

**Der Relationalismus von Leibniz und die Krise
der Anschauung in der Quantenmechanik**

Inauguraldissertation
zu Erlangung des Grades eines Doktors der Philosophie

dem Fachbereich Gesellschaftswissenschaften
und Philosophie

der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Ralf Herbig

aus Marburg

2009

vom Fachbereich Gesellschaftswissenschaften
und Philosophie als Dissertation angenommen

Tag der Disputation

07. Mai 2009

1. Gutachter

Prof. Dr. Peter Janich

2. Gutachter

Prof. Dr. Horst Bredekamp

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1 Einleitung	3
1.1 Das Problem	3
1.2 Die präzedierende Zeeman-Ellipse	7
1.3 Anschaulichkeit	9
1.4 Der Angriff auf das Anschauungsproblem	14
2 Konzepte physikalischer Raumbildung	18
2.1 Aspekte physikalischer Anschaulichkeit	18
2.2 Der Feldraum von Faraday	23
2.3 Die energetischen Räume von Lagrange, Maxwell und Lorentz	29
2.3.1 Lagrange	29
2.3.2 Maxwell	32
2.3.3 Lorentz	40
2.4 Modelle „für etwas“	41
2.5 Die Kinematik des Zeeman-Effektes	44
3 Die Heisenbergsche Quantenmechanik	45
3.1 Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik	45
3.2 Das Korrespondenzprinzip	46
3.3 Die virtuellen Oszillatoren	49
3.4 Die Heisenbergsche Vertauschungsrelation	57
4 Die Deutung der Quantenmechanik	63
4.1 Die Wellenmechanik	63
4.2 Heisenbergs Deutung der Vertauschungsrelation	68
4.3 Der Bilder-Dualismus von Wellenbild und Teilchenbild	72

5	Kultur und Quantenphysik	84
5.1	Das Prinzip der Beobachtbarkeit bei Heisenberg	84
5.2	Einsteins Kritik am Positivismus	86
5.3	Das Messgeräte-Apriori des Methodischen Kulturalismus	88
5.4	Kritik der Unbestimmtheitsrelation	91
5.5	Das Apriori der Erhaltung der Lichtmenge	99
6	Der Beitrag von Leibniz	102
6.1	Einleitung	102
6.2	Leibniz' reiner Ordnungsraum	102
6.3	Die geometrische Charakteristik	110
6.4	Perspektivismus und Wissen	117
6.5	Die Matrizenmechanik als Leibnizscher Relationalismus	126
7	Ausblick	129
7.1	Background independent theories	129
7.2	Der Grundsatz der Beschleunigungsrelativität	132
7.2.1	Das Machsche Prinzip	132
7.2.2	Das Einsteinsche Äquivalenzprinzip	134
7.2.3	Grundlegung eines beschleunigungsrelativen Elektromagnetismus	139
7.3	Ansätze einer diskreten Quantenzahl-Kinematik	144
	Schluss	148
8	Literaturverzeichnis	152

Vorwort

Der vorliegende Versuch geht auf eine vor zehn Jahren begonnene Beschäftigung mit der Protophysik von Peter Janich und auf ein Seminar über „Relativitätstheorie und Kunst der Moderne“ zurück, das im Sommersemester 2004 unter der Leitung von Horst Bredekamp an der Humboldt- Universität zu Berlin stattfand.

Meine Diplomarbeit „Zur konstruktivistischen Begründung der physikalischen Geometrie“ hatte sich mit der Protophysik und ihrer Begründung der euklidischen Geometrie auf handlungstheoretischer Basis beschäftigt. Das zentrale Anliegen der Protophysik, eine rationale Begründung historisch vorfindlicher physikalischer Messpraxen zu geben, so wurde mir später bewusst, musste auf einen Konflikt treffen, wenn die Quantenmechanik behauptete, dass es naturgesetzliche Grenzen physikalischer Messbarkeit gebe. Das Interesse an dieser Frontstellung zwischen Protophysik und Quantenmechanik war geweckt. Je intensiver ich mich in die Problematik einarbeitete, desto mehr wurde mir klar, wie unterschiedlich physikalische und philosophische Argumentationen zuweilen sein können. Das Rüstzeug der methodischen Philosophie erwies sich als schlagkräftiges Werkzeug, mit dem sich ein Pfad durch das Gehölz der schwer entwirrbaren und manchmal sogar widersprüchlichen Äußerungen der Protagonisten der Quantenphysik bahnen ließ. Hans Reichenbach hatte den Dualismus zwischen Wellen- und Teilchenbild zum Anlass genommen, die Heisenbergsche Einschränkungregel ins Zentrum seiner philosophischen Betrachtungen zur Quantenmechanik zu rücken. Heisenbergs Regel wurde von der Kopenhagener Interpretation als Ausweg aus der Bild-Krise benutzt. Nun kam es darauf an, die von Reichenbach auf halbem Wege liegen gelassene Kritik des Kopenhagener Vorgehens fortzuführen. Im Bewusstsein, dass die Physik ihre Analogien und Modelle „für etwas“ bildet, nämlich für den handelnd zu bewältigenden Umgang mit dem natürlich Vorfindlichen, war die Bilder- Dualität der Quantenmechanik für einen handlungstheoretischen und kulturhistorischen Diskurs zu öffnen. Es ergaben sich durch den vorgeschlagenen Modellbegriff auch Spielräume für eine ikonologische Behandlung der quantenmechanischen Anschauungskrise.

Das kunsthistorische Seminar bei Professor Bredekamp war eine Erhellung für mich, indem es mir einen bislang unbekannt gebliebenen bildwissenschaftlichen Zugang zu Problemen der modernen Physik eröffnete. Von den Anregungen Horst Bredekamps nicht nur im Einstein-Seminar, sondern darüber hinaus in Gesprächen bei mancherlei Gelegenheit, habe ich in be-

sonderer Weise profitiert. Sein Buch über den „sehenden Leibniz“ hat mich stets inspiriert, den eingeschlagenen Weg weiterzugehen. Den Herren Professoren Janich und Bredekamp ist zu danken für die Bereitschaft, die vorliegende Arbeit zu betreuen und zu begutachten.

Für geduldiges Zuhören und Diskutieren über philosophische Fragen der Physik danke ich Josu Zabaleta besonders herzlich. In Computerangelegenheiten hat mir The Anh Dang mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Schließlich bin ich Dr. Dieter Suisky zu Dank verpflichtet. Während ich mich in die Quantenmechanik Heisenbergs und Schrödingers vertiefte, hat er mich immer wieder auf Anknüpfungsmöglichkeiten zur Philosophie von Gottfried Wilhelm Leibniz aufmerksam gemacht.

