisiertere Theorien beziehungsweise Wissenschaftsgebiete. Er macht diese Analogie nochmals ausdrücklich im Folgenden:

The net result of a sequence of such revolutionary selections, separated by periods of normal research, is the wonderfully adapted set of instruments we call modern scientific knowledge. Successive stages in that developmental process are marked by an *increase in articulation and specialization*. (Ebd., Hervorhebung von I.Ko)

Damit hätte Kuhn in *SSR* sein Bild des Wissenschaftsfortschritts vollendet. Man kann weiter fragen, warum dann eigentlich die Evolution in der Wissenschaft erfolgreich stattfindet, und nicht versagt; warum kann die *scientific community* wieder und wieder einen neuen Konsens erreichen, nachdem sie den einen verlassen hat. Diese Frage bleibt jedoch bei Kuhn in *SSR* unbeantwortet, wie er es selbst explizit sagt.²²⁶ Die Diskussion über die *'community structure'* der Wissenschaften ist gerade mit *SSR* nicht abgeschlossen sondern nur zum Start freigegeben worden²²⁷, und man findet verschiedene aktive Fortsetzungen einer solchen Diskussion in (wissenschafts-) soziologischen und wissenschaftshistoriographischen Forschungen nach *SSR*, was als ein unübersehbarer Einfluß, beziehungsweise Beitrag, der Kuhnschen Wissenschaftsphilosophie auf die Wissenschaftstheorie anzusehen wäre.

²²⁵ „The *Origin of Species* recognized no goal set either by God or nature. [...] a process that moved steadily from primitive beginnings toward no goal.“ (SSR, 172)

²²⁶ SSR, 173.

²²⁷ Vgl. *Postscript* in *SSR*.

Vor der Frage nach dem wissenschaftlichen Fortschritt wirft Kuhn letztlich den Anker in den Begriff der Evolution der Theorie, und zwar im Sinne von 'increase in articulation and specialization'. Ist damit das Problem der Perspektivität in der Fortschrittsfrage überwunden? Zuwachs in der Artikulation scheint mir kein klares Bild zu ergeben, aber mehr Spezialisierung tritt anschaulicher auf. Spezialisierung höheren Grades gibt es zum Beispiel in der feiner und detaillierter getriebenen Verzweigung und Unterverzweigung von (Spezial-)Gebieten in der Wissenschaft. Dies ist auch in der Geschichte der Wissenschaft und der Bildungs- bzw. akademischen Institution gut beobachtbar. Trotz des Zugrundegehens beziehungsweise Absterbens mancher Spezialgebiete ist die Diversität unleugbar auf immer höheres Niveau gekommen. Zum ersten Kriterium (0) für den Fortschritt zurückkommend frage ich mich: In welchem Sinne ist 'more specialization', also höheres Niveau Diversität, *besser* als 'less specialization' oder ein niedrigeres Niveau von Diversität? Eine mögliche Antwort auf diese Frage findet man bei Feyerabend, wie wir in nächsten Abschnitt betrachten werden.

5.1.2. Fortschritt bei Feyerabend: eine Alternative?

Die These der Inkommensurabilität scheint, insbesondere wenn man sie in Verbindung zur Collingwoodschen Geschichte der zwei Fischergenerationen sieht, offenbar als ein Hindernis auf dem Wege zu einem Begriff des wissenschaftlichen Fortschrittes zu stehen. Sie tritt zumindest in der Weise wirkungsvoll auf, daß ein linearer, rein *kumulativer* Fortschritt in der Wissenschaft wissenschaftsphilosophisch als nicht fundierbar erscheinen würde, wenn die Inkommensurabilitätsthese zwischen verschiedenen 'Paradigmen' als allgemein gültig anerkannt wird, wie es bei Kuhn der Fall sein soll. Nochmals könnte diese Situation folgendermaßen geschildert werden: Wenn zwei Theorien nicht mit ein und demselben Maße zu messen sein sollten, dann wird es problematisch, zwischen diesen beiden einen Fortschritt oder Rückschritt auszusprechen, weil der Fortschritts- oder Rückschrittsbegriff eine Bewertung in sich enthält. Eine Möglichkeit wurde schon betrachtet, nämlich, daß man diese Bewertung dem einzelnen Wissenschaftler oder der Wissenschaftlergruppe überläßt. Dann löst sich das Problem des *einen* Maßes auf. In der Tat wird Wissenschaftsentwicklung meist von dem Standpunkt des Siegercamp bewertet, und der Fortschritt könnte von diesem Gesichtspunkt aus meist als problemlos angesehen werden. Aber die interessante Frage bleibt, wenn man außerhalb jenes Camps stehend eine solche Bewertung treffen möchte. Hier ist die Frage, ob und inwieweit die Bewertung sinnvoll sein würde, ausgespart.

Zu diesem Problem sollte man auch die Feyerabendsche Auffassung der Inkommensurabilität in Betracht ziehen, die in etlicher Hinsicht eine Differenz zu der Kuhnschen zeigt. Historisch wurden beide Auffassungen der Inkommensurabilität zur selben Zeit,

1962, jedoch grundsätzlich voneinander unabhängig entwickelt.²²⁸ Zwischen den beiden Auffassungen bestehen neben viel Gemeinsamkeit aber auch deutliche Unterschiede. Feyerabend selber bietet in seiner Rezension (1977) von Stegmüller (1973) einen kompakten Vergleich zwischen seinem und dem Kuhnschen Inkommensurabilitätsbegriff. Er faßt dort die Kuhnsche Version wie folgt zusammen:

Kuhn has observed that different paradigms (A) use *concepts* that cannot be brought into the usual logical relations of inclusion, exclusion, overlap; and (B) make us see things differently (research workers in different paradigms have not only different concepts, but also different *perceptions*); and, (C) contain different *methods* for setting up research and evaluating its results. (363)

Weiter sei es bei Kuhn die ‘*collaboration*’ von all diesen drei Elementen, (A), (B), und (C), die ein Paradigma gegen einen direkten Angriff von, oder direkten Vergleich mit, einem anderen Paradigma immun mache. Im Vergleich dazu soll sein Begriff oder Kriterium für die Inkommensurabilität viel einfacher aussehen.

When using the term ‘incommensurable’ I always meant deductive disjointedness, *and nothing else*. (365, Hervorhebung im Original)

Feyerabend argumentiert in der Rezension gegen die Kritik Stegmüllers, daß sein Inkommensurabilitätsbegriff auf keinen Fall Unvergleichbarkeit impliziere. Im Gegenteil soll er sich darum bemüht haben, die Vergleichsmöglichkeiten zwischen ‘inkommensurablen’ Theorien sicherzustellen. Bei ihm wird jedoch die Vergleichsmöglichkeit vom *Gehalt* (*content*) der Theorien verneint, im Sinne von *Verisimilitude*, jedoch bestehen noch verschiedene Möglichkeiten zu einem offenen Vergleich.

Wenn man Feyerabend in diesem Punkt mit Kuhn vergleicht, tritt ein Gegensatz deutlich hervor: Er hebt anders als Kuhn in seiner Paradigmentheorie über die Theoriendynamik einen starken wechselseitigen Zusammenhang zwischen inkommensurablen Theorien hervor. Während die Vergleichsmöglichkeit zwischen inkommensurablen Theorien bei Kuhn zumindest stark in Frage gestellt werden könnte²²⁹, möchte ich formulieren, erschienen Feyerabend solche Vergleichsmöglichkeiten *notwendig*.

Bei Kuhn war die Wissenschaftsgeschichte durch Paradigmenbegriff und Inkommensurabilität hauptsächlich *diachronisch* darzustellen. Währenddessen betont die Inkommensurabilität bei Feyerabend auch, und mehr als den Zusammenhang zwischen Vorgänger- und Nachfolgertheorie, eine Relation zwischen *synchron* existierenden Theorien. Dies ist eng mit seinem Pluralismus, und weiter mit der These zur *Proliferation* der Theorien verbunden.

²²⁸ Siehe Hoyningen-Huene (1989), 202.

²²⁹ Vgl. Hoyningen-Huene (1989), 212ff.

Übersichtlicher dargestellt, besteht bei Kuhn auf dem Feld einer wissenschaftlichen Disziplin prinzipiell ein einziges Paradigma, oder sonst eine Phase der außerordentlichen Wissenschaft, und zwar auf dem Wege zu einer wissenschaftlichen Revolution; während bei Feyerabend mehrere inkommensurable Theorien auf einem Gebiet nebeneinander existieren können (und auch eigentlich sollen). Um diesen Unterschied besser zu verstehen, kommen mir die zwei folgenden Punkte wichtig vor. *Erstens*, wie es auch in Feyerabends Brief an Kuhn sichtbar wurde²³⁰, ist ein Wissenschaftler in der Kuhnschen Theorie zu einem Zeitpunkt prinzipiell mit *einem* Paradigma verbunden, während bei Feyerabend eine '1-to-many' Relation nicht nur möglich, sondern auch üblich erscheint. Das Kuhnsche Paradigma gehört zu *einer* wissenschaftlichen Gemeinschaft. Eine wissenschaftliche Gemeinschaft kann nicht zugleich mehrere Paradigmen besitzen, noch können mehrere wissenschaftliche Gemeinschaften ein und dasselbe Paradigma gemeinsam haben. Kuhn schreibt in *SSR*, die Quantenmechanik sei „a paradigm for many scientific groups“, aber „it is not the same paradigm for them all“²³¹. Ein Paradigma im Kuhnschen Sinne ist mit der Totalität²³² von dem, was eine wissenschaftliche Gemeinschaft in einer normalwissenschaftlichen Phase besitzt, im Verhältnis 1-zu-1 verbunden. Bei Kuhn kann deswegen die Wissenschaftsgeschichte auf einem Wissenschaftsgebiet als eine Reihe von Substitutionsgeschichte der Paradigmen bezeichnet werden.

Währenddessen sind bei Feyerabend nicht etwa die Paradigmen, oder die Gesamtheit von Begriffen, Wahrnehmungen und Methodologie inkommensurabel, wie er in (1977) selber deutlich macht. Er bleibt in seiner Diskussion über die Inkommensurabilität auf der Ebene der *Theorie*, und hat sich in seinem Argument grundsätzlich auf die Domäne *begrifflicher* Probleme beschränkt.²³³ Eine wichtige Implikation folgt daraus. Ein Wissenschaftler ist noch flexibler gegenüber mehreren [möglichen] Theorien auf seinem Disziplinbereich.²³⁴ Dadurch wird die elementare Basis für die Möglichkeit seines Pluralismus gegeben. Mehrere, auch inkommensurable, Theorien können zugleich auf einem Gebiet bestehen.

Zweitens könnte diese Position von Feyerabend meines Erachtens am besten im Zusammenhang mit seinem Pluralismus oder Antidogmatismus verstanden werden, wie schon angedeutet. Martin (1984) beschreibt die Situation folgendermaßen:

²³⁰ Hoyningen-Huene (1995), 356.

²³¹ *SSR*, 50.

²³² Totalität von Begriffen, Wahrnehmungen, und Methodologie, u.a.

²³³ Feyerabend (1977), 364.

²³⁴ Vgl. Feyerabend in Hoyningen-Huene (1995), 355f.

Feyerabend's doctrine of incommensurability is not just a description of certain theories in the history of science. [...] [It] is part of a larger methodological program. (33)

Es ist hier zu beachten, daß Feyerabends Pluralismus nicht den Gegensatz zur Kuhnschen Einheitlichkeit in einem Paradigma darstellt. Die 'unanimity' in dem Kuhnschen Paradigma propagandiert keine Ideologie, sondern zieht Schlußfolgerungen aus den historischen Untersuchungen. Kuhn sagt in diesem Sinne, daß eine solche einheitliche Totalität da *ist*, während Feyerabend meint, Theorien *sollen* vermehrt werden.

Nicht unumstritten ist sein Begründungsargument für den Pluralismus in der Theorie, und zwar, daß eine inkommensurable Alternativtheorie zur kritischen Prüfung von einer bestehenden Theorie häufig als notwendig erscheint, und dadurch die Vermehrung solcher inkommensurablen Theorien entscheidend zur Erhöhung der Prüfbarkeit beiträgt, und folglich zum empirischen Gehalt der einzelnen Theorie. Aber dieses Problem der Begründung wird besser verstanden, wenn man ihn im Folgenden liest:

[W]e must make the decision: what do we prefer, increased empirical content of the theories we possess, or that unanimity of research and the close fitting produced by it in the periods which [Kuhn] call[s] the normal periods. History cannot help us in this decision.²³⁵

Der Pluralismus Feyerabends ist in der Tat eine Ideologie, ein -ismus im wörtlichen Sinne. Die Geschichte könne uns nicht in dem Punkt helfen, wo wir zwischen Pluralismus und einheitlicher Totalität entscheiden müßten. Aus dem Gesichtspunkt des Zieles, der „möglichst gute[n] Prüfbarkeit unserer Erkenntnis“²³⁶, ist das Prinzip des Pluralismus eine Notwendigkeit: „*Man erfinde und entwickle Theorien*²³⁷, die der gängigen Auffassung widersprechen, auch wenn diese sehr gut bestätigt und allgemein anerkannt ist.“²³⁸ Die Empfehlung zum Pluralismus ist aber auch an die Einsicht gekoppelt, daß der Pluralismus dazu beitragen wird, den Fortschritt zu bringen. Zu diesem Zusammenhang zwischen Proliferation von Theorien und dem wissenschaftlichen Fortschritt schreibt er in *Against Method* (Abkürzung: *AM*)²³⁹:

²³⁵ Brief an Thomas Kuhn, *Reprint* in: Hoyningen-Huene (1995), 356.

²³⁶ Feyerabend (1981), 128. Der Aufsatz wurde ursprünglich im Jahr 1965 geschrieben.

²³⁷ In der Fußnote zeigt Feyerabend auf die Ähnlichkeit von seinem *Theorie*begriff mit dem Kuhnschen *Paradigm*begriff hin.

²³⁸ Feyerabend (1981), 128f.

²³⁹ Feyerabend (1975).

I regard proliferation not just as an ‘external catalyst’ of progress, as Lakatos suggests in his essays, but as an essential part of it. (48)

Wenn es um den Fortschrittsbegriff bei Feyerabend geht, muß man noch das Folgende beachten: Feyerabend stellt selber keinen systematischen Fortschrittsbegriff auf. Er nimmt in *AM* an, daß wissenschaftlicher Fortschritt zumindest hier und da mit der Wissenschaftsgeschichte errungen wurde, und auch weiter noch gemacht wird. Bezüglich dieses Begriffes schreibt er zum Beispiel in folgender Weise:

Everyone can read the terms [‘progress’, ‘advance’, ‘improvement’, etc.] in his own way and in accordance with the tradition to which he belongs. Thus for an empiricist, ‘progress’ will mean transition to a theory that provides direct empirical tests for most of its basic assumptions. [...] For others, ‘progress’ may mean unification and harmony, perhaps even at the expense of empirical adequacy. (AM, 27, Hervorhebungen im Original)

Wichtig ist hier bei ihm, daß seine Empfehlung zur Proliferation inkommensurabler Theorien auf jeden Fall nützlich erscheinen würde, in welcher Tradition man diesen Begriff auch in die Hand nimmt.

Jetzt wenden wir uns zu seinem Bild des wissenschaftlichen Fortschritts. In diesem Feyerabendschen Bild ist die Vermehrung von Alternativtheorien essentiell. Aber, wozu dient diese Proliferation? Wozu soll sie gut sein? Es ist hier wichtig zu erkennen, daß sein Maß der empirische Gehalt der Theorien ist, was wiederum heißt, die Prüfbarkeit der Theorien.²⁴⁰ Oft, oder in seinem Sinne genauer gesagt, *prinzipiell* ist das Erkennen einer kritischen Anomalie nur anhand einer inkommensurablen Alternativtheorie möglich (gewesen). In diesem Sinne ist eine solche Alternativtheorie dafür *notwendig*, daß die bestehende Theorie kritisch getestet werden kann.

Theorieproliferation ist für Feyerabend ein methodologisches Programm, womit man die Erhöhung des empirischen Gehalts der Theorien erzielen kann. Zu beachten ist jedoch, daß die Vermehrung logisch betrachtet nur als notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für den Fortschritt gilt. In diesem Sinne kann man nicht die Vermehrung von inkommensurablen Theorien und wissenschaftlichem Fortschritt als identisch betrachten. Höherer Grad einer solchen Proliferation bedeutet nicht unbedingt einen Fortschritt. Aber andererseits muß man auch beachten, daß doch die Vermehrung auf jeden Fall zur Erhöhung des *Potentials* führen wird, und zwar so, daß die bestehenden Theorien kritisch geprüft und auch noch falsifiziert werden können. Dieser Punkt tritt noch deutlicher hervor, wenn man berücksichtigt, daß neue Theorien meist aufgrund der Schwächen der bestehenden Theorie

²⁴⁰ In diesem Sinne schreibt Martin (1984): „[I]t is Popperianism carried to its logical extreme.“ (33)

angeregt bzw. konzipiert werden.²⁴¹ Das Noehinzukommen einer Alternativtheorie T_1 auf einem Disziplinbereich heißt in diesem Sinne Zunahme des empirischen Gehaltes der herkömmlichen Theorie T_0 . Und wenn noch eine Theorie T_2 auf dem selben Feld entsteht, die sich im jeglichen Sinne als weitere Alternative zu den beiden Theorien T_0 und T_1 abzeichnen würde, dann wird der empirische Gehalt von entweder T_0 , oder T_1 , oder den beiden T_0 und T_1 zunehmen.²⁴² Dies ist die positive, optimistische Seite des Feyerabendischen Bildes der Maximierung des empirischen Gehaltes durch Vermehrung der Alternativen. Ich würde sagen, solange er keine anderen inhaltlichen Kriterien für Wissenschaftsfortschritt vorlegt, steht der Proliferationsgrad der zueinander inkommensurablen Theorien als das einzige sichtbare und in der Tat zu einer Bewertung anwendbare Kriterium für den Fortschritt in dem Feyerabendischen Bild der Theoriendynamik.

Er formuliert jedoch nur, daß diese Vermehrung für den Fortschritt essentiell sei, und macht nicht ausdrücklich, daß oder wie der Fortschritt dadurch in Erscheinung tritt. Eine Erklärung dafür wäre, meines Erachtens, daß der Fortschritt in den Wissenschaften bei ihm als eine natürliche Folge bzw. als *By-Product* aus diesem Proliferationsprozeß angesehen wird, und der weitere Schritt der Erhöhung des empirischen Gehaltes der Theorien zum Fortschritt nicht für sein Programm notwendig gehalten wird. Wichtig wäre ihm gewesen, daß ein Verhindern der Vermehrung auch den Fortschritt verhindern würde.