Der vorliegende Text ist die korrigierte Fassung meiner dem Fachbereich Gesellschaftswissenschaften und Philosophie der Philipps-Universität Marburg am 15. Oktober 2008 vorgelegten Dissertation.

Diesen Versuch übereigne ich all denjenigen Tieren, Pflanzen und Blumen, die meiner Mutter teuer waren. Manches Mal war mir während des Nachdenkens und anschließenden Zusammenschreibens die oberhessische Hügellandschaft gegenwärtig, welche meine Heimat ist, und auch ihre war.

1 Einleitung

1.1 Das Problem

Seit Bekanntwerden der Relativitätstheorie, noch mehr seit dem Aufkommen der Quantenmechanik, ist viel von der Unanschaulichkeit der modernen Physik gesprochen worden. Beide Theorien standen von Anfang an im Verdacht, durch ihre Unanschaulichkeit ein wesentliches Paradigma physikalischer Naturforschung zu sabotieren: Der Verstehbarkeit der Naturerscheinungen durch die Möglichkeit materialisierter und mentaler Bilder gerecht zu werden. Die Kinematik der Relativitätstheorie führte, um nur ein charakteristisches Beispiel von Unanschaulichkeit zu geben, so viele Zeiten ein, wie es Bezugssysteme für die geometrisch-kinematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge gibt, und das sind gemäß dem von Einstein auf die Elektrodynamik bewegter Körper erweiterten Galileischen Relativitätsprinzip unendlich viele. Die Idee einer einheitlichen, universellen Zeit, die bisher allen physikalischen Theorien zu Grunde gelegt worden war, war damit erstmalig bestritten worden. Die Quantenmechanik schließlich wollte in noch radikalerer Weise die in mehrhundertjähriger Entwicklung entstandenen mechanischen Begriffsbildungen überhaupt, also nicht nur Ort und Zeit, sondern auch Impuls und Energie in ihrer Anwendbarkeit auf Mikrokörper einschränken. Ein derartiges Einschränkungsprinzip war den bis dahin geltenden physikalischen Theorien völlig fremd gewesen, hatte aber rückwirkend einen starken Einfluss selbst auf die kinematischen und mechanischen Grundbegriffe der Physik. Die moderne Physik gelangte zu der bemerkenswerten Situation, dass sie im Ausbau ihres Theoriengebäudes selbst an ihren Grundlagen Änderungen vornehmen zu müssen glaubte, an denselben Grundlagen übrigens, die bisher den ganzen Bau der Physik getragen hatten.

Der Terminus „Anschaulichkeit“ kann losgelöst von Kants Theorie der Erfahrung kaum angemessen erörtert werden, und die Tatsache, dass Kants Vorstellungen auf die Philosophie des

neunzehnten Jahrhunderts eine bestimmende Wirkung ausgeübt hatten, machte eine Konfrontation der modernen Physik mit der zeitgenössischen Philosophie beinahe unvermeidlich. Die neuzeitliche Physik hatte ihr Selbstverständnis aus dem Anspruch nach einer Form von Objektivität heraus entwickelt, die von einer Trennung von Beobachter und Welt gekennzeichnet ist. Bereits Kopernikus und Galilei erkannten, dass der Fortschritt von Astronomie und Mechanik nur um den Preis einer Abkehr vom Unmittelbaren zu erkaufen war. Dieser Objektivitätsanspruch der Physik ist auch der Hintergrund von Kants Theorie der Erfahrung, die beide nunmehr scharf getrennten Bereiche, Welt und Subjekt, dadurch in Einklang zu bringen sucht, dass sie die Unhintergebarkeit gewisser Erkenntnisbedingungen behauptet, ja dass sie das Subjekt sogar die Gegenstände jedweder möglichen Erfahrung konstituieren lässt. Genauer ist Kants Theorie zufolge Erfahrung nur möglich im Zusammenspiel von Sinnlichkeit und Verstand, von Anschauung und Begriffen, das heißt von räumlichen und zeitlichen Anschauungsvermögen einerseits, den durch die Kategorien verbürgten Urteilsvermögen andererseits. Beide, Sinnlichkeit und Verstand, sind Dispositionen des Subjekts, sie gelten vor aller Erfahrung, und sie sind unabänderlich: Der Verstand schreibt der Natur das Gesetz vor, nicht umgekehrt die Natur dem erkennenden Subjekt. Dass die zum Erfassen von Naturvorgängen notwendigen Anschauungsvermögen durch die neuen physikalischen Theorien eine Änderung oder Einschränkung ihres Gültigkeitsbereichs erfahren sollten, musste die in der Tradition der Kantischen Lehre stehenden Philosophien deshalb zum Widerspruch herausfordern.

Die Anschaulichkeit ist, indem sie sich auf ein Sinnesvermögen, das Sehen, bezieht, gekoppelt an Visualisierbarkeit und Bildlichkeit. Solange man sich eher unbewusst an die Maxime der visuellen Darstellbarkeit hielt, und dies war in der physikalischen Theoriebildung im neunzehnten Jahrhundert durchgängig der Fall, konnte ein Problem der Anschaulichkeit gar nicht entstehen. Die Visualisierungen, welche die Physiker des neunzehnten Jahrhunderts vornahmen, wurden getragen vom mechanistischen Weltbild, von der Auffassung, alle physikalischen Vorgänge müssten sich letzten Endes in Bewegungsvorgänge auflösen lassen. Folglich waren die Modelle, welche etwa James Clerk Maxwell oder Ludwig Boltzmann entwarfen, um zu einem Verständnis der elektromagnetischen Wechselwirkungen zu kommen, mechanische oder hydrodynamische „Maschinen“. Die Physik wurde als eine Variation der in der Mechanik gebildeten Grundbegriffe von Raum, Zeit und Materie entwickelt. Es war wohl Ernst Mach, der als erster gegen den Glauben an die Mechanisierbarkeit aller Naturvorgänge intervenierte. In einer 1872 erschienenen Schrift „Über den Satz von der Erhaltung der Arbeit“ wies Mach nach, dass der Energieerhaltungssatz, der in mathematischer Fassung zuerst in der Mechanik

bewiesen werden konnte, keineswegs an das mechanistische Weltbild gekoppelt sei, sondern dass die Wurzel dieses Satzes viel tiefer reiche. Mach gab dem Energiesatz die Fassung, dass Arbeit nicht aus dem Nichts erzeugt werden kann, das heißt er sprach ihn als Prinzip vom ausgeschlossenen perpetuum mobile aus. Als wichtigstes Argument konnte Mach anführen, „dass das Prinzip vom ausgeschlossenen perpetuum mobile sich nicht auf die Mechanik gründen kann, da ... dessen Gültigkeit lange vor dem Ausbau der Mechanik gefühlt wurde“.¹ Als Kronzeugen für seine These führt Mach Stevin, Bernoulli und andere Förderer der Mechanik an. Mach warf Hermann von Helmholtz Zirkularität vor, wenn dieser den Satz von der Erhaltung der Arbeit dadurch bewiesen zu haben glaubte, dass er den für die Mechanik, genauer für die Zentralkräften unterliegenden mechanischen Systeme sichergestellten mathematischen Beweis auf die gesamte Physik erweitern wollte, indem er alle Vorgänge in der Natur auf Zentralkraftsysteme möglicherweise unsichtbarer Art reduziert wissen wollte. Mach zeigte zwar ein gewisses Verständnis für die Tendenz der Physik seiner Zeit, alles auf Bewegungsvorgänge von Körpern oder Teilchen im Raum zurückzuführen, wenn er schrieb:

„Wenn wir heute glauben, dass die mechanischen Thatsachen verständlicher sind wie andere, dass sie die Grundlage für andere physikalische abgeben könnten, so ist dies eine Täuschung. Es liegt dies daran, dass die Geschichte der Mechanik älter und reicher ist als jene der Physik, dass wir mit mechanischen Thatsachen länger auf einem vertrauten Fuss gestanden.“²

Indem er auf die Fruchtbarkeit der „kritisch- historischen Methode“ zur Klärung des methodologischen Aufbaus der physikalischen Terminologie hinwies, deutete Mach zugleich an, dass die Physik, freilich ihrem Selbstverständnis entgegen laufend, notwendig vorwissenschaftlichen Wissens bedarf, und dass in der Physik auch unbewiesene Voraussetzungen Platz haben. Freilich maß Mach jenen Setzungen keine erkenntnistiftende, sondern lediglich eine unter Aspekten der Denkökonomie zu bewertende erkenntnisorganisierende Rolle zu: Es sei Aufgabe einer kritischen Physikgeschichtsschreibung, auf unbegründete Bevorzugungen der Mechanik hinzuweisen und Alternativen aufzuzeigen, um die Physiker in die Lage zu versetzen, die außermechanischen Zweige der Physik gegebenenfalls zweckmäßiger zu beschreiben. In Verschärfung des Machschen Ansatzes wird der vorliegende Versuch getragen von der Überzeugung, dass in der Physik Setzungen eine Rolle spielen *müssen*, welche von der Fachwissenschaft Physik selbst nicht mehr thematisiert werden können, und noch viel weniger allein

¹[Mach 1909], S. 19.

²[Mach 1909], S. 32.

unter der Perspektive der Denkökonomie.

Die Quantenmechanik wurde 1925 von Werner Heisenberg und, wenige Monate später, in mathematisch anderer Form, von Erwin Schrödinger entwickelt. Die Quantenmechanik sollte die auf Mikrovorgänge nicht mehr ohne grobe Eingriffe anwendbaren Gesetze der klassischen Mechanik so abändern, dass sich eine den Bedürfnissen der Quantenphysik fügende neue Mechanik, eine „Quantenmechanik“, ergab. In der Folgezeit setzte, ähnlich wie bei der Relativitätstheorie, eine Debatte um die Deutung der quantenmechanischen Formeln ein. Diese Debatte ist heute noch immer nicht abgeschlossen. Wichtigster Ansatzpunkt der Kritik ist die Behauptung der Unmöglichkeit einer Objektivierbarkeit der Phänomene in dem Sinne, dass eine Beschreibung eines mikrophysikalischen Vorgangs nicht mehr beobachterunabhängig möglich sein soll, welche Forderung bis dahin als eine der wichtigsten Prämissen aller Naturwissenschaft gegolten hatte und von Einstein auch nach der Entdeckung der Quantenmechanik weiter reklamiert wurde. Ein anderer Punkt ist die auf Bohr zurückgehende Behauptung, dass die Quantenphänomene keine in Raum und Zeit einerseits, im Kausalnexus andererseits einheitliche Verbildlichung mehr besäßen; dies ist der Inhalt des Komplementaritätsprinzips, welches Bohr zuerst in der Form aussprach: „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.“³ Jene Komplementarität veranlasste Ernst Cassirer zu der Feststellung, dass wir „die Kausalität nicht mehr in derselben Weise wie in der klassischen Physik mit der Raum-Zeitbeschreibung verbinden ... können“, so dass Cassirer, Kants Lehre von dem notwendigen Zusammengehen von Sinnlichkeit und dem Verstandesgrundsatz der Kausalität vor Augen, glaubte, von einer „Krise der Anschauung“ sprechen zu müssen.⁴ Heisenberg schlug 1927 das Konzept einer neuartigen Anschaulichkeit vor, das von der noch zu erörternden Leibniz-Machschen Alternative einer flexiblen Raumkonzeption nichts wusste und eben dadurch zu einem sehr eingeschränkten Begriff von Anschaulichkeit Zuflucht nehmen musste, um diese nur irgendwie zu retten:

„Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, dass die

³[Bohr 1928], S. 18.

⁴[Cassirer 1937], S. 315.

Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält.“⁵

Jener bescheidene, ja resignative Begriff von Anschaulichkeit, der nicht mehr viel mit Kants notwendiger Bildlichkeit von Denkakten gemeinsam hat, kontrastiert in auffallender Weise gegen die tatsächliche Auffindung der Quantenmechanik, indem Heisenberg sich eines Ersatzmodells für den Vorgang der Lichtentstehung im Atom bediente, um zu den Grundgleichungen seiner Quantenmechanik vorzustoßen.

1.2 Die präzedierende Zeeman-Ellipse

Glühende Körper senden weißes Licht aus. Die Zerlegung dieses Lichtes ergibt ein kontinuierliches Spektrum, das heißt ein zusammenhängendes Band von Rot bis zu Violett. Regt man Gase zum Leuchten an, so wird im Unterschied dazu ein diskretes Linienspektrum erhalten. Ein Paradebeispiel gibt das Balmer-Spektrum des Wasserstoffs ab. Diese diskreten Spektren sind für die chemische Natur des betreffenden Gases charakteristisch, so dass die Untersuchung des Spektrums umgekehrt zum Nachweis des Vorhandenseins einzelner Elemente in der Lichtquelle dienen kann.