Die Vermehrung von Alternativtheorien kann, meiner Ansicht nach, in zweierlei Hinsicht Fortschritt heißen: Erstens bringt sie der *einzelnen* bestehenden Theorie den Zuwachs der Prüfbarkeit, also des empirischen Gehalts, und zweitens, bewegt sich dadurch die *Summe* des empirischen Gehalts der sich auf den Disziplinbereich beziehenden Theorien in Richtung einer Maximierung. Ich möchte mich hier auf den zweiten Aspekt konzentrieren, das heißt, auf den Fortschritt des gesamten Disziplinbereichs, der mir wissenschaftstheoretisch problematischer und interessanter erscheint. Hier findet sich ein ungeklärter Punkt in diesem Fortschrittsbild, und zwar, daß die durch das Feyerabendische methodologische Programm *induzierte* Vermehrung der Theorien auch negative Folgen für den Disziplinbereich haben kann, und zwar — in diesem Bild wird die folgende Möglichkeit nicht ausgeschlossen —, daß eine nach diesem Programm eingeführte Alternative in der Tat eine schlechte Theorie sein kann, bis auf die Tatsache, daß sie dazu beiträgt, den empirischen Gehalt einer anderen Theorie zu erhöhen, indem sie ihr z.B. einen kritischen Test ermöglicht. In diesem Fall scheint mir diese Tatsache allein nicht als Grund zu genügen, die den kritischen Test ermöglichende neue Theorie ins Feld zu führen und zu behalten. Eine Alternativtheorie soll bei

²⁴¹ Vgl. auch Post (1971).

²⁴² Ob bei Feyerabend eine solche Situation mit mehr als zwei inkommensurablen Theorien zugleich auf einem Problemgebiet möglich ist, ist nicht ausdrücklich zu sehen. Dennoch möchte ich seine These über die Theorieproliferation in dieser Weise deuten, was mir als die plausibelste erscheint.

ihm als eine Theorie auch selbständige Autorität besitzen, die nicht nur einen Test für die herkömmliche Theorie ermöglicht.

Einen aus dieser Situation führenden Schlüssel könnte man im nächsten Satz von Feyerabend finden, der auch zu einem in sich geschlossenen Verstehen über seinen Pluralismus notwendig erscheint.

[T]he methodological unit to which we must refer when discussing questions of test and empirical content is constituted by a *whole set of partly overlapping, factually adequate, but mutually inconsistent theories*. (AM, 39, Hervorhebung im Original)

Die Einheit soll nicht die einzelne Theorie sein, wenn wir über die Zunahme des empirischen Gehalts und in dem Sinne von Fortschritt sprechen, sondern die Gesamtheit der Theorien, die einander überlappen und miteinander inkommensurabel sind. Wichtig kommt mir bezüglich des letzten Problems die Bedingung vor, jede Theorie in dieser Gesamtheit soll Adäquatheit gegenüber den Fakten beweisen können. Mit dieser Bemerkung ist geklärt, daß er mit seiner Maxime, 'Vermehre die Theorien, die offensichtlich nicht mit den bewährten Theorien zusammenpassen!', keine Beliebigkeit einführen will. Feyerabend meint mit seinem Programm nicht in einem aktiven Sinne, daß man beliebige Theorien in einen Disziplinbereich einführen sollte [oder auch dürfte], die inkommensurabel zur bewährten Theorie seien, sondern vielmehr im negativen Sinne, daß auf eine Alternativtheorie *nicht aus dem Grunde* verzichtet werden darf, daß sie schlecht mit der herkömmlichen guten Theorie zusammenpaßt. Mit der Bedingung '*factual adequacy*' sagt er weiter, eine Theorie, die sich für ein gutes Stück des Gegenstandsbereichs einer gegebenen Disziplin als kompetent erweist, solle erhalten werden, obwohl sie ein Konsistenzproblem mit einer anderen bewährten Theorie zeigt.

Die *Gesamtheit* von mehreren Theorien, von denen jede empirischen Tatsachen adäquat ist, die teilweise miteinander überlappen, ist somit eine Einheit geworden, wenn wir über den Effekt der Feyerabendschen Theorieproliferation sprechen wollen, d.h., über den Zuwachs vom empirischen Gehalt der Theorie. Dies paßt auch gut zu meiner Darstellung mit T_0 , T_1 , und T_2 . Das Noehinzukommen von einer neuen Alternativtheorie T_{n+1} wird der bisherigen Einheit, der Gesamtheit von T_0 bis T_n , dazu beitragen, daß der empirische Gehalt von dieser Einheit zunimmt. Dies geschieht dadurch, daß T_{n+1} für eine bis zu mehreren von diesen früheren Theorien kritische Tests ermöglicht. Und mit T_{n+1} erreicht man eine neue Einheit.

Noch einmal gehe ich zurück zu Feyerabends methodologischer Einheit. Da sind noch einige Punkte, die unsere Aufmerksamkeit auf sich ziehen und auch geklärt werden sollen. Das erste Problem ist, wie das Überlappen zu verstehen sein soll.

„Teilweise überlappend“ läßt eine zweideutige Interpretation zu: Erstens „teilweise“ in dem Sinne, daß eine Theorie T_k vielleicht nur mit einigen der anderen Theorien in der Einheit überlappen soll, oder zweitens in dem Sinne, daß das Überlappen von T_1 und T_m nur auf einem Teil der jeweiligen Theorie stattfindet. Es ist nicht klar, was Feyerabend mit „teilweise überlappend“ meinte. Man sollte jedoch diese beiden Aspekte zugleich berücksichtigen, wenn man diese Feyerabendsche Darstellung der methodologischen Einheit in Bezug auf den Fortschrittsbegriff betrachten würde, der in diesem Kapitel vorgelegt werden soll. Zu bemerken ist: Die zweite Bedeutung von ‘*teilweise* überlappen’, daß der Enthaltenszusammenhang, der eigentlich als ein Fall für das Überlappen anzusehen ist, ausgeschlossen wird, ist im Feyerabendschen Begriff von inkommensurablen Theorien bereits enthalten. Damit ist jedoch das Überlappen längst nicht geklärt. Es ist nämlich noch nicht klar, was das Überlappen von zwei Theorien genau heißt. Hier befinden wir uns in einer ähnlichen Situation wie in der Relata-Frage für das Korrespondenzprinzip. Dennoch möchte ich hier nicht verschiedene Relata-Kandidaten für die Überlappensrelation zwischen Theorien analysieren²⁴³, obwohl eigentlich verschiedene Modi des Überlappens nach den verschiedenen Relata-Kandidaten denkbar sind. In Betrachtung ziehen möchte ich zwei Varianten des Überlappens von Theorien. Die eine ist das Überlappen des Inhalts zweier Theorien. Dies gilt, wenn ein Teil vom Inhalt eines Standardlehrbuches einer Theorie zu einem nicht trivialen Teil auch in dem Standardlehrbuch einer anderen Theorie zu finden wäre. Die zwei Theorien können zum Beispiel eine Reihe von Gleichungen gemeinsam haben. Wenn diese zwei Theorien gegeneinander konkurrieren, heißt es höchstwahrscheinlich, daß der Zwiespalt in den nicht überlappenden Teilen der jeweiligen Theorien liegt. In einem solchen Falle kann im Prinzip ein Test möglich werden, womit man entscheiden könnte, welche von denen die Richtige, oder die Bessere sein soll.

In einer anderen Variante müßte nicht unbedingt entschieden werden, welche von zwei Theorien die (einzige) richtige Theorie ist. Sie nennt das Überlappen von zwei Gegenstandsbereichen, worauf sich die Theorien jeweils als empirisch adäquat erweisen. Zu beachten wäre hier, daß diese zwei Theorien zum Beispiel keine gemeinsame mathematische Struktur haben müssen. Es wäre möglich, daß sie sogar in dem überlappenden Gegenstandsbereich, worauf eigentlich beide gültig sind, keine einzige Formel gemeinsam haben. Das Bohrsche Korrespondenzprinzip zeigt uns ein Beispiel für eine solche Möglichkeit, obwohl dort von der klassischen Elektrodynamik und Mechanik für die Bewegung des im Atom gebundenen Elektrons nur eine asymptotische und nicht die strenge Gültigkeit sichergestellt werden konnte.

²⁴³ Vgl. Abs. 2.4.

Jetzt wende ich mich kurz an die Feyerabendische Darstellung des Fortschritts an anderer Stelle. In *Wissenschaft als Kunst* (1984) unterscheidet er zwischen dem quantitativen oder additiven und dem qualitativen Fortschrittsbegriff.²⁴⁴ Oberflächlich gesehen kommt der Kunst eher ein qualitativer Fortschrittsbegriff zu, und den Wissenschaften ein quantitativer Begriff. Aber es ist keine berechtigte Zuordnung, wie man von Augustinus in seinem Text (Siehe Fußnote) hört. Feyerabend schreibt weiter:

Auch die qualitative Idee hat in der Geschichte der Wissenschaften eine wichtige Rolle gespielt, ja, man kann sagen, daß grundlegende wissenschaftliche Debatten nicht die Zahl der Voraussagen, sondern das Vorliegen oder die Abwesenheit gewisser sehr allgemeiner Eigenschaften betreffen. [...] Viele nachdenkliche Menschen sehen den Beitrag der modernen Wissenschaften zu unserer Kultur nicht in der Fülle neuer Tatsachen, sondern in den neuen Ansichten vom Weltall und der Stellung des Menschen in ihm. (90)

Zwischen dem Fortschritt in der Kunst und dem in der Wissenschaft sieht Feyerabend jedoch eine Differenz:

Die Wissenschaften unterscheiden sich ja von den Künsten und der Philosophie durch den Versuch, den qualitativen Fortschritt an den quantitativen zu binden, und zwar so, daß jene (gedanklichen) Qualitäten als besser erachtet werden, *die zu einer größeren Zahl von Voraussagen führen*. (102, Hervorhebung von I.Ko)

Wenn es den Wissenschaften solche Bindung wie im obigen Zitat gelingen sollte, dann soll ein wissenschaftlicher Fortschritt nicht mehr perspektivenrelativ sein, sondern er könne objektiv, oder in anderen Worten, „unter die Herrschaft des absoluten gebracht“ werden. Aber diese Auffassung, daß die Wissenschaft grundsätzlich anders als bei den Künsten den „absoluten“ Fortschritt nachweisen könnte, wird von Feyerabend kritisiert, wodurch letztendlich gesagt wird, daß „auch die in den Wissenschaften verborgen weiterlebende Relativität enthüllt“ (106) worden wäre. Für diese Kritik bringt er vier Punkte zum Ausdruck:

Erstens ist die in den Wissenschaften (angeblich!) vorliegende Verbindung von Qualität und Quantität selbst eine qualitative Idee und daher nicht absolut. [...]

²⁴⁴ „Der heilige Augustinus beschreibt, wie die Menschen die Künste und Wissenschaften durch neue Fähigkeiten, Stile, Tricks, Irrtümer bereichert haben und wie die Künste selbst an Zahl zunahmen. Nicht auf allgemeine Gesichtspunkte kommt es ihm an, sondern wie sich das „im einzelnen“ verändert hat. Dieser *quantitative* oder *additive* Fortschrittsbegriff liegt immer dann vor, wenn man eine Kunst oder eine Wissenschaft wegen ihrer „Erfindungen“ oder „Entdeckungen“ oder „Durchbrüche“ lobt, denn Erfindungen, Entdeckungen und Durchbrüche stellt man sich als wohldefinierte Einzeldinge vor, deren Anhäufung unsere Kenntnisse erweitert. [...] Vasari hingegen gibt uns eine *qualitative* Darstellung. Der Fortschritt, wie er ihn beschreibt, vermehrt nicht einfach die Zahl der Dinge, er ändert ihre Eigenschaften.“ (89-90, Hervorhebungen im Original)

Zweitens führt ein umfassender quantitativer Fortschritt oft zu qualitativen Problemen, die seine Folgen und selbst seine Existenz ernsthaft in Frage stellen. [...] *Drittens* führt der Übergang von einer Theorie zu der ihr nachfolgenden *gelegentlich* (aber nicht immer) zu einer grundlegenden Änderung *aller* Tatsachen, und zwar so, daß es nicht möglich ist, die Tatsachen der einen Theorie sinnvoll mit den Tatsachen der anderen zu vergleichen. [...] Die Zählung der Tatsachen setzt sich nicht von der alten Theorie in die neue hinein fort, sie beginnt von neuem, und von einem quantitativen *Fortschritt* kann also in diesem Fall keine Rede sein. [...] *Viertens* sind qualitative Auffassungen, also, in den Wissenschaften, theoretische Ideen vom quantitativen Element, also von den Tatsachen, nie eindeutig bestimmt. [...] Ich meine, *daß selbst eine der Evidenz und hochkonfirmierten Prinzipien gründlich widersprechende Theorie einer von der Evidenz und den Prinzipien unterstützten Rivalin nicht unterlegen zu sein braucht.* [...] (102-104, Hervorhebungen im Original)

Wie könnte man den Begriff des wissenschaftlichen Fortschritts bei Feyerabend am besten systematisch darstellen? Grundsätzlich sicher nicht leicht, weil er letztendlich den Fortschritt in der Wissenschaft so wie in der Kunst für eine perspektivenabhängige, oder subjektabhängige Sache hält. Dennoch bleibt eins klar, daß er trotzdem im Endeffekt die Vorstellung des wissenschaftlichen Fortschrittes nicht aufgibt, sondern darüber die These aufstellt, wie man am besten Fortschritte in der Wissenschaft katalysieren kann. Mir fehlt noch eine klare Überbrückung zwischen der Perspektivität in dem qualitativen Fortschrittsbegriff, worauf sich nach Feyerabend der quantitative Fortschritt auch reduzieren sollte, und der Empfehlung zur Proliferation inkommensurabler Theorien [um eigentlich der Erhöhung empirischen Gehalts der Theorie willen]. Aber für meine These brauche ich nur eine Seite vom Feyerabendschen Fortschrittsbegriff, nämlich die der Proliferation.

Feyerabend schreibt in dem Aufsatz „Philosophy of Science in 2001“²⁴⁵:

[T]heories cannot be justified and their excellence cannot be shown without reference to other theories. We may explain the *success* of a theory by reference to a more comprehensive theory (we may explain the success of Newton's theory by using the general theory of relativity); and we may explain our *preference* for it by comparing it with other theories. Such a comparison does not establish the intrinsic excellence of the theory we have chosen. (140, Hervorhebungen im Original)

Er argumentiert hier meines Erachtens zu Recht, daß die Erfolge einer Theorie nicht aus sich selbst *erklärt* werden können: warum diese Theorie auf dem bestimmten Phänomen-

²⁴⁵ Feyerabend (1984), verfaßt im Jahre 1974.

bzw. Problembereich erfolgreich [gewesen] ist. Aber mir scheint dies eigentlich selbstverständlich, und das Argument tritt nicht in überzeugender Weise für die Notwendigkeit der Alternativtheorien oder für die Proliferation auf. Wo und in wieweit die klassische Elektrodynamik erfolgreich ist und sein kann, konnte mit der Entstehung und Entwicklung einer mächtigen Alternativtheorie, der Quantenmechanik, einen großen Schritt weiter erklärt werden. Solche Erklärung beinhaltet aber zugleich auch eine Erklärung über die Mißerfolge von jener Theorie, wo und warum sie *nicht* erfolgreich gewesen ist und sein kann. Eine neue mächtigere Alternativtheorie zieht sozusagen die neue Grenzlinie von da, wo die alte Theorie immer noch gut funktioniert, und auch erklärt, warum es so ist.

Feyerabend will dort in folgender Weise argumentieren: Auf der Basis vermehrter Alternativtheorien nimmt die Möglichkeiten zu vergleichen zwischen Theorien zu und vielleicht entstehen so auch mehr Erklärungen für die Erfolge einzelner Theorien. Er möchte hier offensichtlich ein anderes Bild als Popper vorlegen. Er schildert selber diesen Unterschied im folgenden Satz: „Popper’s standards eliminate competitors once and for all: theories that are either not falsifiable, or falsifiable and falsified, have no place in science.“(*op.cit.*, 141) Wenn die Popperschen Kriterien streng angewandt würden, dann würde keine Theorie überleben, und als Folge würde die Wissenschaft ohne jeglichen Ersatz eliminiert, laut Feyerabends Schlußfolgerung. Eine solche Elimination der Wissenschaft ist aber nicht geschehen, und es scheint auch höchst unwahrscheinlich, daß das in absehbarer Zeit geschehe. Was ist also falsch? Muß Poppers Kriterium nur noch strenger in der Praxis der Wissenschaft in Kraft treten? Es klingt wie eine Möglichkeit, dennoch ist es eine praktisch unbrauchbare. Nicht Popper sondern die Wissenschaftler, oder bei Kuhn die wissenschaftliche Gemeinschaft, haben in den Wissenschaften das Wort. So macht die Feyerabendsche Warnung vor der ersatzlosen Elimination der Wissenschaft auch Sinn.

Trotz der falsifizierenden Momente und des inneren Konsistenzproblems werde eine Theorie toleriert. Was an dieser Theorie eigentlich gut ist, wird hauptsächlich durch die Alternativtheorie[n] gezeigt. Die *more comprehensive* Theorie im obigen Zitat bedeutet nicht, daß sie *alles*, was die bisherige Theorie gekonnt hat, *und noch mehr* kann, wobei sie eine völlig neue, aus der alten Perspektive gesehen *revolutionäre* Theorie ist, wie die Quantenmechanik gegenüber der klassischen Mechanik. Das Korrespondenzprinzip funktioniert in einem nicht-trivialen und eigentlich interessantem Falle wie im Zusammenhang der Quantentheorie nicht in der Weise, daß eine Theorie von einer anderen Theorie als eine Teilmenge oder ein Grenzfall absorbiert werden kann. Vielmehr schafft es einen Raum fürs *Nebeneinanderstehen* von zwei Theorien.

Mir kommt die Feyerabendsche These in dem folgenden Sinne nicht zufriedenstellend vor: Er versucht mit seiner These zur Theorieproliferation klar eine Basis für Anti-Dogmatismus in der Wissenschaft zu bieten, und darüber hinaus bis in den gesamten kultu-

rellen Bereich. Jedoch bietet er offensichtlich kein über die destruktive Seite hinausgehendes konstruktives Modell für wissenschaftlichen Fortschritt. Dies wäre vielleicht verständlich, wenn man berücksichtigt, daß er den Wissenschaften keinen Sonderstatus im Vergleich zu anderen kulturellen Genres erteilen möchte. Ein konstruktives Bild wäre in dem Sinne bei ihm nicht zu wünschen. Trotzdem möchte ich in den nächsten Abschnitten versuchen, über die Feyerabendischen Vorstellungen der Proliferation hinausgehend ein konstruktives Bild der Theoriendynamik zu koordinieren, wobei der wissenschaftliche Fortschritt eine systematische Bedeutung bekommen wird.

5.1.3. Zusammenfassung: Kuhn und Feyerabend über den Fortschritt

Kuhnsche und Feyerabendsche Gedanken über den wissenschaftlichen Fortschritt haben etwas Wichtiges gemeinsam. Diese Gemeinsamkeit tritt klar zutage, wenn man die im letzten Abschnitt dargestellten Vorstellungen von Kuhn und Feyerabend zum Beispiel mit einem anderen Fortschrittsbild vergleicht, in dem 'die Wahrheit' oder 'Wahrheitsnähe' unerlässlich sind. Den Unterschied zwischen solchen Fortschrittsideen und denen von Kuhn und Feyerabend möchte ich wie folgt ausdrücken: (Sie beide reden über Fortschritt in der Wissenschaft, bewußt ohne auf 'die Wahrheit' einen Bezug zu nehmen.²⁴⁶) Die Fortschrittsideen, die in einer oder anderer Weise besagen, daß wissenschaftlicher Fortschritt heiße, der Wahrheit oder in Wahrheitsnähe einen Schritt näher zu kommen, stellen den wissenschaftlichen Fortschritt als eine Art *Konvergenz* dar. Ob der Konvergenzpunkt sichtbar ist oder nicht, ist eine *notwendige* Bedingung dafür, daß von einer Reihe sukzessiver Theorien Fortschritt beobachtet wird, daß diese Reihe in gewisser Hinsicht als konvergent erscheint.