Der holländische Physiker Pieter Zeeman entdeckte 1896, dass die Spektrallinien bei Einwirkung eines starken Magnetfeldes auf das leuchtende Gas verändert werden, derart, dass jede ohne Magnetfeld vorhandene Linie durch die Einwirkung des Magnetfeldes in drei Linien aufgespalten wird. Die ursprüngliche Spektrallinie bleibt an ihrer Stelle auf dem Schirm, der sich hinter dem Spektrometer befindet, verringert jedoch ihre Helligkeit zugunsten der beiden hinzukommenden Linien, die symmetrisch links und rechts von der Ausgangslinie angeordnet sind. Die Stärke der Aufspaltung, das heißt des Abstandes der hinzugekommenen Linien von der ursprünglichen, ist proportional der Stärke des äußeren Magnetfeldes.

Die Quantentheorie war aus dem Bedürfnis entstanden, die Existenz der diskreten Spektren rechnerisch nachvollziehen zu können, da nach der klassischen Elektrodynamik nur kontinuierliche Spektren möglich waren. Hendrik Antoon Lorentz gelang es dennoch, kurz nach der Zeemanschen Entdeckung eine Deutung der Term-aufspaltung zu geben, und zwar allein auf klassischer, elektrodynamischer Grundlage, obwohl die Existenz der diskreten Linien selbst

⁵[Heisenberg 1927], S. 172.

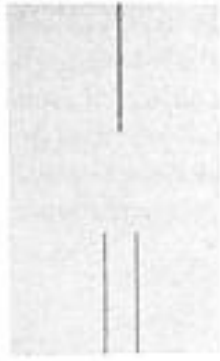


Abbildung 1.1: Zeeman-Effekt der roten Cadmium-Linie ([Pohl 1976], S. 232, Abb. 14.71)

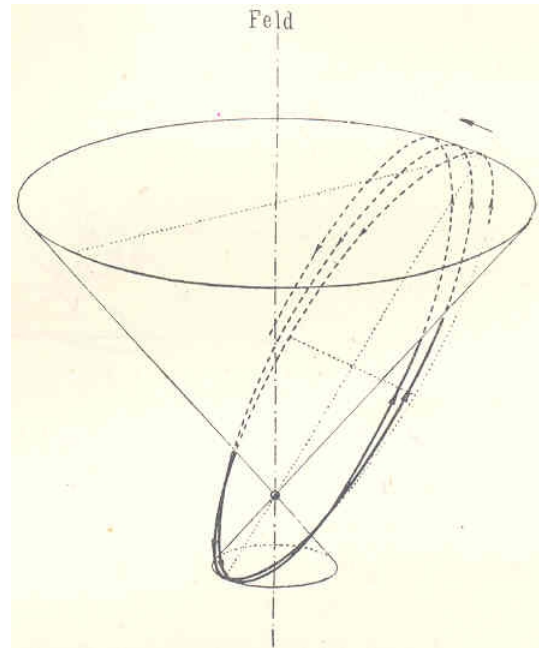


Abbildung 1.2: Larmorpräzession ([Buchwald 1923], S. 63, Abb. 11)

unverstanden blieb.⁶ Die von Lorentz berechnete Frequenzverschiebung, die der Aufspaltung der Linien entspricht, beträgt sowohl nach der Theorie von Lorentz als auch nach der Quantenmechanik $\omega \pm \frac{1}{2} \frac{e}{m} B$; unter ω ist die Frequenz der Spektrallinie ohne Magnetfeld verstanden. Der Ausdruck für die Frequenzverschiebung beim Zeeman-Effekt spiegelt die klassische Vorstellung von geschlossenen Elektronenbahnen im Atom wieder, die unter dem Einfluss des äußeren Magnetfeldes B eine Präzession der Frequenz $\Omega_{Larmor} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B$ ausführen; dies ist ein klassisches elektronentheoretisches Resultat von Lorentz und Larmor, welches durch Abbildung 1.3 veranschaulicht wird: Die mit „Feld“ beschriftete Vertikallinie fällt mit der Richtung des homogenen äußeren Magnetfeldes B zusammen. Auf dem Kegelmantel rollt eine ellipsenförmige Elektronenbahn ab. Der Abrollvorgang wird verursacht durch ein vom Magnetfeld auf die Elektronenbahn ausgeübtes Drehmoment. Wie bei einem Kreisel stellt das Drehmoment die Ellipse nicht parallel, sondern die Ellipse sucht dem Kippen in die Vertikale auszuweichen, indem es eine Präzessionsbewegung entlang des Kegelmantels ausführt.

Das von klassischen Vorstellungen getragene Bild der Bahnpräzession hat seine Berechtigung

⁶Z. B. H. A. Lorentz, „Influence du champ magnetique sur l' emission lumineuse“, Collected papers, Vol. III, The Hague 1936, S. 40- 46.

und darf, ohne dass damit gegen ein quantenmechanisches Prinzip verstoßen würde, zur bildhaften Darstellung gebracht werden. Während jedes Atommodell selbst unvermeidliche Härten besitzt, so dass sich aus eben diesem Grund kein Bild eines Atommodells in dieser Arbeit findet, ist der physikalische Gehalt der präzedierenden Zeeman-Ellipse ohne Einschränkung visualisierbar. Zwar können die ungestörten Spektralfrequenzen selbst nicht ohne die Quantentheorie und die diese Theorie tragende fundamental neue Naturkonstante, das Plancksche Wirkungsquantum \hbar , berechnet werden, aber in der *Verschiebung* $\Delta\omega_{\text{Zeeman}} = \pm\Omega_{\text{Larmor}}$ kommt die Plancksche Konstante überhaupt nicht vor; in ihr ist, wie A. Sommerfeld es formuliert, die Quantentheorie „latent“ geworden.⁷ Als Resultat lässt sich festhalten, dass es Teile der Partikelvorstellung des atomar umlaufenden Elektrons gibt, die durch die Quantenmechanik nicht modifiziert werden. Die Deutung der Zeemanschen Termverschiebungen lässt eine unproblematische Anwendung klassischer Partikelvorstellungen auf einen noch näher zu bestimmenden Aspekt der inneratomaren Elektronenbewegung zu. Es handelt sich um keine bloße Anekdote der Quantentheorie, dass Elemente des Zeeman-Effektes aus den Strukturen der klassischen Physik heraus verstanden werden können.

Die Larmorpräzession ist zunächst ein anschauliches Modell des Vorgangs der Termverschiebung. Da die inneratomare Elektronenbewegung unsichtbar ist, so ist es Lorentz und Larmor hier gelungen, eine der klassischen Physik unterliegende Veranschaulichung eines unsichtbaren, mit der Lichterzeugung im Atom zusammenhängenden Vorganges zu geben. Der Akt der quantenhaften Lichterzeugung wurde 1925 von Heisenberg durch ein klassisches Ersatzbild virtueller Oszillatoren dargestellt. Damit gibt es mindestens zwei Elemente der quantenphysikalischen Lichtentstehung, die auf einem klassisch-anschaulichen Bild fixiert werden können. Auch die Präzession der Zeeman-Ellipse gehört also dazu. Es gilt herauszufinden, ob die Herrschaft der Anschaulichkeit der klassischen Physik auf quantenphysikalischem Gebiet noch weiter ausgedehnt werden kann.

1.3 Anschaulichkeit

Seit Kant ist „Anschauung“ ein *terminus technicus* der Philosophie und bezeichnet in der Transzendentalphilosophie ein spezielles Erkenntnisvermögen, welches die vorkantische Philosophie in dieser betonten Form nicht kannte. Kant spricht von Raum und Zeit als reinen

⁷[Sommerfeld 1978], Bd. I, S. 356.

Formen der Anschauung und meint damit Erkenntnisvermögen, die uns zuallererst das Material für den Denkvorgang lieferten, während der Verstand dazu bestimmt sei, das ihm durch die Anschauung gebotene Material in Urteilen zu verknüpfen. Er unterscheidet zwischen Anschauungen und Begriffen, um den Unterschied zwischen der Sinnlichkeit und dem Verstand als zwei getrennten Stämmen der Erkenntnisgewinnung zu markieren. Zwar sind Sinne und Verstand eigenständige Vermögen, jedoch wird Erkenntnis erst im Zusammenspiel beider möglich; zu Bekanntheit gekommen ist Kants Ausspruch, dass Gedanken ohne Inhalt leer und Anschauungen ohne Begriffe blind seien.⁸ Dagegen seien die durch keine Anschauungen gedeckten Begriffe leer oder transzendent; das sind die Begriffe von Gott, von der Welt und der Seele, von denen eine sichere Wissenschaft unmöglich zu begründen sei. Das platonische Misstrauen gegen die Sinnlichkeit und die Tendenz der Philosophie, die Gegenstände des Denkens von allen bildhaften Vorstellungen zu reinigen - so könnte Kant ergänzt werden - haben erst die Antinomien der Metaphysik, also etwa den Widerspruch zwischen der Endlichkeit und der Unendlichkeit der Welt, möglich gemacht. Daher sei es nicht nur ein erfolgloses, sondern auch gefährliches Unterfangen, alle bildlichen Vorstellungen von den Begriffen abzusondern, denn die Objektivität eines Begriffs, also seine Beziehung auf einen Gegenstand möglicher Erfahrung, könne eben nur durch die Verknüpfung von Sinnlichkeit und Verstand gesichert werden. Prägnant ist die Formulierung in dem Aufsatz „Was heißt: Sich im Denken orientieren?“ von 1786, wo es heißt: „Wir mögen unsere Begriffe noch so hoch anlegen und dabei noch so sehr von der Sinnlichkeit abstrahieren, so hängen ihnen doch noch immer bildliche Vorstellungen an ... Denn wie wollten wir auch unseren Begriffen Sinn und Bedeutung verschaffen, wenn ihnen nicht irgendeine Anschauung ... untergelegt würde.“⁹ Die räumliche und zeitliche Anschauungsform unterliegen nach Kant gewissen „Regeln der Sinnlichkeit“. Kant sagt kaum etwas darüber, auf welche Weise der Raumanschauung gewisse Strukturen auferlegt werden. Es hat dies mit Kants transzendentaler Beweisführung zu tun; diese besteht darin, die Notwendigkeit einer Erkenntnisstruktur indirekt zu beweisen: Ein Problem der Erkenntnistheorie, das bisher für unlösbar gehalten wurde, sei dann lösbar, wenn die von ihm vorgeschlagenen Erkenntnisfunktionen und ihre Verknüpfung als gültig angenommen werden. In diesem Sinne lasse sich der Erfolg der Physik als Wissenschaft, insbesondere ihre Mathematisierbarkeit, nur verstehen, wenn angenommen werde, dass die Formen unserer räumlichen und zeitlichen so-

⁸Kritik der reinen Vernunft, B 75.

⁹Akademie- Ausgabe von Kants Gesammelten Werken, Bd. VIII, S. 133. Vgl. eine entsprechende Aussage von Leibniz: „*Je ne trouve pourtant, qu'il n'y a jamais pensée abstraite, qui ne soit accompagnée de quelques images ou traces matérielles*“; zitiert nach [Bredenkamp 2004], S. 21- 22, Anm. 52.

wie unserer urteilserzeugenden Erkenntnisfunktionen dem reinen, also noch inhaltsleeren Teil der Naturwissenschaften ihre Form aufprägen. Die Objektivität der räumlichen und zeitlichen Strukturen in den Gegenständen der Physik ergibt sich dann für Kant einfach daraus, dass er die „Wirklichkeit“ der Physik als Wissenschaft für nicht bezweifelbar hält.¹⁰ Ebenso wenig lässt sich Kant darüber aus, wie man sich das Zusammenspiel von Anschauung und Denken bei der Bildung von „Erfahrung“ in ihrer Wirkungsweise genau vorzustellen hat. Der indirekte Beweis für den Transzendentalismus glaubt darauf verzichten zu können, das Verhältnis zwischen Anschauung und Denken *en detail* herauszuarbeiten. Kant selbst gibt zu:

„Wir konnten doch keinen Grund angeben, warum wir gerade eine solche Art der Sinnlichkeit und eine solche Natur des Verstandes haben, durch deren Verbindung Erfahrung möglich wird; noch mehr, warum sie, als sonst völlig heterogene Erkenntnisquellen, (...) zu der Möglichkeit einer Erfahrung von der Natur unter ihren mannigfaltigen besonderen (...) Gesetzen, von denen uns der Verstand *a priori* nichts lehrt, doch so gut immer zusammenstimmen, als wenn die Natur für unsere Fassungskraft absichtlich eingerichtet wäre; dieses konnten wir nicht (und das kann auch niemand) weiter erklären.“¹¹