Im Vergleich dazu könnte man formulieren, daß sowohl Kuhn als auch Feyerabend den wissenschaftlichen Fortschritt in ein Bild der *Divergenz* bringen. Bei Kuhn ist dieses Bild mittels Evolutionsbegriffs ausgemalt worden. Durch die Evolution kommt immer größere Vielfalt von immer komplexeren Spezies bzw. Subspezies zustande, was in den Wissenschaften „an increasingly detailed and refined understanding of nature“ (SSR 170) heißen soll. Bei Feyerabend ist ein Divergenzbild in seinem Proliferationsbegriff zu beobachten. Ob der Fortschritt in der Wissenschaft als Konvergenz oder Divergenz dargestellt werde, ist keine Frage von 'wahr oder falsch', sondern vielmehr eine Frage, mit welchem Bild man die empirischen Daten aus der Wissenschaftsgeschichte der Einzelwissenschaften umfangreicher und adäquater erklären und die verschiedenen Aspekte der Vorgänge um das Feld

²⁴⁶ Kuhn meint in SSR: „We may, to be more precise, *have to relinquish the notion*, explicit or implicit, that *changes of paradigm* carry scientists and those who learn from them closer and closer to the truth.“ (170, Hervorhebung von I.Ko)

‘Wissenschaft’ systematischer prognostizieren könnte. Ein auffälliger Schwachpunkt vom Konvergenzbild wäre, daß letztendlich geklärt sein muß, wo und wie sich der Konvergenzpunkt, das heißt die Wahrheit, befinde, was auf jeden Fall ein aufwendiges Forschungsprojekt werden sollte. Meines Erachtens hat dieses Bild sehr schlechte Chancen, in unserem Problemkontext kompetent zu erscheinen.

Aber die Divergenzversion hat auch ein Problem in sich. Nicht jede mögliche oder vorstellbare, beliebig zusammengesetzte Reihe von sukzessiven Theorien soll und kann einen wissenschaftlichen Fortschritt repräsentieren, wenn sie auch in bestimmter Hinsicht divergent erscheinen würden. Das dahinterstehende Problem ist, daß der oben genannte Divergenzbegriff bisher bloß als eine Verneinung von Konvergenz und sonst noch gar nicht definitiv mit konkreten Bedingung dafür aufgestellt worden ist. Bei Kuhn kann als Kriterium für den Fortschritt die Zunahme der Problemlösefähigkeit angesehen werden, und zwar, sowohl die *Zahl* der gelösten Probleme als auch die zunehmende *Genauigkeit* (*precision*) einzelner Problemlösungen. Aber das Problematische bei Kuhn wäre, wenn es überhaupt wie hier problematisiert werden sollte, daß dieses Urteil über „Ist die Problemlösefähigkeit gewachsen oder nicht?“, was stets strittig wäre, von der folgenden Art ist: Wenn es einmal gefallen ist, dann wird jeglicher Einwand oder sogar kritisches Rückblicken bezüglich der gefallen Entscheidung zwecklos. Der Grund ist: Bezüglich dieser Frage ist nicht jeder Standpunkt gleichberechtigt, vom einzelnen Wissenschaftler oder interessierten Laien, sondern der Gesichtspunkt der *aktuellen Wissenschaftlertgemeinschaft* hat absoluten Vorrang. Wo liegt hier das Problem? Der ganze Urteilkontext bei Kuhn enthält, vereinfacht ausgedrückt, jeweils nur zwei Gesichtspunkte; den des früheren Paradigmas und den des späteren, anders gesagt, des aktuelleren. Kein anderer kompetenter und einschlägiger Standpunkt von einem Dritten, wie z.B. eines Wissenschaftshistorikers oder Wissenschaftstheoretikers ist in diesem Kontext als relevant vorstellbar. Dies wäre sicher eine durchaus in sich geschlossene Sichtweise von Fortschritt. Jedoch läßt sich das Gefühl nicht vermeiden, daß diese Aufzählung in mindestens einer wichtigen Hinsicht nicht zufriedenstellend scheint.

Das einmal gefallene Urteil betreffs der Zunahme der Problemlösefähigkeit kann doch, auch vom Kuhnschen Sinne nicht abweichend, in Frage gestellt werden, beziehungsweise in bestimmtem Maße widerlegt werden. Dies geschieht in der *nächsten* Generation, wo das einmal aktuelle Paradigma (T_2) durch ein neues (T_3) ersetzt wird. Daß T_2 wesentlich mehr Problemlösefähigkeit als ihre Vorgängertheorie T_1 besitze, kann jetzt vielleicht aus dem neuen Standpunkt von T_3 mehr oder weniger in Frage gestellt werden. In diesem Sinne wird das Urteil von dem jeweils einzigen autorisierten Standpunkt ausgesprochen, jedoch ist es nicht absolut. Kuhn läßt auch seinen Begriff nicht letztendlich auf dem Thema der (meßbaren) Problemlösefähigkeit ruhen, sondern er geht bis dorthin, wo er ‘developmental process’, eine mit dem ‘Fortschritt’ auf der gleichen Linie stehende, jedoch meines Erach-

tens bewußt davon differenziert ausgewählte Formulierung²⁴⁷, mit einem *evolutionären* Entwicklungsprozeß gleichsetzt. Diese Evolution, von einem primitiven Anfang kommend, sei ein Prozeß, „whose successive stages are characterized by an increasingly detailed and refined understanding of nature.“ (SSR, 170) Aus dieser Formulierung ist deutlich zu sehen, daß in dem gerade beschriebenen Bild des evolutionären Entwicklungsprozesses von Kuhn doch ein dritter Standpunkt außerhalb des jeweiligen Paradigmas angenommen worden ist. Daß heißt weiter, neben dem von ihm eigentlich als redundant bezeichneten Fortschrittsbegriff existiert auch ein Evolutionsbegriff, der, anders als bei dem letzten Fortschrittsbegriff, aus der Ebene des jeweiligen Paradigmas objektivierend aufzuheben wäre. Diesen möchte ich im unseren Kontext als Kuhnschen Fortschrittsbegriff betrachten.

Daß es zum gleichen Zeitpunkt verschiedene Standpunkte aufgrund der vielen verschiedenen Theorien gibt, kommt im Feyerabendischen Bild der Theoriendynamik nicht als problematisch vor. Solche Situation mit pluralen inkommensurablen Theorien bezeichnet auch keine Übergangsphase, aus der sich schließlich das nächste *Paradigma* ergeben soll. Bei Kuhn haben eigentlich nur die wissenschaftlichen Gemeinschaften über die Wissenschaft zu sagen, aber bei Feyerabend ist solches Privileg offenbar nicht ausgeprägt.

Bei Feyerabend besteht der Standpunkt, aus dem der wissenschaftliche Fortschritt bewertet wird, außerhalb einer bestimmten Theorie, und so ist ein dritter Standpunkt bereits gestattet. Und aus einem solchen dritten Standpunkt stellt Feyerabend offensichtlich kein weiteres Kriterium für den Fortschritt außer der Proliferation von Alternativtheorien.

5.2. Korrespondenz und Komplementarität; die komplementäre Rolle in der Theoriendynamik

Aufgrund der Diskussion über den Fortschrittsbegriff im letzten Abschnitt versuche ich hier ein weiteres Bild zum wissenschaftlichen Fortschritt vorzulegen. In diesem Bild spielen die zwei Komponenten zusammen, Korrespondenz und Komplementarität. Bevor ich dieses Bild konstruiere, möchte ich noch einmal in die Geschichte der Quantenphysik zurück blicken.

²⁴⁷ Dieser Punkt läßt sich klarer verstehen, wenn man in SSR, Chap.XIII, den Fortschrittsbegriff, den Kuhn dort eigentlich als ‘redundant’ darstellen möchte, mit dem Begriff des evolutionären Entwicklungsprozesses vergleicht, den man meiner Ansicht nach nicht als im gleichen Sinne redundant darstellen kann.

5.2.1. Rückblick auf einen Fall: Quantentheorie als Verallgemeinerung klassischer Theorie der Physik

Wie wir schon in Abs. 1.1.2. betrachteten, ist es nicht zu übersehen, daß Bohr in den 20er Jahren die neue Atomtheorie im Grunde genommen als eine Verallgemeinerung der klassischen Theorie der Physik ansehen wollte. In den folgenden Worten des Como Vortrags findet man die Bedeutung der Komplementarität zur Theoriendynamik, die sich diesmal im Zusammenhang mit einer Verallgemeinerung verstehen läßt:

In fact, here again we are not dealing with contradictory but with complementary pictures of the phenomena, which only together offer a *natural generalisation* of the classical mode of description. (Bohr (1928e), 581, Hervorhebung von I.Ko)

Bohr spricht hier über die Bilder, die zueinander in einer kontradiktorischen Relation stehen, die jedoch zusammen wirken können und eigentlich müssen, um einer Verallgemeinerung willen, oder anders formuliert, um einer Erweiterung des Wissensstandes willen. Aber damit die zwei kontradiktorischen Vorstellungen gemeinsam zur Erweiterung beitragen können, ist dort noch etwas erforderlich. Nochmals ist von einer Verallgemeinerung die Rede, aber diesmal verbunden mit dem Korrespondenzprinzip.

The aim of regarding the quantum theory as a *rational generalisation* of the classical theories led to the formulation of the so-called correspondence principle. (*op.cit.*, 584, Hervorhebung von I.Ko)

Erstens wird hier von Bohr deutlich ausgesprochen, in beiden zitierten Stellen, daß die Quantentheorie als eine natürliche²⁴⁸ und rationelle Verallgemeinerung aus der klassischen Theorie hervorgehen solle. Das Korrespondenzprinzip soll auch in diesem Geist formuliert worden sein. Interessant ist es weiter zu beobachten, daß er meinte, nur zwei komplementäre Bilder zusammen würden diese Verallgemeinerung anbieten können. Ich habe am Anfang in dieser Arbeit das Korrespondenzprinzip und die Komplementarität hauptsächlich als zwei nacheinanderfolgende Programme dargestellt, die man, wie es sich in der Physikgeschichte dieses Jahrhunderts zeigt, für die Entwicklung und auch zum Verstehen der neuen Quantenmechanik angewendet hatte. Aber wir sehen jetzt, daß diese beiden Komponenten in der Sache des 'Verallgemeinerungsprogrammes' offensichtlich zusammen spielen. Wie ist die Verallgemeinerung hier zu verstehen?

Verallgemeinerung erfolgt zum Beispiel dadurch, daß man anstelle eines begrenzten Gebietes für einen Parameter (für bestimmte x) durch einen Allquantor ersetzt, d.h. für alle

²⁴⁸ In der in deutsch publizierten Fassung wurde „*natural*“ als „sinngemäß“ übersetzt. Siehe Bohr (1928d).

x. Verallgemeinerung bezeichnet auch eine charakterisierende Fassade der Wissenschaften. Eine Wissenschaft wie Physik besagt nicht, *dieses* Elektron bewege sich um *diesen* Atomkern so und so, und *diese* Bewegung könne in einer bestimmten Formel dargestellt werden. Sondern sie versucht eine Verallgemeinerung. Sie will den Satz zum Beispiel wie folgt formulieren können, daß sich *das Elektron* um *den Atomkern* so und so bewege, und *die Elektronenbewegung* könne in einer bestimmten Formel ausgedrückt werden.

„Verallgemeinerung“ im Bohrschen Kontext läßt sich nicht in folgenderweise interpretieren, daß aus der (verallgemeinerten) späteren Theorie die spätere, weniger allgemeine Theorie deduziert werden kann. Aus der Quantenmechanik ergibt sich die klassische Elektrodynamik nicht durch eine Deduktion, natürlich auch nicht umgekehrt. So sind die beiden Theorien im Feyerabendischen Sinne inkommensurabel. Verallgemeinerung heißt in jedem Falle eine Art Erweiterung. Eine verallgemeinerte Theorie muß in einem größeren Umfang gelten als eine Theorie *vor* der Verallgemeinerung. Aber die Schwierigkeit liegt da: daß man nicht eindeutig in einem begründeten Sinne sagen kann, die Quantenmechanik habe größeren Gültigkeitsumfang als die klassische Elektrodynamik. Dieses Problem bedeutet, anders formuliert, daß die beiden schwerpunktmäßig auf weitgehend verschiedenen Gegenstandsbereichen ihre charakteristische Stärke zeigen könnten. Es gibt Gegenstandsbereiche, für die eine quantenmechanische Überlegung unerlässlich oder als überhaupt die einzige anwendbare Theorie erscheint, andererseits gibt es jedoch auch solche, wo eine rein quantenmechanische Beschreibung (zumindest noch) nicht vorzustellen oder sehr wenig praktisch ist.²⁴⁹ Als der erste Schritt zur Lösung dieser Problemsituation wäre die Tatsache zu erkennen, daß heute, viele Jahrzehnte nach der revolutionären und turbulenten Entwicklung der Quantenmechanik, die klassische Elektrodynamik und klassische Mechanik immer noch im begründeten Sinne aktuelle Theorien sind, die gelehrt und gelernt — und auch angewendet werden. Ich möchte Bohr mit seiner Verallgemeinerungsthese in folgender Weise deuten, daß er mit einer verallgemeinerten Theorie nicht gerade die rein quantentheoretische Sicht sondern eigentlich eine durch die quantentheoretischen Überlegungen ergänzte und korrigierte Theorie gemeint hätte. Noch einfacher ausgedrückt, die Verallgemeinerung finde nicht nur zum Beispiel von der klassischen Elektrodynamik zur Quantenmechanik statt, sondern auch von der klassischen Elektrodynamik zur Gesamtheit von dieser und der Quantenmechanik. Besteht dann die Gefahr, daß die Verallgemeinerung trivial wird? Nein, weil nicht jede beliebige Zusammensetzung von zwei Theorien eine (sinnvolle) Gesamtheit bilden wird. Was wird denn benötigt, wenn eine Zusammensetzung von zwei Theorien eine

²⁴⁹ Zum Beispiel für die Beschreibung der Bewegung der Billardkugel, oder für den Brückenbau. Es gibt auch Argumente dafür, daß Quantenmechanik für makroskopische Gegenstände grundsätzliche Schwierigkeiten haben soll. Dazu siehe noch Primas, in: Audretsch/ Mainzer (1990).

Erweiterung der alten Theorie werden will? Ich glaube, um der Erweiterung (der Theorie) willen müßte man vor allem über die Grenzlinien (der Theorie) diskutieren.

Holland (1996) berichtet, daß der Umfang der Domäne, in der die Quantenmechanik gültig scheint, heute noch ein ungelöstes Problem sei.

The domain of validity of quantum mechanics is an unsolved problem of contemporary physics. [...] In particular, it is not established that the things the Universe is made from actually are quantum-mechanical in character. (Holland (1996), 99)

Der zweite Satz im Zitat, der in seinem Kontext als eine Art Begründung wirken soll, scheint mir irrelevant zum Inhalt des ersten Satzes zu sein. Wenn ein in der heutigen Physik anerkanntes Thema nicht quantenmechanisch behandelt werden könnte, dann wäre dies sicher ein Problem für die [Alleinherrschaft der] Quantenmechanik. Aber wenn noch kein solcher problematischer Fall beobachtet worden wäre, bleibe die Situation für jenes 'ungelöste Problem' grundsätzlich unverändert. Nernst (1926) machte in der noch turbulenten Zeit der Entwicklung der neuen Quantentheorie über die Relation zwischen alter und neuer Theorie folgende beachtenswerte Bemerkung:

Sieht man aber näher zu, so stellt es sich immer heraus, daß das betreffende Gesetz für ein weiteres Gebiet seine Gültigkeit bewahrt hat, daß nur die Grenzen seiner Anwendbarkeit durch den Fortschritt der Wissenschaft schärfer präzisiert wurden. Man kann sogar sagen, daß seit der Entwicklung der exakten Naturwissenschaften kaum ein Gesetz von einem hervorragenden Naturwissenschaftler aufgestellt worden ist, das nicht für alle Zeiten ... innerhalb gewisser Grenzen ein brauchbares Naturgesetz geblieben wäre. (4-5)

Im ersten Augenblick scheint Nernst oben vor allem den Kontinuitätsaspekt im wissenschaftlichen Fortschritt zu betonen, und zwar im Sinne, daß das Gesetz in der alten Theorie auch im neuen Stadium seine Gültigkeit bewahre. Jedoch möchte ich dabei auch seine Bemerkung beachten, daß die Grenzen der Anwendbarkeit der alten Theorie durch die Entwicklung der neuen und fortschrittlichen Theorie schärfer präzisiert werde. Dies ist genau, meines Erachtens, was in einem fortschrittlichen Wandel in der Wissenschaft passiert.

Eine Theorie hat einen Gegenstandsbereich, in dem sie offensichtlich gut anwendbar ist. Das Ideal wäre, zum Beispiel für eine physikalische Theorie, daß sie universell gültig, oder anders ausgedrückt, allgemeingültig sein wird. Sie faßt im Grunde genommen *alle* physikalischen Phänomene als Gegenstand ins Auge, bis die Grenzlinie irgendwo sichtbar wird. Die Grenze dieses Umfanges, oder sozusagen die Anwendbarkeitsgrenze²⁵⁰ einer

²⁵⁰ Dieser Ausdruck ist 1926 von Nernst verwendet worden. Siehe Scheibe (1997).

Theorie läßt sich nur durch das Entstehen und Entwicklung einer anderen, und in bestimmter Hinsicht besseren, Theorie veranschaulichen. Zu beachten ist hierbei, daß die neue Theorie nicht die komplette Grenzlinie in allen Himmelsrichtungen abdeckt, sondern meistens nur ein Stück davon sichtbar werden läßt. Durch die Entwicklung neuer Theorien und das dadurch vorkommende Begrenzen hat die alte Theorie *nicht* einen Teil ihres Anwendbarkeitsumfangs *verloren*, sondern dadurch ist die Erkenntnis über eine früher nicht erkannte Grenzlinie der Anwendbarkeit herkömmlicher Theorie neu erworben worden. Eine Erweiterung läßt sich dann feststellen, wenn ein Stück des bisher bloß als vage Möglichkeit angesehenen Anwendbarkeitsbereichs als ein adäquater Anwendungsbereich der neuen Theorie nachgewiesen wird.

Aber auf unser Hauptbeispiel, den Zusammenhang von klassischer und quantenmechanischer Physik, zurückblickend, möchte ich hinzufügen, daß die neue Erkenntnis über die Anwendbarkeitsgrenze der alten Theorie und das Hervortreten einer über diese Grenze hinausgehenden neuen Theorie noch keine hinreichende Bedingung für eine Erweiterung bilden. Was fehlt dann noch? Der noch fehlende Punkt wäre, daß die zwei Theorien, diesseits und jenseits der Grenzlinie, eine kontinuierliche Gesamtheit bilden sollen, um eine Erweiterung (auf der Basis alter Theorie, logisch betrachtet!) sinnvoll zu machen. Über diesen Punkt möchte ich im nächsten Abschnitt weiter diskutieren.