Im neunzehnten Jahrhundert erreichte der Glaube an eine mechanistische Deutbarkeit aller physikalischen Vorgänge seinen Höhepunkt; folgerichtig sahen physikalische Modelle aus dieser Zeit oft aus wie Maschinen. Dies deutet darauf hin, dass „anschaulich“ zu dieser Zeit eine Komponente bekam von „mit technischen Mitteln nachbildbar“. Spätestens gegen Ende des Jahrhunderts wurde der Modellrealismus aufgeweicht durch den in der Hertzschen Mechanik erkannten Modellrelativismus.¹² Heinrich Hertz, ein Schüler Hermann von Helmholtz', plädierte nämlich dafür, dass es nicht auf ein mehr oder weniger zufälliges Modell ankomme, sondern auf die Möglichkeit modellhafter Nachbildbarkeit eines Naturphänomens überhaupt, und letzten Endes dafür, dass die Beziehungen zwischen den erklärungsbedürftigen Teilen eines Phänomens das Entscheidende seien, nicht die Materialisierung der Beziehungen durch das Modell. Der Modellrelativismus führte in der Philosophie zum einen zum Konventionalismus Henri Poincarès, zum anderen zur Entdeckung der Sprache als Denkmediums durch Ludwig Wittgenstein. Die erkenntnistiftende Rolle, die Kant der Anschauung zugewiesen hatte, ist in der Sprachphilosophie in den Hintergrund gerückt, stattdessen wird die Erforschung von

¹⁰Vgl. Kritik der reinen Vernunft, B 20.

¹¹Akademie- Ausgabe von Kants Gesammelten Werken, Bd. VIII, S. 249- 250.

¹²[Hertz 1894].

Sprache in ihrer Rolle beim Erkenntnisprozess forciert. Diese Entwicklungen zum Konventionalismus und zum „linguistic turn“ der Philosophie lässt sich am Beispiel der Geometrie besonders gut nachvollziehen: David Hilbert hatte in seiner Axiomatisierung der Geometrie¹³ einer bis dahin beispiellosen Relativierung der geometrischen Grundbegriffe Vorschub geleistet. Es sollte nicht mehr gefragt werden, was Punkt, Gerade und Ebene eigentlich seien, sondern die Geometrie sollte sich, nach Zugrundelegen weniger Axiome, losgelöst von dem Problem, woher diese stammten, allein in den Bahnen der logischen Deduktion bewegen. Der Auffindung von geometrischen Sätzen durch anschauliche Hilfsvorstellungen, Zeichnungen, Skizzen und Konstruktionen sollte nur mehr heuristische Bedeutung haben, die in jedem Falle vor den Richterstuhl der nachträglichen logischen Deduktion gebracht werden musste. Andererseits verschaffte die formalistische Betrachtungsweise der Mathematik eine ungeheure Freiheit. Da es vom formalen Standpunkt kein Kriterium für Zweckmäßigkeit und Sinn einer mathematischen Theorie gibt, ist der Mathematiker frei, sich mit beliebigen Dingen zu beschäftigen, wenn diese nur dem logischen Schließen zugänglich gemacht werden können. Dadurch musste ab der Jahrhundertwende die Vorstellung einer „Mathematik auf Vorrat“ bestärkt werden, der sich die Physiker bedienen könnten, wenn diese der Meinung waren, dass die gewählten mathematischen Strukturen der Struktur des physikalischen Problems angemessen wären.

Da die theoretische Physik ihre Grundkonzepte von Raum, Zeit und Bewegung stets in mathematischer Form präzisiert, griff das formalistische Verständnis auch auf die physikalischen Grundbegriffe selbst über, so dass Heisenberg schreiben konnte: „Bei dieser Sachlage scheint es geratener, zunächst einen großen Reichtum von Begriffen in eine physikalische Theorie einzuführen, ohne Rücksicht auf die strenge Rechtfertigung durch die Erfahrung, und der Natur im Einzelfall jeder Theorie die Entscheidung darüber zu überlassen, ob und an welchen Punkten eine Revision der Grundbegriffe erforderlich sei.“¹⁴ Es war der Auseinandersetzung mit den bei vielen damaligen Philosophen noch virulenten Kantischen Ideen geschuldet, dass Heisenberg und andere Quantenphysiker sich dennoch an dem Problem der Unanschaulichkeit ihrer Theorien abarbeiteten. Heisenbergs Auffassung vom Sinn der Anschaulichkeit („Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, dass die Anwendung der Theorie niemals innere

¹³[Hilbert 1899].

¹⁴[Heisenberg 1929b], S. 1- 2.

Widersprüche enthält“¹⁵) zeigte, dass die durch die Formalisierung der Mathematik vorangetriebene Aushöhlung der Anschauung in der Physik deutliche Spuren hinterlassen hatte. Die Physik wandte sich nun ihrerseits der Beschränkung der Anschauung zu, indem sie eine Neubestimmung oder Einschränkung geometrischer und kinematischer Grundbegriffe aufgrund der neuen Erkenntnisse von Relativitäts- und Quantentheorie gab.

Heisenbergs Bemerkung über die Anschaulichkeit einer physikalischen Theorie mag merkwürdig erscheinen, da man unter Anschaulichkeit zuerst eine pikturale verstehen dürfte. Eine Erzählung oder eine Idee lässt sich vielleicht anschaulich „ausmalen“, aber welchen Sinn hat eine Rede von der „Anschaulichkeit“ einer physikalischen Theorie? Carl Friedrich von Weizsäcker gibt zu bedenken, dass die klassische Physik „eine Projektion der anschaulichen Welt auf eine Ebene reiner Begriffe“ sei. Immerhin sei es „die anschauliche Welt, welche durch diese Projektion abgebildet“ werde.¹⁶ Das Operationsgebiet des Physikers ist nicht die Lebenswelt, sondern eine seit Descartes im wesentlichen auf geometrische Bestimmungen reduzierte Welt mathematisierbarer Gegenstände und Abläufe. Einen anschaulichen Vorgang beschreiben kann daher für einen Physiker nur bedeuten, seine Projektion in der - im erfolgreichen Handeln im Labor und rückwärts dann auch wieder in der Lebenswelt erprobten - Sprache der klassischen Physik zu beschreiben. Die sprachliche Beschreibung seines Tuns gibt ein Physiker in einer Sprache, die sich unter Wahrung der methodischen Reihenfolge als eine Verfeinerung der Alltagssprache gewinnen lässt. Physik ist eine Erfahrungswissenschaft; ihr Wissen von der Welt gewinnt sie in erster Linie aus dem Experiment. Das physikalische Experiment ist zuallererst ein Akt handwerklichen Könnens, so dass der erste Schritt von der Alltagssprache hin zur Sprache der Physik die Fachsprachen der Handwerke sind. Die Rückmeldung darüber, dass ein physikalisches Experiment gelungen ist, muss daher in ähnlicher Weise geschehen wie eine solche über die erfolgreiche Erledigung einer handwerklichen Aufgabe. Die Rückmeldung kann aber nur ein Vorgang der unmittelbar sinnlich erfahrbaren Welt sein.