5.2.2. Die Rolle der Korrespondenz in einem Komplementaritätszusammenhang

Im Falle der Quantenmechanik und klassischen Physik, die ich als Beispiele für eine solche Gesamtheit verwenden möchte, scheint für eine Gesamtheitsbildung notwendig, daß sie zueinander in der Relation stehen, die mit dem Korrespondenzprinzip aufgefaßt werden kann. Das Korrespondenzprinzip besagte dort, daß es zwischen den zwei Theorien, obwohl sie grundsätzlich nicht einander zusammenpassende, logisch betrachtet inkompatible Theorien sind, ein Grenzbereich bestehe, wo sie einander eine nicht triviale, approximative Annäherung zeigen, und zwar zumindest in quantitativen Aussagen. Ob durch das Korrespondenzprinzip mehr als eine solche quantitative Übereinstimmung ausgesprochen würde, ist eine andere Frage, die mich hier nicht beschäftigt. Mir erscheint wichtig, daß dieses Grenzgebiet, in dem das Korrespondenzprinzip seine Gültigkeit zeigt, in der Tat die Rolle einer Grenzlinie zwischen zwei gültigen, jedoch jeweils im beschränkten Sinne gültigen, Theorien spielt. Diese Grenzlinie ist nicht als eine Linie im mathematischen Sinne sondern vielmehr als ein Streifen mit Breite zu verstehen, was heißt, die Theorien berühren sich nicht nur sondern überlappen in der Tat zum gewissen Grade. In diesem Sinne kann man diese als das (gemeinsame) Grenzgebiet von den zwei Theorien nennen. Die Tatsache, daß sich das

Bohrsche Korrespondenzprinzip im Kontext damaliger Quantentheorie nicht nur im Limit, $n \rightarrow \infty$, sondern eigentlich auch für den Bereich mit wesentlich niedrigeren n -Werte als sinnvoll erwies, zeigt eine mögliche Form, wie solches Überlappen wirklich auftreten kann.

Aufgrund der bisherigen Diskussion könnte ich hier eine mögliche Situation in der Theoriendynamik, die ich als eine bestimmte Art wissenschaftlichen Fortschrittes auszeichnen möchte, in einem Schema der Zusammensetzung wie das Folgende charakterisieren:

Wenn zwischen einer vorhergehenden Theorie und einer ihrer Nachfolgertheorien, oder noch spezifischer formuliert, zwischen den bestimmten Teilaspekten der jeweiligen Theorie, ein Komplementaritätszusammenhang festgestellt werden kann; *und zugleich*

wenn zwischen der vorherigen und nachfolgenden Theorie ein gemeinsames Grenzgebiet besteht, auf dem eine Korrespondenzrelation zwischen beiden Theorien aufgezeigt werden kann,

dann ist dadurch eine Erweiterung in dem wissenschaftlichen Disziplinbereich festzustellen, und zwar indem man von dem Stand der vorherigen Theorie zur gerade geschilderten neuen Lage mit zwei sich komplementierenden und auch sich korrespondierenden Theorien übergeht. Dieses Schema kann weiter auf Situationen mit mehr als zwei Theorien auf einem Feld angewandt werden.

Vereinfacht ausgedrückt, bewirken in diesem Schema die Korrespondenz und die Komplementarität zusammen eine Erweiterung auf dem Gebiet. Es wäre an dieser Stelle sinnvoll, verschiedene Möglichkeiten kurz in Betrachtung zu ziehen, die durch die Kombination von Bedingungen (1) Komplementarität und (2) Korrespondenz vorkommen können. Es gibt nur vier solche Kombinationen. Erstens, sowohl die Komplementarität als auch die Korrespondenz; zweitens, Komplementarität jedoch ohne Korrespondenz; drittens, Korrespondenz jedoch ohne Komplementarität; und zuletzt, weder Komplementarität noch Korrespondenz.

Die erste Kombination, wo beide Bedingungen erfüllt werden, ist der Fall, den ich oben als eine Erweiterung des Wissensstandes auf einem Gebiet bezeichnete. Diesen möchte ich in diesem und im nächsten Abschnitt weiter als einen besonderen Typus des wissenschaftlichen Fortschritts betrachten. Zweitens ist der Fall, wenn nur die erste Bedingung, die von der Komplementarität, erfüllt wird, ohne Korrespondenzzusammenhang. Komplementarität von zwei Theorien soll heißen, daß sie nicht zugleich zur Anwendung auf den selben Aspekt desselben Problems zustande kommen können, jedoch beide für die vollständige Beschreibung, oder Erklärung, oder Lösung des Problems, auf dem bestimmten Gebiet notwendig sind. Ich habe oben schon argumentiert, daß es sich in der Komplementarität bloß um die Notwendigkeit von zwei Vorstellungen oder Theorien handelt, und nicht

um eine Garantie, daß die zwei komplementären Komponenten zusammen die Vollkommenheit umfassen.

Aber ich möchte hier hinzufügen, daß sich eine Wissenschaft in jeder Zeit darum bemüht, jeweils möglichst vollkommen zu sein. Ich meine, wenn auf einem Wissenschaftsgebiet zuletzt zwei komplementäre Theorien als aktuell zu beobachten gewesen wären, hieße das, sie teilten das ganze Gebiet in zwei Teilgebiete. Für eine solche Teilung werden verschiedene Möglichkeiten bestehen, zum Beispiel in makroskopisch und mikroskopisch, oder in einen Phänomenbereich auf niedrigerem Temperaturbereich und ein auf höherem, oder vielleicht mit niedrigerer und höherer Geschwindigkeit der in Frage kommenden Bewegung, und so weiter.

In solch einer geteilten Lage ist jeweils eine der beiden Theorien für eine Seite zuständig. Die neue Theorie könnte — und würde wahrscheinlich — immer weiter versuchen, das Territorium der alten Theorie zu übernehmen und dadurch das ganze Gebiet allein zu beherrschen. Solange es ihr jedoch nicht gelingt, stehen sich auf dem Felde zwei Theorien gegenüber. Die Hegemonie hätte sie schon in der Hand, nachdem sie gezeigt hat, wo die alte Theorie ihre Grenze hat, und von sich selbst auch, daß sie über diese Grenze hinaus gültige Aussagen bieten kann. Trotzdem ist es eine andere Frage, vielleicht im Hintergrund verborgen, ob die neue Theorie auch innerhalb dieser Grenze mindestens so gut wie die alte ist. Diese Frage wird, wenn man die Geschichte der Quantenmechanik vor Auge hält, erst später thematisiert, das heißt, erst wenn die neue Welt durch die neue Theorie einigermaßen erforscht wurde, und nachdem dadurch der neuen Theorie ein fester Sitz sichergestellt worden ist.

Als Bohr die neue Mechanik als eine Verallgemeinerung der herkömmlichen Theorie bezeichnen wollte, hatte er wohl nicht gedacht, daß die Quantentheorie, die sich ursprünglich auf die Idee vom Planckschen Wirkungsquantum und einige Jahre später auf die Einsteinsche Theorie vom Fotoelektrikeffekt stützte und in der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie ihre physikalische Verkörperung fand, sowie durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation einen neuartigen Aspekt gegenüber der klassischen Theorie zeigte, jetzt allein auf allen Punkten die Aufgaben der klassischen Theorie übernehmen würde, über die alten Grenzen hinaus in die Welt neuer Phänomene. Eine Aufgabe im solchen Sinne hatte er meines Erachtens nicht vor Augen gehabt. Mit der Verallgemeinerung scheint eine durchaus durchführbare Erweiterung gemeint zu sein, in der man mittels der neuen Theorie über die alte Grenze treten kann, wobei in Klammer stehen soll, daß das alte Land eigentlich weiter von der alten Theorie beherrscht werden dürfte. Ich möchte nochmals betonen, daß in keinem Moment der Entwicklung der Quantenmechanik die Gültigkeit der klassischen Theorie auf dem typisch *klassischen* Bereich der physikalischen Phänomene ernsthaft in Frage gestellt worden ist. Das, was Bohr durch das Korrespondenzprinzip bezüglich der

Verallgemeinerung schaffen wollte, war ein kontinuierlicher Übergang vom alten zum neuen, erweiterten Territorium der Physik.

Wenn die Korrespondenz für den kontinuierlichen Übergang zwischen zwei Teilgebieten nicht angeboten wird, können die zwei Theorien auch nicht einander komplementäre Theorien im Sinne von Bohr werden. Dabei treten zwei Probleme auf. Die erste Möglichkeit ist, wenn zwischen den Theorien keine Kontinuität mittels Korrespondenz gestattet wird, daß sie zwei verschiedene und voneinander entfernte Gegenstandsbereiche einnehmen. Aber dann können sie zusammen keine Vollständigkeit anbieten, es fehlt nämlich dort eine Theorie für das 'Dazwischen'. Möglicherweise wird diese Lücke durch eine Theorie der übernächsten Generation erfüllt und die ursprünglichen zwei Theorien werden aus dem Gesichtspunkt dieser Generation als zwei von mehreren sich ergänzenden Teiltheorien betrachtet. Dennoch erfüllen die zwei Theorien *status quo* nicht die Bedingungen für eine Komplementarität. Das andere Problem ist, daß die Grenzlinie zwischen zwei Teilgebieten nicht scharf auf eine Linie festzulegen ist, sondern eher einem breiten Band entspricht. Es ist leicht zu sagen, daß die klassische Mechanik nicht für die Beschreibung der Bewegungen mit hoher Geschwindigkeit gilt, zum Beispiel bei $v=0,9c$, jedoch kann man sehr schlecht eindeutig sagen, von welcher Geschwindigkeit an sie nicht gelte und die spezielle Relativitätstheorie notwendig sei. Ohne Korrespondenzrelation wird die Komplementarität zwischen zwei Theorien schlecht definiert, und in dem Sinne scheint mir die Korrespondenzrelation eine notwendige Bedingung für die (wohl definierte) Komplementarität zwischen zwei Theorien zu sein. Dann soll die zweite Kombination, Komplementarität ohne Korrespondenz, auch als schlecht definierbar ausgeschlossen werden.

Dieses Ausschließen scheint jedoch nicht endgültig zu sein. Zwischen der Wellentheorie und Korpuskeltheorie des Lichts kann zum Beispiel eine bestimmte Komplementarität gesehen werden, trotzdem scheint eine Korrespondenzrelation zwischen ihnen schwer konstruierbar. Es bestehen hier zwei Möglichkeiten, dieses Problem zu beantworten. Erstens ist es möglich zu sagen, „Wenn zwischen ihnen keine wohl definierte Korrespondenz besteht, dann ist die Komplementarität auch nicht wohl-definiert.“ Die andere Wahl ist zu argumentieren, daß man noch dazu kommen werde, zwischen den zwei Theorien eine Korrespondenzrelation festzustellen. In der Tat ist es auch problematisch, daß in diesen zwei 'Theorien' der Theoriebegriff lose angewendet worden ist, und die Anwendung eines allgemeinen Korrespondenzprinzips entwickelt sich hier auch entsprechend problematisch.

Drittens ist der umgekehrte Fall in Betrachtung zu ziehen, wo zwischen den Theorien eine Korrespondenzrelation festzustellen ist, aber keine Komplementarität. Diese Möglichkeit scheint nicht logisch ausgeschlossen zu sein, und ist auch in der Tat realisierbar. Was bedeutet ein solcher Fall? Wenn keine Komplementarität festzustellen ist, dann heißt das entweder, daß sich die zwei Komponenten nicht widersprechen, oder daß sie sich wi-

dersprechen, jedoch nicht zu einer Vollständigkeit ergänzen. Dieser zweite Fall bedeutet wiederum, daß sie entweder auf einem und demselben Feld sich widersprechende Theorien sind, oder sie auch zusammen noch eine sichtbare Lücke lassen, in der keine von beiden gültig ist. In beiden Fällen scheint aber, daß eine Korrespondenzrelation nicht aufzustellen ist, für welche eine gemeinsame Grenze notwendig ist. Was heißt dies weiter? Der Fall mit Sich-Widersprechen und ohne Sich-Ergänzen wird ausgeschlossen. Es heißt dann weiter, wenn 'Korrespondenz aber keine Komplementarität' Sinn machen soll, daß nur die Alternative bleibt, daß die zwei Theorien sich nicht widersprechen. Hier wurde alles nur sehr formell skizziert. Aber eigentlich wäre ein typischer Fall für diese dritte Möglichkeit, daß sich die frühere Theorie durch die Entwicklung der neuen als ein Grenzfall dieser umfassenderen Theorie erweist. Der Gegenstandsbereich, in dem die alte Theorie als adäquat vorkommt, soll in dem Gegenstandsbereich der neuen Theorie als eine Teilmenge enthalten sein. Dabei denke ich zum Beispiel an den Fall des Galileischen Fallgesetzes und der Newtonschen Mechanik mit der Gravitationstheorie, oder auch, in einem erweiterten Sinne, mit der Newtonschen und (spezial-) relativistischen Mechanik. Vielleicht ist es sofort aufgefallen, insbesondere im letzten Falle, daß ein großes Problem der Begriffsverschiebung und folglich der Inkommensurabilität im Kuhnschen Sinne auftaucht. Ich möchte mich an dieser Stelle nicht mit diesem Problem auseinandersetzen. Ich meine nur, jedes Phänomen, das mittels des Galileischen Fallgesetzes *quantitativ* analysiert werden kann, kann auch im Prinzip mindestens so gut mittels der Newtonschen Theorie analysiert werden. Die Theorie der speziellen Relativität hat kein prinzipielles Problem, sich in dem typisch klassischen Bereich der physikalischen Phänomene geltend zu machen. Vielleicht wäre die Effizienz der Kalkulation dort das einzige Problem.

Viertens und letztens kommt der Fall zur Diskussion, in dem zwischen zwei Theorien weder Korrespondenz noch Komplementarität zu sehen ist. Er ist für mich nicht interessant, deswegen wird er auch nicht weiter diskutiert.

Cassirer in seinem Buch *Zur modernen Physik* (1957) schildert die Folge aus der damaligen dynamischen Situation in der Physik wie folgt:

Die moderne Physik sieht sich in die Notwendigkeit versetzt, *verschiedene Begriffssysteme nebeneinander anzuwenden*, die sich nicht aufeinander reduzieren lassen. (318, Hervorhebung von I.Ko)

Dies gleicht meines Erachtens auch der Situation, die bei Feyerabend als Proliferation von inkommensurablen Theorien bezeichnet werden könnte, wenn man die verschiedenen Begriffssysteme als verschiedene Theorien interpretiert. Aber die Situation in der Physik, wie sie von Cassirer beschrieben wurde, hat noch einen weiteren Aspekt. Dies läßt sich schon in

den Worten erkennen, daß sich die moderne Physik „in die *Notwendigkeit* versetzt“ sehe. Die Pluralität der inkommensurablen, oder nicht aufeinander reduzierbaren Theorien bleibt nicht bloß als Mannigfaltigkeit. Die inkommensurablen Theorien sollen zusammen kommen, um die Einheit in der modernen Physik zu bilden. Die Einheit hier bedeutet jedoch kein Einerleiheit, so schreibt Cassirer weiter, sondern für sie genüge es, „daß die verschiedenen Systeme zueinander in ein bestimmtes Verhältnis gesetzt werden, daß wir von dem einen zum andern nach einer bestimmten Regel übergehen können.“ (Ebd., Hervorhebung im Original) Wie kann eigentlich solch eine Regel aussehen? Cassirer bietet gleich die Antwort darauf:

Eine solche Regel ist es, die für die Beziehung zwischen „klassischen“ und quantentheoretischen Begriffen in Niels Bohrs Komplementaritätsprinzip aufgestellt worden ist. (Ebd.)

Es ist interessant, hier bei Cassirer nochmals zu sehen, daß die Komplementarität als eine Relation zwischen klassischer und quantentheoretischer Physik und auch als die Übergangsregel auf dem ganzen Feld der Physik betrachtet wird. Durch solche Übergangsregeln solle die Einheit der gesamten physikalischen Theorie gesichert werden. Aber meiner Ansicht nach basiert die Komplementarität in erster Linie auf dem *Nebeneinandersein* von zwei inkommensurablen Systemen jedoch nicht auf dem *Übergang* von einem zum anderen. Man sollte hier nicht nur beachten, daß das Nebeneinanderstehen verschiedener Begriffssysteme nicht gleich einen problemlosen Übergang impliziert, sondern auch, und vor allem, daß es nur durch die Klärung des Übergangsproblems auch verständlich wird, wie das Nebeneinanderstehen mehrerer Theorien eigentlich aussieht.

Die Komplementarität hier, wenn sie als Übergangsmechanismus funktionieren soll, müßte noch von einem zusätzlichen Element ergänzt werden. Dieses Element soll für die Kontinuität des Übergangs zwischen den komplementären Theorien eine Basis schaffen. Und diese wird durch die Korrespondenz im Sinne des Korrespondenzprinzips geboten.

Nehmen wir einmal an, daß für die Beschreibung von Elektronen, die im Atom gebunden sind, und für die freien Elektronen jeweils die quantentheoretische Beschreibung und die klassische Elektrodynamik zusammen mit klassischer Mechanik geeignet wären. Wenn man diese zwei unterschiedlichen Zustände des Elektrons durch eine Quantenzahl bezeichnen würde, entspreche etwa einem freien Elektron die Quantenzahl ‘unendlich groß(∞)’ und einem gebundenen eine bestimmte Quantenzahl $n < \infty$. Das Korrespondenzprinzip ermöglicht in dieser Situation einen kontinuierlichen Übergang zwischen zwei physikalischen Beschreibungen, zwischen der Beschreibung für den Zustand eines endlich großen

und eines mit unendlich großer Quantenzahl n . Dieser Schritt ist genau in der ersten Formulierung des Korrespondenzprinzips beschrieben worden.

Holland (1996) faßt die Relation zwischen Quanten- und klassischer Theorie wie folgt zusammen:

Thus, according to Bohr, the quantum and classical theories are conceptually independent yet connected by a numerical consistency condition, and both are necessary for a complete account of microphenomena. (Holland, 101)²⁵¹

In dieser Zeile wird der Zusammenhang zwischen klassischer und quantenmechanischer Theorie aufgrund der beiden Aspekte von Korrespondenz und Komplementarität dargestellt, so daß die zwei begrifflich grundverschiedenen Theorien durch numerische Korrespondenz zu einer komplementären Relation kommen.

Pluralität im Sinne der Feyerabendischen Theorieproliferation beinhaltet im wesentlichen keine große Überlegung über die Einheit eines ganzen Disziplinbereichs. Solch eine Einheit ist auch nicht im Visier seines Programms als Ziel enthalten. Die Alternativtheorien sollen in erster Linie konkurrieren, wobei sie für einander kritische Prüfungen von anderen Theorien ermöglichen. Aber sie teilen nicht in der Weise friedlich das gesamte Territorium in Teiltterritorien, wo jeweils eine Theorie als die regierende Theorie stehen soll. Es ist im Prinzip möglich, daß die verschiedenen Alternativtheorien auf einem und demselben Punkt unterschiedliche und möglicherweise auch miteinander inkompatible Aussagen anbieten. Alternativtheorien sollen die Alternativen anbieten, und im Prinzip einander ersetzen können. Cassirer sah in den zwei Theorien, klassischer und quantenmechanischer Physik nicht zwei solche Alternativtheorien, sondern eigentlich zwei sich ergänzende und dadurch das gesamte Gebiet der physikalischen Phänomene abdeckende Theorien.

Zusammenfassend formuliert, impliziert die Komplementarität von zwei Theorien, daß keine von beiden auf die andere reduziert, und dadurch in die andere als ihre Teilmenge eingeschlossen werden kann.²⁵² Die Summe von zwei Teilen wird dann notwendigerweise größer als jeder Teil. Damit die zwei zusammengebrachten Teile eine Einheit formen können, müßte die Übergangsregel zwischen diesen festgelegt werden, die im Fall von Ge-

²⁵¹ Im gleichen Sinne formuliert Holland (1996) auch: „Informally, the two theories possess some common descriptive elements (such as the orbit of a mass point), but they diverge fundamentally in their conception of physical states. [...] We have two theories of motion which are both necessary to account for physical phenomena. These theories agree in their description of motion for a certain class of phenomena (this class is different from and apparently smaller than claimed by Bohr). But even for that class, they remain conceptually distinct. In short, quantum and classical mechanics are *different* physical theories with only limited numerical and conceptual overlap.“ (Holland, 109)

²⁵² Dies heißt dann auch, daß keine davon die andere im eigentlichen Sinne *ersetzen* kann.

schichte der Quantenmechanik durch das Korrespondenzprinzip angeboten wurde. Die Korrespondenz in diesem Sinne ist eine notwendige Bedingung dafür, daß zwei komplementäre Theorien zusammen dem Wissenschaftsgebiet eine Erweiterung seines Horizontes bringen.

Wie in den vorigen Abschnitten angedeutet, kann auch noch in dieser Lage eine dritte Theorie hinzukommen. Die Bedingungen dafür können in analoger Weise formuliert werden: Die dritte Theorie müßte mindestens einen wesentlich neuen²⁵³ Punkt enthalten, in dem sie empirisch adäquate Leistung bringt, was mittels der beiden herkömmlichen Theorien prinzipiell nicht möglich gewesen ist. Wenn diese Theorie in ihrer Struktur mindestens ein unignorierbares Element enthält, das sie mit den anderen zwei in bestimmten Widerspruch bringt, dann ist der Aspekt der Komplementarität gezeigt. Es müßte dann noch die Korrespondenzrelation zwischen ihr und *mindestens einer* von den zwei anderen Theorien gezeigt werden. Wenn diese Bedingung auch erfüllt wäre, dann hieße es, daß drei Theorien auf einem Feld stehen. Wenn die Situation mit drei Theorien vorliegt, dann kann diese im Prinzip in eine mit vier, und fünf, und so weiter, erweitert werden.

5.3. Zwischen dem Trivialen und dem Dogmatischen — ein Versuch, den wissenschaftlichen Fortschritt zu evaluieren

Zuletzt sollte ich meiner These einige Bemerkungen anfügen, damit sie als eine wissenschaftsphilosophische These für Theoriendynamik gegenüber den Tatsachen aus der Wissenschaftsgeschichte gerechter wird. Um der Einfachheit willen kehren wir zurück zur Situation mit zwei Theorien. Wenn einmal die Frontlinie zwischen der alten und neuen Theorie gebildet wird und diese, so wie die These besagt, als zwei komplementäre Theorien auf dem Feld stehen, dann heißt das *nicht* gerade, daß diese Grenzlinie für immer da liege, wo sie einmal festgelegt worden ist. Noch üblicher und durchaus natürlicher wäre der Vorgang, daß man versuchen wird, den Anwendbarkeitsumfang der neuen Theorie zu erweitern, und möglichst mit ihr allein den ganzen Gegenstandsbereich abzudecken. Sie versucht in den Bereichen, wo die alte Theorie eigentlich ausgezeichnete Leistung gebracht hat, und sie im Vergleich dazu noch nicht selbständig entsprechende Erfolge zeigt, eigene Erfolge zu erlangen. Hier und da gelingt ihr dies, und dadurch könnte die Grenzlinie korrigiert werden.

Durch diesen Vorgang wird eventuell das ursprünglich der alten Theorie eigene Teilterritorium mit der weiteren Entwicklung der neuen immer kleiner, das der Neuen im-

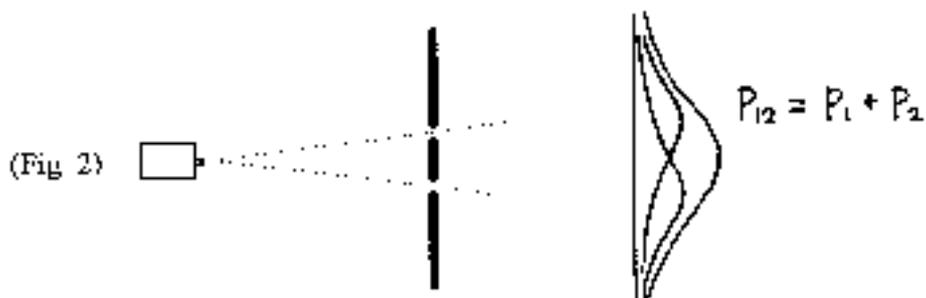
²⁵³ Neu in Bezug auf die zwei herkömmlichen Theorien.

mer größer.²⁵⁴ Primas (1983) vergleicht die Quantenmechanik zur Pionierzeit, mit der er den Zeitraum zwischen etwa 1925 und 1935 meint, und die moderne Quantenmechanik u.a. in der Weise, daß der Anwendungsbereich der ersteren eigentlich nur der Bereich von mikroskopischen Systemen gewesen sei, während die moderne Quantenmechanik über diese Grenze hinaus eine universelle Gültigkeit in Anspruch nehme. In Frage zu stellen wäre, was Universalität hier heißen mag. Dieser Vergleich von Primas der Quantenmechanik in ihrer Entstehungsphase und in den 80er Jahren läßt sich in seiner Formulierung in Primas (1990) besser verstehen. „Die Quantenphysik entstand aus experimentellen Untersuchungen an atomaren und kleinen molekularen Systemen und wurde im Laufe der Zeit auf das elektromagnetische Feld, große molekulare Systeme und Festkörper *ausgedehnt* und ist heute eine umfassende Theorie der materiellen Realität.“ (228, Hervorhebung von I.Ko) Er präzisiert weiter, was er mit der ‘Umfassendheit’ der heutigen Quantentheorie meint: „Jedenfalls gibt es kein einziges sorgfältig ausgeführtes und theoretisch gründlich analysiertes Phänomen aus dem atomaren, molekularen, mesophysikalischen oder makrophysikalischen Bereich, für welches nicht perfekte Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment besteht.“ (Ebd.) Interessant ist zugleich zu sehen, daß er in Primas (1983) in 10 Punkten aporistische Probleme in der molekularen Quantenchemie darstellt, darunter auch die folgenden Probleme: „Does quantum mechanics apply to large molecular systems?“, „Why are macroscopic bodies localized?“, und „Why does quantum mechanics fail to account for chemical systematics?“. Die Anwendbarkeit der Quantenmechanik auf die großen Molekularsysteme sei noch fraglich, und auf jeden Fall begrenzt, obwohl er hier auch betont, daß noch nirgendwo empirische Beweise für die *Ungültigkeit* der Quantenmechanik gefunden seien. Von Einstein wurde die Frage gestellt, wie die andauernde Lokalität der makroskopischen Dinge, wie einer Billardkugel, quantentheoretisch zu erklären wäre. Und dieses Problem bleibt grundsätzlich noch ungelöst. Ebenfalls noch ungeklärt ist die dritte Frage. Die Quantenchemie, erfolgreich in Anwendung auf individuelle kleine Moleküle, kann nicht die *Klassen* von strukturell verschiedenen jedoch funktionell verwandten Molekülen erklären, die in der Chemie häufig zu beobachten sind.

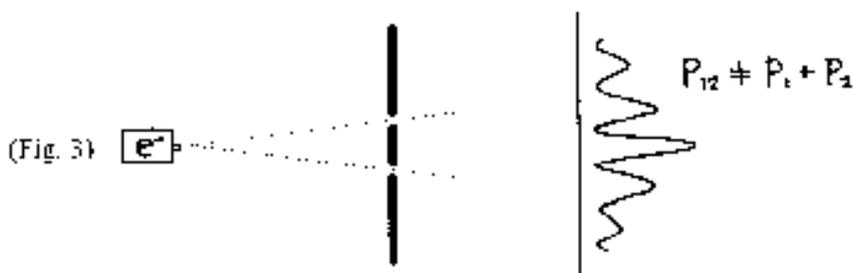
Während Primas (1983, 1990) trotz verschiedener Probleme grundsätzlich optimistisch über die universelle Anwendbarkeit der Quantenmechanik ist, und zwar auch in dem ‘klassischen’ Anwendungsbereich, ist zum Beispiel Ludwig (1990) anderer Ansicht. Für ihn ist die Extrapolation der Quantenmechanik in den makroskopischen Bereich noch sehr problematisch. In dieser Arbeit bin ich selber nicht in der Lage, über die Situation der heutigen Physik bzw. der Quantenmechanik einschlägige Stellungnahme zu beziehen. Statt dessen

²⁵⁴ Das Teiltterritorium der neuen Theorie erweitert sich nicht nur in Richtung der alten Theorie, sondern auch vielmehr in neues Land, das noch keiner Theorie von beiden unterliegt.

versuche ich zum Schluß der Universalitätsdiskussion anhand eines alten und bekannten Beispiels nochmals den Kontrast zwischen dem klassischen und quantenmechanischen Bereich sichtbar zu machen. Feynman fing mit zwei Experimenten an, wo er in Feynman et al.(1964) die quantenmechanischen Phänomene in Kontrast zu den klassischen charakterisierend einführen wollte. Wenn man mit makroskopischen Dingen, wie Kanone und Kugel, ein Doppelspaltexperiment durchführt, dann ergibt sich auf dem Hintergrundschirm folgendes Resultat: $P_{12} = P_1 + P_2$.



Das gleiche Experiment mit Elektronen durchgeführt ergibt ein ganz anderes Ergebnis. Die Interferenz, die in diesem Experiment beobachtet wird, kann nicht erklärt werden, wenn man das Elektron als ein materielles Teilchen wie eine Kanonenkugel ansieht.



Wir haben schon gesehen, daß die Dualität des Lichts oder des Elektrons, und zwar von ihrer korpuskularen und wellenartigen Seite, bei Bohr mittels Komplementaritätsbegriffs neu eingeordnet wurde. Aber bezüglich solcher Komplementarität kann man grob sagen, daß sie in makroskopischen Gegenständen praktisch nicht zu beobachten ist, oder vorsichtiger ausgedrückt, daß sie für solche Gegenstände ignorierbar ist. Außerdem ist von einem pragmatischen Standpunkt aus noch ein weiteres Problem zu sehen. Angenommen, daß es im Prinzip möglich wäre, ein bestimmtes Phänomen, das eigentlich ein typischer Fall für klassische Physik ist, erschöpfend quantenmechanisch zu beschreiben. Wenn aber, zum Beispiel, eine Kalkulation mittels der Quantentheorie, die für die quantitative Beschreibung dieses Phänomens als notwendig auftritt, so kompliziert und aufwendig würde, daß sie bei-

nahe nicht durchführbar erscheint, während eine Kalkulation mittels der klassischen Theorie sekundenschnell erfolgen könnte, die im Endeffekt das gleiche Ergebnis wie das von der fast unmöglichen Kalkulation in Quantenmechanik bieten sollte, würde man dann trotzdem auf die klassische Theorie verzichten, weil die Quantenmechanik die umfassendere Theorie ist? Ich bin skeptisch. Es muß jedoch hier klar sein, daß dieser pragmatische Standpunkt nicht mit dem Punkt, ob die Quantenmechanik universell, oder besser formuliert, noch umfassender im typisch klassischen Bereich gültig ist, zu verwechseln ist.

Ich bin uneingeschränkt mit Kuhn in dem Punkt einig, daß die Wissenschaftler und nicht die Laien über den Inhalt der Wissenschaft das Wort haben. Die Entscheidung, welche Theorie auf dem Feld ausgewählt und welche verworfen wird, liegt ebenfalls in allererster Linie in der Hand des Wissenschaftlers, und nicht eines Wissenschaftsphilosophen. Aber es scheint mir für eine Wissenschaft nicht rationell, daß sie die alte Theorie um einer formellen Einheit oder um der Universalität der neuen Theorie willen auswischen würde, während die alte Theorie immer noch eine einzigartige Stärke auf einem beschränkten Gebiet zeigt, die die neue Theorie [noch] nicht in dem Maße bietet.

Die neue Theorie kann sich sowohl in ihrer Gültigkeit, oder der prinzipiellen Anwendbarkeit, als auch in der praktischen Anwendbarkeit erweitern, so daß sie nicht nur mehr Probleme sondern diese auch besser und effizienter lösen kann. Die Komplementaritätsgrenzlinie wird dadurch ständig korrigiert, sie wird immer mehr in den ursprünglichen Bereich der alten Theorie verschoben. Obwohl dadurch das Terrain der alten Theorie kleiner werde, sollte man dies dennoch nicht so interpretieren, sie verliere dort die Gültigkeit oder werde widerlegt, sondern in erster Linie, in der Weise daß die neue Theorie, solange sie mindestens so exakte und auch effiziente Leistung auf dem Terrain erweisen kann, an Stelle der alten Theorie zur Anwendung komme.

Hier ist wichtig zu bemerken, daß diese Grenzlinie in der Tat kaum sichtbar wäre. Das heißt, ein Wissenschaftler würde kaum eine solche Grenzlinie vor Augen haben. Die Physiker heute wären sich im Forschungsalltag nicht darüber im Klaren, daß und wo die Grenzlinie zwischen quantentheoretischem und nicht-quantentheoretischem Anwendungsbereich besteht. In den Hochschulen werden die klassische Dynamik und Quantenmechanik den Studierenden noch in separaten Vorlesungen und Kursen gelehrt. Vielleicht werden die beiden auch in solchen Kursen mehrmals in verschiedener Weise in Kontrast gebracht. Aber für einen 'Praxis-Physiker', der heute mit den verschiedenen physikalischen Problemen ringt, bedeuten die zwei Theorien, wenn für ihn überhaupt eine Einteilung in zwei Theorien möglich ist, höchstens zwei verschiedene Referenzbücher, oder zwei Schubladen an seinem Arbeitstisch, aus denen er die für seine Arbeit nötigen Utensilien holt. Er greift mal nach dem einen und mal nach dem anderen Buch, er öffnet mal die eine und mal die andere Schublade. Und hier steht nicht, daß er die zwei Schubladen sauber voneinander getrennt

halten soll, und daß ihm jedesmal die Frage wichtig vorkommt, um *welche* Schublade es diesmal geht.

Ich sehe einen der signifikantesten und originärsten Punkte in der Kuhnschen Wissenschaftsphilosophie darin, daß er eine wissenschaftliche Theorie, oder ein Paradigma, grundsätzlich einer wissenschaftlichen Gemeinschaft zuschreibt, obwohl dies bei Kuhn in *SSR* nicht ausdrücklich als eine zu begründende These aufgestellt, sondern vielmehr als eine Grundannahme ausgedrückt wurde. Diese Verbindung von einem Paradigma mit einer wissenschaftlichen Gemeinschaft ist wesentlich in der Kuhnschen Theorie über die Theoriendynamik²⁵⁵. Wenn sich die Kuhnsche Theorie nicht nur auf der Ebene einer Ideologie²⁵⁶ befinden sondern als eine bewährte wissenschaftsphilosophische These erweisen will, die die Geschichte der Wissenschaften in einem sinnvollen Umfange zu beschreiben bzw. zu erklären vermag, muß die Natur der Wissenschaftlergemeinschaft, ihre Struktur, ihr innerer Mechanismus, etc., weiter erforscht werden, was auch in der Tat im Trend der Wissenschaftstheorie nach *SSR* zu beobachten ist.

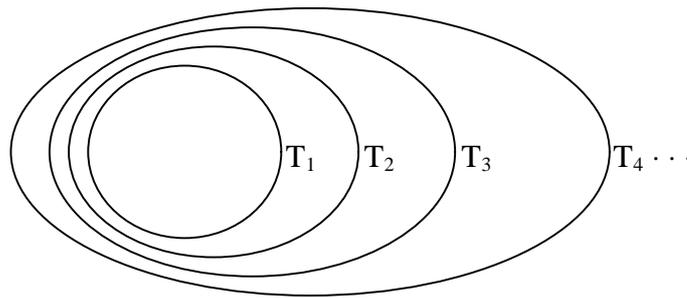
Eine wissenschaftstheoretische These faßt die allerbunteste Mannigfaltigkeit der Wissenschaftsgeschichte, die höchst komplizierte Situation in der wissenschaftlichen Forschung und deren Ergebnisse in vieler Hinsicht vereinfachend und vom detaillierten Kontext der Wirklichkeit abstrahierend, zusammen. Was alles konkret eine Wissenschaftstheorie zur Aufgabe haben kann und wird, bleibt immer grundsätzlich offen. Eine vernünftige Möglichkeit unter diesen vielen wäre, daß sie über die Wissenschaftsgeschichte eines Gebietes ein verständliches und konsistentes Schema zum Verständnis dieser Geschichte bietet, das sowohl im ganzen als auch im Detail den Tatsachen gerecht wird. Ich versuche in diesem Kapitel darüber hinaus, ein Schema zur Bewertung vorzulegen, wo die 'Bewertung' freilich auf eine gewisse Sicht beschränkt werden sollte. Daß eine eindeutige Bewertung über die Wissenschaftsgeschichte in aller Hinsicht und für alle Gesichtspunkte überhaupt ein gegenstandsloser Begriff ist, wurde erklärt. In einer Theoriewahlsituation gibt es nicht die in *jeder* Hinsicht und aus *allen* Perspektiven bessere Theorie.

Ein begreifbarer Sinn des Fortschrittes in der Theorie wäre vorgelegt, wenn das Folgende eintritt: T_2 , die Nachfolgertheorie von T_1 , enthält T_1 als Grenzfall, der aus T_2 unter bestimmten Bedingungen auf T_2 , die in T_2 formulierbar sind, und T_3 , die Nachfolgertheorie von T_2 , wiederum T_2 , und so weiter für T_n und T_{n-1} .

²⁵⁵ Diese Verbindung heißt jedoch nicht, daß zwischen Paradigma und wissenschaftlicher Gemeinschaft eine 1-zu-1 Korrespondenz besteht.

²⁵⁶ Vgl. Hoyningen-Huene (1995). In dem ersten Brief kritisiert Feyerabend Kuhns *SSR* (damals noch in Draft) als „ideology covered up as history“ (355).