Von Weizsäcker schreibt über die Anschaulichkeit von Modellen: „Wenn ein Physiker ... einen nicht anschaulich gegebenen Vorgang mit den Mitteln der klassischen Physik beschrieben hat, so hat er ihn damit der Welt der Anschauung so nahe gebracht, wie das der Physik überhaupt möglich ist.“¹⁷ Das Dilemma der Quantenphysik besteht darin, dass sie behaupten

¹⁵[Heisenberg 1927], S. 172.

¹⁶[von Weizsäcker 1941], S. 490.

¹⁷[von Weizsäcker 1941], S. 490.

muss, das Wissen über das Atom könne in keinem anschaulichen Modell zusammengefasst werden. Jene Behauptung bedeutet ausführlicher, dass sich ein atomarer Vorgang unter bestimmten Versuchsbedingungen durch das klassische Teilchenbild beschreiben lässt, während es andererseits Messanordnungen für *dasselbe* Quantenobjekt gibt, bei denen sein Verhalten nur im Bild der klassischen Wellenlehre begriffen werden kann. Die Gegenstände Heisenbergs und der Quantenphysik sind der direkten Beobachtung und Anschauung entzogen, so dass es eine Selbstverständlichkeit war, dass es in der Physik des beginnenden zwanzigsten Jahrhunderts üblich wurde, Atommodelle zu entwickeln. Es war aber nicht absehbar, dass das atomare Geschehen sich gegen eine *einheitliche* Beschreibung in der Sprache der klassischen Mechanik und der Maxwell'schen Elektrodynamik sperren würde. Gerade dies hätte man von einer anschaulichen Atomtheorie fordern müssen: Sich unter Zuhilfenahme eines geeigneten Atommodells ein mit Hilfe der bekannten Physik verstehbares Bild von den atomaren Vorgängen machen zu können. Das Scheitern aller derartigen Bemühungen musste umso verwunderlicher erscheinen, als gerade das neunzehnte Jahrhundert eine Vielzahl mechanistischer Modellvorstellungen hervorgebracht hatte, die mit großem Erfolg die neuartigen elektrischen und magnetischen Erscheinungen dem Theoriegebäude der Physik einzuverleiben halfen. Woher kam diese prinzipielle Barriere, welche die mikrokosmischen Vorgänge allen Versuchen einer in sich konsistenten klassischen Deutung entgegensetzte?

1.4 Der Angriff auf das Anschauungsproblem

Worin besteht die Schwierigkeit? Das Problem ist die Bild- Dualität von Wellenbild und Teilchenbild, genauer, die Behauptung der Quantenphysik, dass ein Quantenobjekt (etwa ein Elektron) je nach Beobachtungszusammenhang als Welle oder als Teilchen beschrieben werden muss. Es handelt sich um ein Aufeinandertreffen sich widersprechender Vorstellungen, denn Wellen sind, indem sie interferenzfähig sind, zugleich teilungsfähig, im Gegensatz zu Teilchen. Dagegen sind Teilchen lokalisiert, während ein Wellenfeld unendlich weit ausgedehnt sein kann. Die Physik beunruhigt das Dilemma insofern nicht mehr, als sie gelernt hat, aus dem Problem ein physikalisches Prinzip zu machen, das Bohrsche Komplementaritätsprinzip. Es gibt jedoch einen Stachel für die Bilder- Dualität: Dies sind die Möglichkeiten, *innerhalb* der rein quantenmechanischen Domäne ohne Gefahr von Irrtümern klassisch- anschauliche Modellvorstellungen anwenden zu können. Der Stachel der Anschaulichkeit verdichtet sich paradigmatisch in der Zeeman-Ellipse.

Sie ist ein elektronentheoretisches Bild für den Zeeman-Effekt und seiner erfolgreichen Beschreibung durch Lorentz und Larmor. Obwohl Lorentz keine Erklärung für die Existenz von Spektrallinien im klassischen Bilde geben konnte, war das Bild der präzedierenden Zeeman-Ellipse geeignet, die Aufspaltung der Spektrallinien beim Zeeman-Effekt quantitativ genau zu reproduzieren. Das Bild der präzedierenden Zeeman-Ellipse ist eng verbunden mit der Präzession eines mechanischen Kreisels. Der folgende Text hat zunächst einen Blick auf wichtige Raumkonzepte zu werfen, welche die Physik im Laufe der Erweiterung ihrer Kenntnis von den mechanischen und elektromagnetischen Phänomenen entwickelte. Physikalische Raumvorstellungen werden eine Einsicht in die Methode ermöglichen, durch welche die Physik die Dinge und Vorgänge der Lebens- und Laborwelt auf eine wissenschaftliche Ebene projiziert, um sie der physikalischen Begrifflichkeit und der Mathematik zugänglich zu machen. Im neunzehnten Jahrhundert entwickelte physikalische Raumkonzepte waren die Ausgangsbasis für die ältere Bohr-Sommerfeldsche Quantentheorie und haben zu wichtigen Teilen Eingang in die Quantenmechanik gefunden.

Im dritten Kapitel soll der eigentlich quantenmechanische Teil beginnen, der die Genese der Heisenbergschen Quantenmechanik zu skizzieren versucht. Heisenberg begann seine Suche nach einer begrifflich schlüssigen Theorie der Quantenerscheinungen, indem er die quantenhafte Erzeugung von Licht im Atom mit Hilfe eines klassischen Ersatzbildes virtueller Oszillatoren modellierte. Die Existenz der virtuellen Oszillatoren war ein weiteres Indiz für die Vermutung, dass die Quantenmechanik, trotzdem sie heute behauptet, eine die klassischen Theorien umfassende Theorie der Materie und der Strahlung zu sein, einen klassisch-anschaulichen Kern besitzt, der sie methodisch und inventorisch trägt.