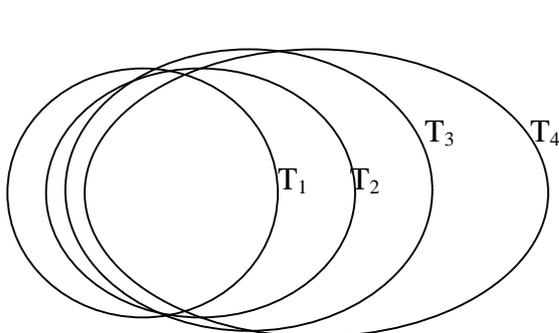
(Fig. 4)



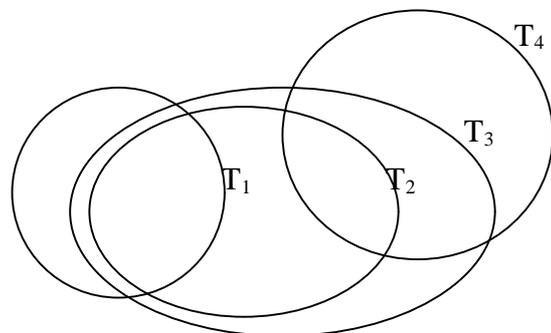
Dann enthält T_n prinzipiell alle ihre Vorgängertheorien von T_1 bis zu T_{n-1} als Grenzfälle, die sich aus T_n ableiten lassen. Wenn man T_n besitzt, dann heißt es, daß man alle Leistungen der vorherigen Theorien wiedergeben kann und noch etwas mehr. Diese Situation läßt sich in dem obigen Diagramm (Fig. 4) anschaulich machen.

Das entscheidende Problem dieser Vorstellung ist, das aus dem Vergleich mit den Tatsachen aus der Wissenschaftsgeschichte sichtbar wird, daß es nicht das Faktum angemessen widerspiegelt, daß die vorherige Theorie durch die spätere Theorie immer als *in gewisser Hinsicht falsch* aufgezeigt wird. Anders formuliert, es wird durch die spätere Theorie sichtbar, daß nicht mehr die vorherige Theorie als Ganzes sondern nur ein Teil von ihrem Inhalt aus dem aktualisierten Gesichtspunkt zu akzeptieren ist. Es müßte bestimmt auf ein Teil der alten Theorie verzichtet werden, oder zumindest wird die alte Theorie zum Teil durch die Einschränkungen der neuen Theorie wesentlich korrigiert. Dies impliziert, daß T_2 nicht das Ganze von T_1 als solches enthalten würde. Ein Teil geht durch den Theoriwechsel immer verloren. Man braucht ein anderes Bild. Gleich zwei Möglichkeiten werden mit folgenden Diagrammen dargestellt.

In Fig. 5 wird eine solche Reihe der Theorien dargestellt, die miteinander im folgenden Zusammenhang stehen: $T_1 \cap T_k \neq \emptyset$, für alle l, k . Jede Theorie überlappt sich in diesem Bild mit jeder Theorie. Eine Folge davon ist, daß mindestens eine Teilmenge von T_1 , wie klein sie auch sein soll, in einer beliebigen späteren Theorie T_n als ihr Teil überleben werde.



(Fig. 5)



(Fig. 6)

Mir scheint, Fig. 6 bietet ein noch stärker verallgemeinertes und auch aus dem Gesichtspunkt der Wissenschaftsgeschichte plausibleres Bild der Theoriendynamik. In diesem Bild kommt der Fall, daß sich $(T_1 \cap T_2)$ mit $(T_2 \cap T_3)$ überlappt, als möglich jedoch nicht notwendig vor.²⁵⁷

Eine Theorie mit einem als empirisch adäquat erwiesenen Anwendungsbereich geht mit der Entstehung bzw. Entwicklung einer neuen Theorie, die typischerweise als einen offenen Schwachpunkt der Vorgängertheorie erfolgreich abdeckend auftritt (z.B. ein unerklärtes Phänomen werde von der neuen Theorie erklärt), nicht zugrunde sondern wird hauptsächlich dadurch *beschränkt*, so daß die vorher nicht bzw. nicht genau gesehene Grenzlinie ihres Gültigkeitsumfanges festgelegt wird. Die Grenzlinie wird jedoch durch die neue Theorie auch nur partiell bestimmt, und bleibt prinzipiell irgend wo immer offen, das heißt, bleibt nicht bestimmt.

Dieses Begrenzen geschieht zum Beispiel so: Mit einem Gesetz in T_1 , ausgedrückt in der Form von einer Gleichung wie $y=f(r)$, wäre eigentlich gemeint, formell betrachtet, daß es für alle physikalisch möglichen r -Werte gültig sein soll. Wenn man jedoch mit diesem Satz auf problematische Fälle stößt, die damit offensichtlich nicht erklärbar sind, dann heißt das *entweder*, i) daß der Satz über die Relation von y und r *modifiziert* wird, zum Beispiel durch zusätzliche Terme, ohne daß die Grundstruktur von $y=f(r)$ angegriffen wird, was im unseren Kontext hier weniger interessant vorkommt und deswegen nicht weiter verfolgt wird²⁵⁸; *oder* ii) daß eine neue, von der in Probleme geratenen Theorie grundsätzlich verschiedene, Theorie T_2 aufkommen wird, die sich dann in der Problemlage als kompetent erweist. Für den Zusammenhang zwischen der alten und der neuen Theorie scheint in diesem Falle wieder zweierlei möglich zu sein. Erstens kann der genauere Gültigkeitsumfang der alten Theorie durch r ausgedrückt werden, und zwar, für einen bestimmten r -Bereich, zum Beispiel für $r \gg R_0$ oder $r \ll r_0$, gelte nicht $y=f(r)$ sondern $y=g(r) \neq f(r)$. Zweitens wird möglicherweise eine neue Variablen eingeführt, und die Grenze wird in dieser Variable ausgedrückt. Zum Beispiel, $y=F(r, \alpha)$, und $F(r, \alpha)$ nähere sich unter der Grenzbedingung $\alpha \rightarrow \text{Konst.}$, oder $\alpha \rightarrow \infty$, oder $\alpha \rightarrow -\infty$, o.ä., an die alte Formel $y=f(r)$. Hierbei kommt mir wichtig vor, daß die neue Formell unter einer angemessenen Grenzbedingung, die eigentlich aus der Sicht der neuen Theorie das alte herkömmliche Anwendungsgebiet charakterisiert, das annähernd mit der alten Formell übereinstimmende Ergebnis ergeben wird

²⁵⁷ Eine Begründung: Im Visier von T_{n+k} sind möglicherweise kaum mehr die Probleme von T_n enthalten, wenn k wesentlich größer als 1 ist. Siehe auch die Diskussion über die Nichttransitivität der Korrespondenzrelation im Abs. 4.3.2.

²⁵⁸ Ein Beispiel ist die Formulierung der van-der-Waals Gleichung, die zur feineren Anpassung der Phänomene die Größe der Moleküle und die intermolekulare Kraft zusätzlich berücksichtigt hat.

(Korrespondenz). Die zwei Theorien, T_1 und T_2 , treten dann noch komplementär auf, im Sinne 1) daß sie logisch inkompatibel sind, das heißt, daß man zwischen einem Satz aus einer Theorie und einem aus der anderen einen logischen Widerspruch bekommt,²⁵⁹ und zugleich 2) daß jedoch die *beiden* Theorien notwendig sind, um den gesamten Bereich abzudecken.

Die Grenze des Anwendbarkeitsumfangs der Gesamtheit von T_1 und T_2 könnte wiederum durch die Entwicklung einer neuen Theorie T_3 erkannt und auch niedergeschrieben werden. Über diese Grenzlinie hinaus gelte weder T_1 noch T_2 , sondern nur T_3 . Hierbei ist es prinzipiell *möglich*, daß T_3 die Problemlösefähigkeit von den beiden vorhergehenden Theorien gänzlich und in eleganter Weise übernimmt, und dadurch allein den im Moment ins Auge gefaßten gesamten Gegenstandsbereich (von Disziplinbereich von T) abzudecken vermag. Wenn dies nicht der Fall wird, bestehen alle drei Theorien nebeneinander, als zueinander komplementäre Theorien.

Wir haben schon betrachtet, daß das Begrenzen auf die schon bestehende(n) Theorie(n) durch die Einführung eines neuen Parameters, der in der vorherigen Theorie nicht vorkam, ermöglicht wird, und die Grenzbedingung(en) auch durch dieses Parameter formuliert werden könne(n). In diesem Fall ist die Grenzbedingung ohne neue Theorie eigentlich nicht auszudrücken. Man hätte darüber prinzipiell keine Voraussagen machen können. In diesem Sinne wirken die oben gesehenen Diagramme irreführend oder zumindest als unzulänglich, weil das Begrenzen durch Einführung einer neuen Dimension (d.h. einer neuen, linear unabhängigen Achse) möglich wird, was in dem Diagramm nicht berücksichtigt wurde.

Den Zuwachs der Problemlösefähigkeit noch als grundlegendes Kriterium für einen wissenschaftlichen Fortschritt ansehend, können wir einen Fortschrittsbegriff aufstellen, der über mehrere revolutionäre Wandel hinausgreifend sinnvoll erscheinen wird. Die Gesamtheit des Anwendbarkeitsumfangs wird größer, indem eine neue Theorie als die komplementäre Theorie für den bisherigen Stand des Feldes hinzukommt und so zu dem Korpus der Theorie zugefügt wird. Diese neue Theorie soll aber dafür auf der Grenzlinie eine Korrespondenzrelation zu dem empirisch gut bewährten Teil des alten Korpus aufweisen können.

Zum Schluß möchte ich noch einige Bemerkungen hinzufügen zum Vergleich meiner Position mit der Kuhnschen beziehungsweise Feyerabendischen Position bezüglich des wissenschaftlichen Fortschritts:

²⁵⁹ Das heißt, wenn man von der Möglichkeit absieht, daß sie nicht an einem und demselben Phänomen oder Problem zur Anwendung kommen sondern in zwei unterscheidbaren Gegenstandsbereichen zur Verfügung stehen sollen.

- 1) Im Vergleich zu Kuhn habe ich argumentiert, daß unter den verschiedenen Kriterien für wissenschaftlichen Fortschritt, oder schlicht gesagt, für eine bessere Theorie, eine Wichtigkeitsordnung aufzugeben ist. Ich meinte, die Frage, *ob* eine Theorie das Problem lösen kann, hat den Vorrang vor der anderen Frage, *wie* sie es löst. Auf der Grundlage solcher Ordnung scheint das Problem der Perspektive deutlich besser als bei Kuhn zu lösen zu sein.²⁶⁰
- 2) Im Vergleich zu Feyerabend stelle ich keine These darüber auf, wie ein Wissenschaftler mit den Theorien umgehen sollte. Feyerabend besagt, „Prolifere!“, oder schwächer formuliert, „Behebe die Hindernisse, die gegen die Theorieproliferation und die Pluralität wirken!“. In meiner Diskussion ist keine Empfehlung zu einer solchen Maxime für die Wissenschaftler (oder Wissenschaftstheoretiker, oder allgemeine Leute) ausgesprochen worden. Meine These besagte, *wenn* (im Feyerabendschen Ausdruck) Theorieproliferation in bestimmter Weise, und zwar mit Komplementarität und Korrespondenz, durchgeführt wird, dann ist daraus ein bestimmter und interessanter Typus des wissenschaftlichen Fortschrittes festzustellen.
- 3) Im Vergleich zu Kuhn und Feyerabend, die den wissenschaftlichen Fortschritt nicht im Bild einer *Konvergenz* sondern einer weiter und weiter blühenden *Diversität* gesehen haben wollten, bis zu welchem Punkt ich auch zustimme, habe ich in meiner Arbeit versucht, zu dieser Diversität eine Ordnung oder einen Mechanismus hinzuzugeben, für einen weiteren Schritt von der schlichten Diversität zu einer In-Sich-Geschlossenheit, auf deren Basis der Fortschritt eines Disziplinbereichs noch sinnvoller erscheinen möge.

²⁶⁰ Kuhn selber hat auch in *SSR* das Folgende zum Ausdruck gebracht: „[T]he unit of scientific achievement is the solved problem.“(169) Diesen Satz kann man im Sinne der von mir vorgestellten Ordnungsaufgabe deuten: In dem Punkte zählen der wissenschaftlichen Leistung zählt zunächst nicht ‘*wie* das Problem gelöst wird’, sondern es zählt ‘*ob* ein bestimmtes bzw. *wieviele* Problem gelöst worden ist’.

Zusammenfassung

Das Bohrsche Korrespondenzprinzip spielte als heuristisches Leitprinzip in der frühen Quantentheorie eine sehr wichtige Rolle. Daß trotz seiner dünnen mathematischen Begründung dieses Prinzip im gesamten Bereich der Quantentheorie weitgehend erfolgreich zur Anwendung kam, ist (wissenschaftstheoretisch) auf den Gedanken zurückzuführen, daß in der Konstruktion einer neuen Theorie die empirisch bewährten Leistungen der alten Theorie nicht eliminiert werden, sondern in dem begrenzten Umfange, in dem sie sich bewährt haben, Gültigkeit behalten sollen, und daß diese bewährte Leistung eine Leitlinie für die Konstruktion einer neuen Theorie bietet. Das Korrespondenzprinzip besagt dort, daß die neu entstehende Theorie auf der Grenze zu diesem bewährten Anwendbarkeitsbereich ihrer Vorgängertheorie die mit ihr (näherungsweise) übereinstimmenden Ergebnisse implizieren müsse, und zwar in den quantitativen Aussagen. Durch das Korrespondenzprinzip lassen sich zwei inhomogene Theorien, die in ihrer begrifflichen und mathematischen Struktur inkompatibel sind, darstellen als Theorien, die eine gemeinsame Grenzlinie beziehungsweise ein gemeinsames Grenzgebiet besitzen, so daß zwischen den Anwendbarkeitsbereichen der zwei inkompatiblen Theorien ein glatter Übergang möglich wird. Diese Grenzlinie kann sich verschieben. Aber der Übergang zwischen den Gebieten muß immer durch eine Korrespondenzrelation gesichert werden können. Dadurch erlangt der gesamte Disziplinbereich eine Art Kontinuität, ohne daß die Theorien in diesem Bereich durch Reduktion vereinheitlicht werden müßten.

Komplementär sind zwei Dinge dann, wenn sie sich ausschließen und zugleich ergänzen. Dieser Komplementaritätsbegriff läßt sich über die ersten Kontexte hinaus, in denen Bohr die Komplementarität in seinem Vortrag in Como 1927 diskutierte, an weiteren Anwendungskontexten aufzeigen.

Als zwei verschiedene, aber mathematisch äquivalente Systeme der Quantenmechanik, lassen sich die Heisenbergsche Quantenmechanik und die Schrödingersche Wellenmechanik als komplementär ansehen. Wie von Bohr (1933) angedeutet, kann man auch zwischen klassischer Mechanik und Quantenmechanik Komplementarität feststellen. Die Komplementarität zwischen zwei Theorien ist im folgenden Sinne zu verstehen: Logisch-begrifflich sind sie nicht kompatibel, teilen jedoch den gesamten Gegenstandsbereich der Disziplin, so daß der Verzicht auf eine Theorie notwendigerweise den Verlust des Anwendungsumfangs bedeutet.

Die Komplementarität zweier Theorien in diesem Sinne ist eine hinreichende Bedingung dafür, daß beide Theorien in dem Disziplinbereich beibehalten werden müssen. Diese

Komplementaritätsrelation zwischen Theorien kann auf die Drei-Theorie-Situation oder Mehr-Theorie-Situation erweitert werden.

Um in dem gesamten Disziplinbereich, der aus zwei oder mehreren komplementären Theorien besteht, sinnvoll *einen* Disziplinbereich bilden zu können, scheint jedoch noch ein weiteres Element notwendig zu sein; das Element, das den Übergang zwischen den (Teil-) Bereichen von den komplementären Theorien regelt. Diese Übergangsregelung wird durch eine Korrespondenzrelation besorgt.

Das Nebeneinander von komplementären Theorien, die auf ihren Grenzlinien durch Korrespondenzrelationen miteinander verknüpft sind, ist für ein Hinzukommen einer weiteren Theorie offen, die den bestehenden Theorien komplementär ist. Wenn sich eine solche Theorie durch eine Korrespondenzrelation an den bestehenden Theoriekorpus erfolgreich anschließt, wächst dieser Theoriekorpus zu dieser einen Theorie. Der wissenschaftliche Fortschritt ist im Sinne eines solchen Zuwachses festzustellen. Dieser Begriff des wissenschaftlichen Fortschritts bietet eine sinnvolle Alternative zu dem Fortschrittsbegriff, der auf dem Begriff einer Konvergenz auf einen (idealen) Punkt hin beruht, den man 'Wahrheit' nennt. Diesem Schema der Theoriendynamik zufolge ist nicht ausgeschlossen (sondern vielmehr wahrscheinlich), daß die alten Theorien mit der Entwicklung der neuen Teildisziplinen immer weniger diskutiert werden und immer seltener frischen Auftrieb bekommen, infolgedessen sie langsam veralten, ohne jedoch an Gültigkeit zu verlieren.

Wie schon erwähnt, kann auch die Grenzlinie verlegt werden. Das heißt, eine (meistens die neue) Theorie kann in den ursprünglich einer anderen (alten) Theorie zugehörigen Anwendungsbereich eindringen und sich dadurch einer reduktionistischen Einheit einen Schritt nähern.

Literaturverzeichnis

- NBCW 2: Niels Bohr: Collected Works, Vol. 2: Work on Atomic Physics (1912-1917), Hoyer, U. (ed.) (1981), North-Holland, Amsterdam.
- NBCW 3: Niels Bohr: Collected Works, Vol. 3: The Correspondence Principle (1918-1923), Rud Nielsen, J. (ed.) (1976), North-Holland, Amsterdam.
- NBCW 4: Niels Bohr: Collected Works, Vol. 4: The Periodic System (1920-1923), Rud Nielsen, J. (ed.) (1977), North-Holland, Amsterdam.
- NBCW 5: Niels Bohr: Collected Works, Vol. 5: The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924-1926), Stolzenburg, K. (ed.) (1984), North-Holland, Amsterdam.
- NBCW 6: Niels Bohr: Collected Works, Vol. 6: Foundations of Quantum Physics I (1926-1932), Kalckar, J. (ed.) (1985), North-Holland, Amsterdam.
- Achinstein, P. (1991): *Particle and Waves: Historical Essays in the Philosophy of Science*, Oxford University Press, New York.
- Achinstein, P. (1974): History and Philosophy of Science: A Reply to Cohen (Discussion), in: Suppe (1974).
- Audreusch, J./ Mainzer, K. (Hrsg.) (1990): *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?: Zur Physik und Philosophie der Quantenmechanik*, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- Balmer, J.J. (1885): Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs, *Annalen der Physik und Chemie*, N.F. XXV.
- Bastin, T. (ed.) (1971): *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge University Press, Cambridge MA.
- Batterman, R.W. (1991): Chaos, Quantization, and the Correspondence Principle, *Synthese* 89.
- Batterman, R.W. (1993a): Quantum Chaos and Semiclassical Mechanics, in: Hull et al.(1993).
- Batterman, R.W. (1993b): Defining Chaos, *Philosophy of Science* 60.
- Bayfield, J.E. (1991): On Making Experiments on Semiclassical Atomic Systems Sensitive to Chaotic rather than Periodic Classical Trajectories, *Comments on Atomic and Molecular Physics* 25.
- Beller, M. (1992a): The Birth of Bohr's Complementarity: The Context and the Dialogues, *Studies in History and Philosophy of Science* 23.
- Beller, M. (1992b): The Genesis of Bohr's Complementarity Principle and the Bohr-Heisenberg Dialogue, in: Ullmann-Margalit (1992).
- Beller, M. (1992c): Schrödinger's Dialogue with Göttingen-Copenhagen Physicists - "Quantum Jumps" and Realism, in: Bitbol et al.(1992).

- Beller, M. (1993): Einstein and Bohr's Rhetoric of Complementarity, *Science in Context* 6.
- Beller, M. (1996): The Rhetoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit, *Philosophy of Science* 63.
- Ben-Menahem, Y. (1993): Struggling with Causality: Einstein's Case, *Science in Context* 6.
- Bergström, L. (1996): Scientific Value, *International Studies in Philosophy of Science* 10.
- Bitbol, M./ Darrigol, O.(eds.) (1992): *Erwin Schrödinger: Philosophy and the Birth of Quantum Mechanics*, Edition Frontières, Gif-sur-Yvette Cedex.
- Bohm, D. (1951): *Quantum Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ.
- Bohr, N. (1913): On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I-III, *Philosophical Magazine* 26.
- Bohr, N. (1914): On the Spectrum of Hydrogen (Om Brintspektret), *Fysisk Tidsskrift* 12, Reprint in: *NBCW* 2.
- Bohr, N. (1920): Über die Serienspektren der Elemente, *Zeitschrift für Physik* 2.
- Bohr, N. (1921): Zur Frage der Polarisation der Strahlung in der Quantentheorie, *Zeitschrift für Physik* 6.
- Bohr, N. (1922a): Der Bau der Atome und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente, *Zeitschrift für Physik* 9.
- Bohr, N. (1922b): The Structure of the Atom. (Nobel Prize Lecture in Stockholm, 1922), *Nature* 112, Reprint in: *NBCW* 4 (deutsche Auffassung in: *Naturwissenschaften* 11 (1923)).
- Bohr, N. (1923a): Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau: I. Die Grundpostulate der Quantentheorie, *Zeitschrift für Physik* 13.
- Bohr, N. (1923b): Über den Bau der Atome (Nobel Vortrag), Reprint in: Meyenn et al.(1985).
- Bohr, N. (1924a): On the Application of the Quantum Theory to Atomic Structure, *Proceedings of the Cambridge Philosophy Society* (Suppl.), Reprint in: *NBCW* 3.
- Bohr, N. (1924b): The Correspondence Principle, *Report of the British Association for the Advancement of Science, Liverpool 1923*, 428-429; Reprint in: *NBCW* 3.
- Bohr, N. (1925a): Atomic Theory and Mechanics, in: Bohr (1987a).
- Bohr, N. (1925b): Über die Wirkung von Atomen bei Stößen, *Zeitschrift für Physik* 34, 142-157.
- Bohr, N. (1926): Atomtheorie und Mechanik, Reprint in: Meyenn et al.(1985).
- Bohr, N. (1927a): The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory, *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici 11-20 Settembre 1927, Como-Pavia-Roma, Volume Secondo, Nicola Zanichelli, Bologna 1928*, 565-588; Reprint in: *NBCW* 6.
- Bohr, N. (1927b): Brief an Einstein, 13. April 1927, Reprint in: Meyenn et al.(1985).
- Bohr, N. (1927m): Manuscripts for Como Lecture, Reprint in: *NBCW* 6.

- Bohr, N. (1928d): Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik, *Naturwissenschaften* 16.
- Bohr, N. (1928e): The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory, *Nature* (Suppl.) 121.
- Bohr, N. (1929a): Introductory Survey, in: Bohr (1987a).
- Bohr, N. (1929b): The Quantum of Action and the Description of Nature, *Reprint* in: Bohr (1987a).
- Bohr, N. (1929c): The Atomic Theory and the Fundamental Principles underlying the Description of Nature, *Reprint* in: Bohr (1987a).
- Bohr, N. (1930): Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturbeschreibung, *Naturwissenschaften* 18, *Reprint* in: Bohr (1985).
- Bohr, N. (1931): *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Julius Springer, Berlin.
- Bohr, N. (1932): Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution (Faraday Lecture, May 1930), *Journal of the Chemical Society, 1932*, *Reprint* in: *NBCW* 6.
- Bohr, N. (1933): Licht und Leben, *Reprint* in: Meyenn et al.(1985).
- Bohr, N. (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?, *Physical Review* 48.
- Bohr, N. (1937): Causality and Complementarity, *Philosophy of Science* 4.
- Bohr, N. (1948): On the Notions of Causality and Complementarity, *Dialectica* 2.
- Bohr, N. (1962): Licht und Leben — noch einmal, *Reprint* in: Meyenn et al.(1985).
- Bohr, N. (1985): *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*, Vieweg, Braunschweig.
- Bohr, N. (1987a): *Atomic Theory and the Description of Nature*, Ox Bow, Woodbridge.
- Bohr, N. (1987b): *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Ox Bow, Woodbridge.
- Bohr, N. (1987c): *Essays 1932-1957 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Ox Bow, Woodbridge.
- Bohr, N./ Kramers, H.A./ Slater, J.C. (1924): The Quantum Theory of Radiation, *Philosophical Magazine* 47.
- Born, M. (1923): Quantentheorie und Störungsrechnung, *Naturwissenschaften* 11.
- Born, M. (1924): Über Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 26.
- Born, M. (1926): Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Zeitschrift für Physik* 37, 38.
- Born, M./ Heisenberg, W./ Jordan, P. (1926): Zur Quantenmechanik. II., *Zeitschrift für Physik* 35.
- Born, M./ Jordan, P. (1925): Zur Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 34.
- Bothe, W./ Geiger, H. (1924): Ein Weg zur experimentellen Nachprüfung der Theorie von Bohr, Kramers und Slater, *Zeitschrift für Physik* 26.
- Bothe, W./ Geiger, H. (1925): Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung, *Zeitschrift für Physik* 32.

- Brown, B. (1993): Old Quantum Theory: A Paraconsistent Approach, in: Hull et al.(1993).
- Brown, L.S. (1972): Classical Limit and the WKB Approximation, *American Journal of Physics* 40.
- Bub, J. (1973): Under the Spell of Bohr, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.
- Buchwald, J.Z. (1989): *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Bunge, M. (1955): Strife about Complementarity, I, II, *The British Journal for the Philosophy of Science* 6.
- Bunge, M. (ed.) (1967): *Foundations of Physics*, Springer, New York.
- Bunge, M. (1987): *Kausalität, Geschichte und Probleme*, Mohr (Siebeck), Tübingen.
- Burian, R.M. (1977): More Than A Marriage of Convenience: On the Inexplicability of History and Philosophy of Science, *Philosophy of Science* 44.
- Burian, R.M. (1984): Scientific Realism and Incommensurability: Some Criticisms of Kuhn and Feyerabend, in: Cohen et al.(1984).
- Burian, R.M./ Trout, J.D. (1995): Ontological Progress in Science, *Canadian Journal of Philosophy* 25.
- Capek, M. (1961): *The Philosophical Impact of Contemporary Physics*, van Nostrand, Princeton NJ.
- Cassidy, D.C. (1976): *Werner Heisenberg and the Crisis in Quantum Theory, 1920-1925*, Dissertation an der Purdue University.
- Cassidy, D.C. (1992): *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*, Freeman, New York.
- Cassirer, E. (1957): *Zur modernen Physik*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Chalmers, A.F. (1973): On Learning from Our Mistakes, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.
- Chevalley, C. (1995): Philosophy and the Birth of Quantum Theory, in: Gavroglu et al.(1995).
- Chu, G./ José, J.V. (1992): The Semiclassical Limit of a Quantum Fermi Accelerator, *Journal of Statistical Physics* 68.
- Cohen, I.B. (1974): History and the Philosopher of Science, in: Suppe (1974).
- Cohen, I.B. (1985): *Revolution in Science*, Harvard University Press(Belknap), Cambridge MA.
- Cohen, L.J. (1973): Is the Progress of Science Evolutionary?, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.
- Cohen, R.S./ Wartofsky, M.W. (eds.) (1969): *Boston Studies in the Philosophy of Science, Volume V*, Reidel, Dordrecht.
- Cohen, R.S./ Wartofsky, M.W. (eds.) (1984): *Methodology, Metaphysics and the History of Science* (BSPS 84), Reidel, Dordrecht.

- Collingwood, R.G. (1963): *The Idea of History*, Oxford University Press, Oxford (first published by Clarendon Press, 1946).
- Compton, A.H. (1961): The Scattering of X Rays as Particles, *American Journal of Physics* 29.
- Compton, A.H./ Simon, A.W. (1925a): Measurement of β -Rays Associated with Scattered X-Rays, *The Physical Review* 25.
- Compton, A.H./ Simon, A.W. (1925b): Directed Quanta of Scattered X-Rays, *The Physical Review* 26.
- Crawford, F.S. (1989): Applications of Bohr's Correspondence Principle, *American Journal of Physics* 57.
- Cushing, J.T. (1994): A Bohmian Response to Bohr's Complementarity, in: Faye et al.(1994).
- Cushing, J.T./ Fine, A./ Goldstein, S. (eds.) (1996): *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, Kluwer, Dordrecht.
- Cushing, J.T./ McMullin, E. (eds.) (1989): *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*, University Press Notre Dame, Notre Dame IND.
- D'Agostino, S. (1985): The problem of the Link between Correspondence and Complementarity in Niels Bohr's Papers 1925-1927, *Rivista di Storia della Scienza* 2.
- D'Agostino, S. (1992): Continuity and Completeness in Physical Theory: Schrödinger's Return to the Wave Interpretation of Quantum Mechanics in the 1950's, in: Bitbol et al.(1992).
- d'Espagnat, B. (1976): *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics* (2.ed.), Benjamin, Reading MA.
- Darrigol, O. (1992): *From c-Numbers to q-Numbers. The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, Berkeley.
- Debye, P. (1927): Wellenmechanik und Korrespondenzprinzip, *Physikalische Zeitschriften* 28.
- Dilworth, C. (1981): *Scientific Progress: A Study Concerning the Nature of the Relation between Successive Scientific Theories*, Reidel, Dordrecht.
- Dirac, P.A.M. (1926a): The Fundamental Equations of Quantum Mechanics, *Proceedings of the Royal Society A* 109, Reprint in: van der Waerden (1967).
- Dirac, P.A.M. (1926b): Quantum Mechanics and a Preliminary Investigation of the Hydrogen Atom, *Proceedings of the Royal Society A* 110, Reprint in: van der Waerden (1967).
- Donovan, A./ Laudan, L./ Laudan, L.(eds.) (1988): *Scrutinizing Science: Empirical Studies of Scientific Change*, Kluwer, Dordrecht.
- Ehrenfest, M.P. (1921): Le Principe de Correspondance, Reprint in: *NBCW* 3.
- Einstein, A. (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik* 17.
- Einstein, A. (1917): Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Zeitschriften* 18.

- Einstein, A. (1922): Über die gegenwärtige Krise der theoretischen Physik, Kaizo/Tokyo 4, Reprint in: Meyenn (1994).
- Einstein, A. (1927): Newtons Mechanik und ihr Einfluß auf die Gestaltung der theoretischen Physik, *Naturwissenschaften* 15.
- Einstein, A. (1948): Quanten-Mechanik und Wirklichkeit, *Dialectica* 2, No.3/4.
- Einstein, A. (1949a): Autobiographisches, in: Schilpp (1970).
- Einstein, A. (1949b): Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Cooperative Volume, in: Schilpp (1970).
- Einstein, A./ Podolsky, B./ Rosen, N. (1935): Can Quntum-mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, *Physical Review* 47.
- Fadner, W.L. (1985): Theoretical Support for the generalized Correspondence Principle, *American Journal of Physics* 53.
- Faye, J. (1991): *Niels Bohr: His Heritage and Legacy : an Anti-Realist View of Quantum Mechanics*, Kluwer, Dordrecht.
- Faye, J./ Folse, H.J. (eds.) (1994): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy* (BSPS 153), Kluwer, Dordrecht.
- Fermi, E. (1926/27): Zur Wellenmechanik des Stoßvorganges, *Zeitschrift für Physik* 40.
- Fetzer, J.H. (ed.) (1993): *Foundations of Philosophy of Science: Recent Developments*, Paragon, New York.
- Feyerabend, P. (1958): Complementarity, *Proceedings of the Aristotelian Society* (Suppl.) 32.
- Feyerabend, P.K. (1962): Explanation, Reduction and Empiricism, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 3, Reprint in gekürzter deutscher Fassung in: Feyerabend (1981).
- Feyerabend, P.K. (1974): Philosophy of Science 2001, in: Cohen et al.(1984).
- Feyerabend, P. (1975): *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*, NLB, London.
- Feyerabend, P. (1977): Changing Patterns of Reconstruction. Rezension von Stegmüller (1973): *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie, und Analytischen Philosophie*. Band 2: *Theorie und Erfahrung*, Zweiter Halbband: *Theorienstrukturen und Theoriendynamik*, Springer, Berlin.
- Feyerabend, P.K. (1978): *Der wissenschaftstheoretische Realismus und die Autorität der Wissenschaften* (Ausgewählte Schriften, Band 1), Vieweg, Braunschweig.
- Feyerabend, P.K. (1981): *Probleme der Empirismus: Schriften zur Theorie der Erklärung, der Quantentheorie und der Wissenschaftsgeschichte* (Ausgewählte Schriften, Band 2), Vieweg, Braunschweig.
- Feyerabend, P. (1984a): *Wissenschaft als Kunst*, Suhrkamp, Frankfurt a.M.
- Feyerabend, P. (1984b): Fortschritt in Kunst, Philosophie und Wissenschaft, in: Feyerabend (1984a).

- Feyerabend, P.K. (1984c): Quantitativer und Qualitativer Fortschritt und Kunst, Philosophie und Wissenschaft, in: Feyerabend et al.(1984).
- Feyerabend, P.K./ Maxwell, G.(eds.) (1966): *Mind, Matter, and Method: Essays in Philosophy of Science in Honor of Herbert Feigl*, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Feyerabend, P./ Thomas, Ch. (Hrsg.) (1984): *Kunst und Wissenschaft*, Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich.
- Feynman, R.P./ Leighton, R.B./ Sands, M. (1963): *The Feynman Lectures on Physics, Vol.1: Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*, Addison-Wesley, Reading MA.
- Feynman, R.P./ Leighton, R.B./ Sands, M. (1964): *The Feynman Lectures on Physics, Vol.3: Mainly Electromagnetism and Matter*, Addison-Wesley, Reading MA.
- Flamm, L. (1927): Die neue Mechanik, *Naturwissenschaften* 15.
- Folse, H.J. (1985): *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*, North-Holland, Amsterdam.
- Folse, H.J. (1995): Niels Bohr and the Construction of a New Philosophy: Essay Review of S. Petruccioli's *Atoms, Metaphors and Paradoxes* (1993), *Studies in History and Philosophy of Science* 26.
- Ford, J./ Mantica, G. (1992): Does Quantum Mechanics Obey the Correspondence Principle? Is It Complete?, *American Journal of Physics* 60.
- Franck, J. (1920): Bemerkungen über die Intensitätsverteilung in Serienspektren, *Zeitschrift für Physik* 1.
- Frank, P. (1929): Die Grundbegriffe der analytischen Mechanik als Grundlage der Quanten- und Wellenmechanik, *Physikalische Zeitschriften* 30.
- Frank, P. (1946): *Foundations of Physics*, University of Chicago Press, Chicago.
- French, S./ Kamminga, H. (eds.) (1993): *Correspondence, Invariance and Heuristics: Essays in Honour of Heinz Post*, Kluwer, Dordrecht.
- Friedman, M. (1974): Explanation and Scientific Understanding, *The Journal of Philosophy* 71.
- Gasiorowicz, S. (1974): *Quantum Physics*, Wiley, New York.
- Gavroglu, K./ Goudaroulis, Y./ Nicolacopoulos, P. (eds.) (1989): *Imre Lakatos and Theories of Scientific Change*, Kluwer, Dordrecht.
- Gavroglu, K./ Stachel, J./ Wartofsky, M.W. (eds.) (1995): *Physics, Philosophy and the Scientific Community*, Kluwer, Dordrecht.
- Giere, R.N. (1973): History and Philosophy of Science: Intimate Relationship or Marriage of Convenience?, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.
- Grünbaum, A. (1957): Complementarity in Quantum Physics and its Philosophical Generalization, *The Journal of Philosophy* 54.
- Hacking, I. (ed.) (1981): *Scientific Revolutions*, Oxford University Press, Oxford.
- Halliday, D./ Resnick, R. (1981): *Fundamentals of Physics* (2.ed.), Wiley, New York.

- Healey, R. (1989): *The Philosophy of Quantum Mechanics. An Interactive Interpretation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Heelan, P.A. (1965): *Quantum Mechanics and Objectivity: A Study of the Physical Philosophy of Werner Heisenberg*, Nijhoff, The Hague.
- Heilbron, J.L. (1977): Lectures on the History of Atomic Physics 1900-1922, in: Weiner (1977).
- Heilbron, J.L. (1988): The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit, in: Ullmann-Margalit (1988).
- Heisenberg, W. (1925a): Über eine Anwendung des Korrespondenzprinzips auf die Frage nach der Polarisierung des Fluoreszenzlichtes, *Zeitschrift für Physik* 31.
- Heisenberg, W. (1925b): Zur Quantentheorie der Multiplettstruktur und der anomalen Zeemaneffekte, *Zeitschrift für Physik* 32.
- Heisenberg, W. (1925c): Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, *Zeitschrift für Physik* 33.
- Heisenberg, W. (1926a): Mehrkörperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 38.
- Heisenberg, W. (1926b): Über die Spektren von Atomsystemen mit zwei Elektronen, *Zeitschrift für Physik* 39.
- Heisenberg, W. (1927a): Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik* 43.
- Heisenberg, W. (1927b): Ueber die Grundprinzipien der "Quantenmechanik", *Forschungen und Fortschritte* 3.
- Heisenberg, W. (1951): 50 Jahre Quantentheorie, *Naturwissenschaften* 38.
- Heisenberg, W. (1955): The Development of the Interpretation of the Quantum Theory, in: Pauli (1955).
- Heisenberg, W. (1956): Die Entwicklung der Deutung der Quantentheorie, *Physikalische Blätter* 12.
- Heisenberg, W. (1959): *Physik und Philosophie*, Hirzel, Stuttgart.
- Heisenberg, W. (1967): Quantum Theory and Its Interpretation, in: Rozenal (1967).
- Heisenberg, W. (1969): *Der Teil und das Ganze*, Piper, München.
- Held, C. (1994): The Meaning of Complementarity, *Studies in History and Philosophy of Science* 25.
- Heller, E.J./ Tomsovic, S. (1993): Postmodern Quantum Mechanics, *Physics Today* (July 1993).
- Hermann, A. (1971): *The Genesis of Quantum Theory (1899-1913)*, MIT Press, Cambridge MA.
- Hermann, A./ Meyenn, K.v./ Weisskopf, V.F. (Hrsg.) (1979): *Wolfgang Pauli, Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a., Bd.I: 1919-1929*, Springer, New York.

- Hesse, M. (1980): *Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science*, Harvester, Brighton.
- Hettema, H. (1995): Bohr's Theory of Atom 1913-1923: A Case Study in the Progress of Scientific Research Programmes, *Studies in History and Philosophy of Science* 26.
- Hobbs, J. (1994): A Limited Defense of the Pessimistic Induction, *The British Journal for the Philosophy of Science* 45, 171-191.
- Holland, P.R. (1996): Is Quantum Mechanics Universal?, in: Cushing et al.(1996).
- Holton, G. (1986): *The Advancement of Science, and its Burdens*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Holton, G. (1988): *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein* (revised edition), Harvard University Press, Cambridge MA.
- Honner, J. (1987): *The Description of Nature: Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*, Clarendon, Oxford.
- Horwich, P. (ed.) (1993): *World Changes. Thomas Kuhn and the Nature of Science*, MIT Press, Cambridge MA.
- Howard, D. (1994): What makes a Classical Concept Classical? Toward a Reconstruction of Niels Bohr's Philosophy of Physics, in: Faye et al.(1994).
- Hoyningen-Huene, P. (1984): Das Problemfeld "Wissenschaftlicher Fortschritt", in: Feyerabend et al.(1984).
- Hoyningen-Huene, P. (1989): *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns: Rekonstruktion und Grundlagenprobleme*, Vieweg, Braunschweig.
- Hoyningen-Huene, P. (1992): Niels Bohrs Argument für die Nichtreduzierbarkeit der Biologie auf die Physik, *Philosophia Naturalis* 29.
- Hoyningen-Huene, P. (1993): *Reconstructing Scientific Revolutions: Thomas S. Kuhn's Philosophy of Science*, The University of Chicago Press, Chicago (Englische Auffassung von Hoyningen-Huene (1989)).
- Hoyningen-Huene, P. (1995): Two Letters of Paul Feyerabend to Thomas S. Kuhn on a Draft of *The Structure of Scientific Revolutions*, *Studies in History and Philosophy of Science* 26.
- Hull, D./ Forbes, M./ Okruhlik, K. (eds.) (1993): *PSA 1992*, Volume 2, Philosophy of Science Association, East Lansing Michigan.
- Jammer, M. (1966): *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw Hill, New York.
- Kaiser, D. (1992): More Roots of Complementarity: Kantian Aspects and Influences, *Studies in History and Philosophy of Science* 23.
- Kangro, H. (1970): *Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes. Messungen und Theorien der spektralen Energieverteilung bis zur Begründung der Quantenhypothese*, Steiner, Wiesbaden.
- Kellert, S.H. (1993): *In the Wake of Chaos*, The University of Chicago Press, Chicago.

- Kittel, C./ Knight, W.D./ Ruderman, M.A. (1965): *Mechanics: Berkeley Physics Course, Volume 1*, McGraw Hill, New York.
- Klein, M.J. (1977): The Beginnings of the Quantum Theory, in: Weiner (1977).
- Koertge, N. (1973): Theory Change in Science, in: Pearce et al.(1973).
- Komer, A. (1970): The Quantitative Epistemological Content of Bohr's Correspondence Principle, *Synthese* 21.
- Krajewski, W. (1977): *Correspondence Principle and Growth of Science*, Reidel, Dordrecht.
- Kramers, H.A. (1920): Über den Einfluß eines elektrischen Feldes auf die Feinstruktur der Wasserstofflinien, *Zeitschrift für Physik* 3, 199-223.
- Kramers, H.A. (1923): Das Korrespondenzprinzip und der Schalenbau des Atoms, *Naturwissenschaften* 11.
- Kramers, H.A. (1924a): Die chemische Eigenschaften der Atome nach der Bohrschen Theorie, *Naturwissenschaften* 12.
- Kramers, H.A. (1924b): The Law of Dispersion and Bohr's Theory of Spectra, *Nature* 113, Reprint in: Kramers (1956).
- Kramers, H.A. (1924c): The Quantum Theory of Dispersion, *Nature* 114, Reprint in: Kramers (1956).
- Kramers, H.A. (1948): Non-Relativistic Quantum-Electrodynamics and Correspondence Principle (Solvay Congress 1948) (*Rapport et Discussions*, Bruxell, 1950), Reprint in: Kramers (1956).
- Kramers, H.A. (1956): *Collected Scientific Papers*, North-Holland, Amsterdam.
- Kramers, H.A./ Heisenberg, W. (1925): Über die Streuung von Strahlung durch Atome, *Zeitschrift für Physik* 31.
- Krips, H. (1987): *The Metaphysics of Quantum Theory*, Clarendon, Oxford.
- Krüger, L. (1973): Falsification, Revolution and Continuity in the Development of Science, in: Suppes et al.(1973).
- Krüger, L. (1980): Intertheoretic Relations as a Tool for the Rational Reconstruction of Scientific Development, *Studies in History and Philosophy of Science* 11.
- Kuhn, T.S. (1970a): *The Structure of Scientific Revolutions* (2.ed., enlarged), The University of Chicago Press, Chicago.
- Kuhn, T.S. (1970b): Logic of Discovery or Psychology of Research?, in: Lakatos/ Musgrave (1970).
- Kuhn, T.S. (1973): The Relation between the History and the Philosophy of Science, in: Kuhn (1977).
- Kuhn, T.S. (1977): *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Kuhn, T.S. (1993): Afterwords, in: Horwich (1993).

- Kuhn, W. (1925): Über die Gesamtstärke der von einem Zustande ausgehenden Absorptionslinien, *Zeitschrift für Physik* 33.
- Ladenburg, R. (1921): Die quantentheoretische Deutung der Zahl der Dispersionselektronen, *Zeitschrift für Physik* 4.
- Lakatos, I. (1970): Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes, in: Lakatos et al.(1970).
- Lakatos, I. (1978): *The Methodology of Scientific Research Programmes: Philosophical Papers*, Vol.I. (Worrall, J./ Currie, G. (eds.)), Cambridge University Press, Cambridge.
- Lakatos, I. (1993): History of Science and Its Rational Reconstructions, in: Fetzer (1993).
- Lakatos, I./ Musgrave, A. (eds.) (1970): *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Landé, A. (1920): Dynamik der räumlichen Atomstruktur (IV. Mitteilung), *Zeitschrift für Physik* 2.
- Landé, A. (1923): Das Versagen der Mechanik in der Quantentheorie, *Naturwissenschaften* 11.
- Landé, A. (1926): Neue Wege der Quantentheorie, *Naturwissenschaften* 14.
- Laudan, L. (1977): *Progress and its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth*, Routledge, London.
- Liboff, R.L. (1984): The Correspondence Principle Revisited, *Physics Today* 37.
- MacKay, D.M. (1958): Complementarity (II), *Proceedings of the Aristotelian Society* (Suppl.) 32.
- MacKinnon, E. (1994): Bohr and the Realism Debates, in: Faye et al.(1994).
- MacKinnon, E.M. (1982a): *Scientific Explanation and Atomic Physics*, University of Chicago Press, Chicago.
- MacKinnon, E.M. (1982b): The Consolation of Bohr's Position, in: MacKinnon (1982a).
- Malone, M.E. (1993): Kuhn Reconstructed: Incommensurability without Relativism, *Studies in History and Philosophy of Science* 24.
- Margenau, H./ Park, J.L. (1967): Objectivity in Quantum Mechanics, in: Bunge (1967).
- Martens, C.C. (1992): Quantum Qualitative Dynamics, *Journal of Statistical Physics* 68.
- Martin, M. (1984): How to be a good Philosopher of Science: A Plea for Empiricism in Matters Methodological, in: Cohen et al.(1984)
- Matuschka, M.E.v. (1985): Heuristik: Wortgeschichte und historische Entwicklung, *Philosophia Naturalis* 22.
- McMullin, E. (1993): Rationality and Paradigm Change in Science, in: Horwich (1993).
- Mehra, J. (1974): *The Quantum Principle: Its Interpretation and Epistemology*, Reidel, Dordrecht.
- Meredith, D.C. (1992): Semiclassical Wavefunctions of Nonintegrable Systems and Localization on Periodic Orbits, *Journal of Statistical Physics* 68.

- Messiah, A. (1967): *Quantum Mechanics*, Vol.1, North-Holland, Amsterdam.
- Meyenn, K.v. (1992): Schrödingers Beiträge zur Atomtheorie vor der Entstehung seiner Wellenmechanik, in: Bitbol et al.(1992).
- Meyenn, K.v./ Stolzenburg, K./ Sexl, R.U. (Hrsg.) (1985): *Niels Bohr 1885-1962. Der Kopenhagener Geist in der Physik*, Vieweg, Braunschweig.
- Meyer-Abich, K.M. (1965): *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität :Eine Studie zur Geistesgeschichte der Quantentheorie in den Beiträgen Niels Bohrs*, Steiner, Wiesbaden.
- Miller, A.I.(ed.) (1989): *Sixty-Two Years of Uncertainty*, Plenum Press, New York.
- Mittelstrass, J./ McLaughlin, P./ Burgen, A. (eds.) (1997): *The Idea of Progress*, de Gruyter, Berlin.
- Murdoch, D. (1987): *Niels Bohr s Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Musgrave, A. (1989): Deductive Heuristics, in: Gavroglu et al.(1989)
- Neumann, J.v. (1955): *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton NJ.
- Newton-Smith, W.H. (1981): *The Rationality of Science*, Routledge, Boston MA.
- Nickles, T. (1995): Philosophy of Science and History of Science, in: Thackray (1995).
- Nobel Foundation* (1965): *Nobel Lectures, Physics 1922-1941: Including Presentation Speeches and Laureates Biographies*, Elsevier, Amsterdam.
- Norton, J.D. (1993): The Determination of the Theory by Evidence: The Case for Quantum Discontinuity, 1900-1915, *Synthese* 97.
- O'Connor, P.W./ Tomsovic, S./ Heller, E.J. (1992): Accuracy of Semiclassical Dynamics in the Presence of Chaos, *Journal of Statistical Physics* 68.
- Pais, A. (1991): *Niels Bohr s Times: In Physics, Philosophy and Polity*, Clarendon, Oxford.
- Pauli, W. (1926): Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik, *Zeitschrift für Physik* 36.
- Pauli, W. (ed.) (1955): *Niels Bohr and the Development of Physics*, Pergamon, London.
- Pearce, G./ Maynard, P. (eds.) (1973): *Conceptual Change*, Reidel, Dordrecht.
- Petersen, A. (1968): *Quantum Physics and the Philosophical Tradition*, MIT Press, Cambridge MA.
- Petersen, A. (1969): On the philosophical significance of the Correspondence Argument, in: Cohen et al.(1969).
- Petrucchiolo, S. (1992): *Atoms, Metaphors and Paradoxes. Niels Bohr and the Construction of a New Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Planck, M. (1923): Die Bohrsche Atomtheorie, *Naturwissenschaften* 11.
- Planck, M. (1927): Die physikalische Realität der Lichtquanten, *Naturwissenschaften* 15.
- Planck, M. (1966): *Theorie der Wärmestrahlung* (Vorlesungen), 6.Aufl. (1.Aufl.: 1906), Barth, Leipzig.

- Plotnitsky, A. (1994): *Complementarity: Anti-Epistemology after Bohr and Derrida*, Duke University Press, Durham.
- Polikarov, A. (1993): Is there an Incommensurability between Superseding Theories?: On the Validity of the Incommensurability Thesis, *Journal for General Philosophy of Science* 24.
- Popper, K. (1981): The Rationality of Scientific Revolutions, in: Hacking (1981).
- Popper, K.R. (1982): *Quantum Theory and the Schism in Physics* (ed. by W.W.Bartley, III), Hutchinson, London.
- Popper, K.R. (1989⁵): *Conjectures and Refutation: The Growth of Scientific Knowledge*, Routledge, London (1.Aufl. 1963).
- Popper, K.R. (1994): *The Myth of the Framework. In Defence of Science and Rationality*, Routledge, London (ed. M.A. Notturmo).
- Post, H.R. (1970): Correspondence, Invariance and Heuristics, *Studies in History and Philosophy of Science* 1.
- Primas, H. (1983): *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism. Perspectives in Theoretical Chemie*, Springer, Berlin.
- Prosen, T. (1994): Numerical Demonstration of the Semiclassical Matrix Element Probability Distribution between Integrability and Chaos, *Journal of Physics A* 27.
- Prosen, T./ Robnik, M. (1994): Semiclassical Energy Level Statics in the Transition Region between Integrability and Chaos: Transition from Brody-like to Berry-Robnik Behaviour, *Journal of Physics A* 27.
- Putnam, H. (1990): *Realism with a Human Face* (ed. Conant, J.), Harvard University Press, Cambridge MA.
- Radder, H. (1991): Heuristics and the Generalized Correspondence Principle, *The British Journal for the Philosophy of Science* 42.
- Rae, A. (1986): *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Redhead, M. (1993): Is the End of Physics in Sight?, in: French et al.(1993).
- Renn, J. (1993): Einstein as a Disciple of Galileo. A Comparative Study of Concept Development in Physics, *Science in Context* 6.
- Rogers, E.M. (1960): *Physics for the Inquiring Mind: The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton University Press, Princeton NJ.
- Rohrlich, F. (1988): Pluralistic Ontology and Theory Reduction in the Physical Sciences, *The British Journal for the Philosophy of Science* 39.
- Röseberg, U. (1992): *Niels Bohr. Leben und Werk eines Atomphysikers*, Spektrum, Heidelberg.
- Röseberg, U. (1995): Did They Just Misunderstood Each Other? Logical Empiricists and Bohr's Complementary Argument, in: Gavroglu et al.(1995).
- Rosenberg, J.F. (1980): Coupling, Rethoretization, and the Correspondence Principle, *Synthese* 45.

- Rosenfeld, L. (1961): Foundations of Quantum Theory and Complementarity, *Nature* 190.
- Rosenfeld, L. (1967): Niels Bohr in the Thirties, in: Rozentel (1967).
- Rosenfeld, L./ Rüdinger, E. (1967): The Decisive Years 1911-1918, in: Rozentel (1967).
- Rozental, S.(ed.) (1967): *Niels Bohr, His Life and Works As Seen By His Friends and Colleagues*, North-Holland, Amsterdam.
- Scheibe, E. (1973): *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, Pergamon, Oxford.
- Scheibe, E. (1997): *Die Reduktion physikalischer Theorien: Ein Beitrag zur Einheit der Physik*, Springer, Berlin.
- Schiller, R. (1967): Relations of Quantum to Classical Physics, in: Bunge (1967).
- Schilpp, P.A. (ed.) (1970): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle Illinois.
- Schrödinger, E. (1926a): Quantisierung als Eigenwertproblem, *Annalen der Physik* 79.
- Schrödinger, E. (1926b): Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen, *Annalen der Physik* 79.
- Schrödinger, E. (1926c): Quantisierung als Eigenwertproblem (3. Mitteilung), *Annalen der Physik* 80.
- Schrödinger, E. (1926d): Quantisierung als Eigenwertproblem (4. Mitteilung), *Annalen der Physik* 81.
- Schrödinger, E. (1935): Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Naturwissenschaften* 23.
- Schrödinger, E. (1952): Are there Quantum Jumps? (Part I, II), *The British Journal for the Philosophy of Science* 3.
- Selleri, F. (1990): *Die Debatte um die Quantentheorie* (3.ed.), Vieweg, Braunschweig.
- Selleri, F. (ed.) (1992): *Wave-Particle Duality*, Plenum Press, New York.
- Shimony, A. (1988): Die Realität der Quantenwelt, *Spektrum der Wissenschaft*, März/1988.
- Sommerfeld, A. (1922): *Atombau und Spektrallinien* (3. Aufl.), Vieweg, Braunschweig.
- Sommerfeld, A. (1924): Grundlage der Quantentheorie des Bohrschen Atommodells, *Naturwissenschaften* 12.
- Sommerfeld, A. (1927): Zum gegenwärtigen Stande der Atomphysik, *Physikalische Zeitschriften* 28.
- Srilar, M. (1992) (Hrsg.), *Kultur und Natur*, Lang, Bern.
- Stapp, H.P. (1972): The Copenhagen Interpretation, *American Journal of Physics* 40.
- Stegmüller, W. (1973): *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie, und Analytischen Philosophie*. Band 2: *Theorie und Erfahrung*, Zweiter Halbband: *Theorienstrukturen und Theoriendynamik*, Springer, Berlin.
- Stegmüller, W. (1987): *Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie (Bd.III)*, Kröner, Stuttgart.

- Stolzenburg, K. (1977): *Die Entwicklung des Bohrschen Komplementaritätsgedankens in den Jahren 1924 bis 1929*, Dissertation an der Uni Stuttgart (TH).
- Suppe, F.(ed.) (1974): *The Structure of Scientific Theories*, University of Illinois Press, Urbana.
- Suppes, P. (1993): *Models and Methods in the Philosophy of Science: Selected Essays*, Kluwer, Dordrecht.
- Suppes, P./ Henkin, L./ Joja, A./ Moisil, G.C. (eds.) (1973): *Logic, Methodology and Philosophy of Science* (Proceedings of the Fourth International Congress for Logic, Methodology and Philosophy of Science, Bucharest, 1971), North-Holland, Amsterdam.
- Szumilewicz, I. (1977): Incommensurability and the Rationality of the Development of Science, *The British Journal for the Philosophy of Science* 28.
- Teller, E./ Teller, W./ Talley, W. (1991): *Conversations on the Dark Secrets of Physics*, Plenum Press, New York.
- Thackray, A.(ed.) (1995): *Constructing Knowledge in the History of Science* (Osiris, Vol.10), History of Science Society.
- Ullmann-Margalit, E.(ed.) (1988): *Science in Reflection* (The Israel Colloquium: Studies in History, Philosophy and Sociology of Science, Vol.3), Kluwer, Dordrecht.
- Ullmann-Margalit, E.(ed.) (1992): *The Scientific Enterprise* (The Bar-Hillel Colloquium: Studies in History, Philosophy and Sociology of Science, Vol.4), Kluwer, Dordrecht.
- van der Waerden, B.L.(ed.) (1967): *Sources of Quantum Mechanics*, North-Holland, Amsterdam.
- van Vleck, J.H. (1924): The Absorption of Radiation by Multiply Periodic Orbits, and Its Relation to the Correspondence Principle and the Rayleigh-Jeans Law, *The Physical Review* 24.
- Weart, S.R./ Phillips, M. (eds.) (1985): *History of Physics: Readings from Physics Today*, American Institute of Physics, New York.
- Weidner, R.T./ Sells, R.L. (1960): *Elementary Modern Physics*, Allyn&Bacon, Boston.
- Weiner, C. (ed.) (1977): *History of Twentieth Century Physics* (Proceedings International School of Physics <<Enrico Fermi>> LVII), Academic Press, New York.
- Weinert, F. (1994): The Correspondence Principle and the Closure of Theories. Two Incompatible Aspects of Heisenberg's Philosophy of Science, *Erkenntnis* 40.
- Weizsäcker, C.F.v. (1988), *Aufbau der Physik*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München (1. Ausgabe (1985): Hanser, München)
- Weizsäcker, C.F.v. (1990): *Die Tragweite der Wissenschaft*, Hirzel, Stuttgart.
- Wheeler, J.A./ Zurek, W.H. (eds.) (1983): *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton.
- Wichmann, E.H. (1967), *Quantum Physics* (Berkeley Physics Course, Vol.4), McGraw Hill, New York.

Williams, L.P. (1975): Should Philosophers Be Allowed to Write History?, *The British Journal for the Philosophy of Science* 26.

Wilson, D. (1983): *Rutherford, Simple Genius*, MIT Press: Cambridge MA.

Wintgen, D./ Friedrich, H. (1991): The Status of Semiclassical Methods for Chaotic Systems, *Comments on Atomic and Molecular Physics* 25.

Zahar, E. (1983): Logic of Discovery or Psychology of Invention?, *The British Journal for the Philosophy of Science* 34.