In einem Kapitel zur Deutung der Quantenmechanik sollten die Interpretationsversuche, die sich an den fertigen quantenmechanischen Formalismus knüpften, einer kritischen Analyse zugeführt werden. Da nicht alle Interpretationen dargestellt werden konnten, beschränkt sich das Deutungskapitel auf die aus erkenntniskritischer Sicht entscheidenden drei Interpretationsrichtungen: den „aprioristischen“ Ansatz Heisenbergs, den empiristischen Ansatz und den Begründungsversuch Hans Reichenbachs. Im weiteren mathematischen und insbesondere begrifflichen Aufbau der Theorie, vor allem durch Einbeziehung der Schrödingerschen Wellenmechanik, war Heisenberg 1927 zu einem ersten Deutungsversuch der Quantenmechanik und der in ihr verankerten Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation gelangt. Jene Unbestimmtheitsbeziehung hängt eng zusammen mit dem Thema dieser Arbeit, der Krise der Anschauung in der Quantenmechanik, da die Quantenmechanik die Relation Heisenbergs als Einschrän-

kungsregel für wellen- und partikelkinematische Begriffe zum Einsatz brachte und bis heute noch bringt, um einen Konflikt zwischen Wellen- und Teilchenvorstellungen zu verhindern. Offenbart die quantenmechanische Naturbeschreibung damit einen Defekt des menschlichen Visualisierungsvermögens? Offenkundig hat Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation eine Tendenz, die Fruchtbarkeit des Ersatzbildes der virtuellen Oszillatoren nachträglich zu negieren. Dieser Konflikt zwischen der Anschaulichkeit im erfinderischen Prozess und dem am Ende einer Entwicklung stehenden Ikonoklasmus forderte gebieterisch Aufklärung.

Die Gegenstände der Quantenphysik sind der direkten Beobachtung nicht zugänglich, so dass eine Auseinandersetzung mit der Anschauungskrise zugleich ein Eingehen auf den erkenntnistheoretischen Status der nicht beobachtbaren, sondern nur interpretierbaren quantenphysikalischen Interphänomene notwendig erscheinen ließ. Mit den Mitteln der methodischen Philosophie sollte eine Rede von Modellen „für etwas“ etabliert werden. Dies ermöglichte die Verlegung des Visualisierungsproblems von einer „so seienden“ also realistisch verstandenen mikroskopischen Struktur der Natur in das erkennende Subjekt hinein. Die Larmorpräzession der Zeeman-Ellipse setzte das Primat der Mechanik in der physikalischen Modellbildung fort, indem sie als ein Gegenstück zu den Hebeln und Kreiseln der mechanischen Ingenieurskunst begriffen werden konnte. Dadurch wurde der Verdacht Ernst Machs, dass die Methode der Physik von kulturellen Voraussetzungen abhängig sei, auch in ein quantenphysikalisches Licht gerückt. Es stellte sich daher die Frage: Von welchen, wenn nicht kulturellen Bedingungen her, sollte die Krise der Anschauung in der Quantenmechanik betrachtet werden, wenn die Krise einerseits ein Problem des erkennenden Subjekts war und andererseits sich die Krise innerhalb einer Erfahrungswissenschaft entwickelt hatte? Der Topos des Anschauungsproblems, dies sollte der vorliegende Versuch in seiner Auseinandersetzung mit Reichenbachs aprioristischem Argument zugunsten der Heisenbergschen Einschränkungregel zeigen, liegt nämlich nicht mehr im Zuständigkeitsbereich der Fachwissenschaft Physik.

Der Bildkonflikt von Wellen- und Teilchenbild spielt sich im Newtonschen Containerraum der klassischen Physik ab.¹⁸ Eine Dualität an ein und demselben Gegenstand wird gewöhnlich dadurch aufgelöst, dass das Sich- Widersprechende im Schema der Zeit entkoppelt wird: Ein Ding kann zu *verschiedenen* Zeiten konträre Eigenschaften besitzen. Der quantenmechanische Dualismus lässt eine zeitliche Entkoppelung nicht zu, da es von den Experimentierbedingun-

¹⁸Zu Newtons Konstrukt eines Behälter- oder Containerraums siehe z. B. K. Leonhard, „Was ist Raum im 17. Jahrhundert? Die Raumfrage des Barocks: Von Descartes zu Newton und Leibniz“, in [Bredenkamp 2006], S. 11- 34.

gen abhängt, welches von beiden Bildern das angemessene ist. Die Quantenmechanik sorgt für die notwendige Entkoppelung durch den Einsatz der Heisenbergschen Einschränkungsgesetze. Die Lösung des Bildkonfliktes wird damit allerdings erkaufte mit einer nachträglichen Modifizierung der geometrisch- kinematischen Ausgangsbasis der Theorie. Es bot sich an, die Raum- und Zeit- Lehre von Leibniz zu aktivieren, die ja aus einer Kritik der Newtonschen Raum- Zeit- Auffassungen heraus entwickelt worden war. Der Vorschlag, sich in der Quantenmechanik des Leibnizschen Konzepts eines reinen Ordnungsraumes zu bedienen, lief darauf hinaus, wenigstens auf dem Felde der stationären Atomprozesse der Newtonschen Falle zu entkommen. Es ergab sich, dass es, um Leibniz' Raumkonzept zu folgen, eines freieren Begriffs von Anschaulichkeit bedürfte als die bisher von der Physik unterstellte Anschaulichkeit, die sich stets als eine „Newtonsche“ artikuliert hat.

2 Konzepte physikalischer Raumbildung

2.1 Aspekte physikalischer Anschaulichkeit

Andreas Kamlah unterscheidet in seinem Aufsatz „Anschauliches und symbolisches Denken“¹ zwischen Bildern, Modellen und Symbolen. Alle drei haben - in dieser Reihenfolge - ihren Platz in der Entwicklung der neuzeitlichen Physik. Die erste, sozusagen noch naive Epoche benutzte den elementarsten Sprachtyp, die Beobachtungssprache, aber in Teilen auch schon eine Modellsprache. Alle Sachverhalte der Beobachtungssprache lassen sich durch Bilder darstellen, wobei diese Bilder solche der *direkten Anschauung* sind, da sie mögliche Erlebnisse darstellen. Eine Vorstellung oder ein Bild heißt nach Kamlah *direkt anschaulich*, wenn es erlebbar ist. Eine indirekt anschauliches Denken sei auf Modellen und Analogien gestützt, die etwas darstellen, was nicht so wahrgenommen wird, wie es im Modell erscheint. Während zur direkt anschaulichen Vergegenwärtigung eine Beobachtungssprache gehört, so operiert die indirekte Vergegenwärtigung in einer Modellsprache. Die dritte Form naturwissenschaftlichen Sprechens schließlich sei die Symbolsprache, in der etwas durch Zeichen ausgedrückt wird, denen sowohl direkt als auch indirekt kein anschauliches Korrelat mehr entspricht.

Die Entwicklung der neuzeitlichen Physik zeige genau das Fortschreiten von der Beobachtungs- und der Modellsprache hin zu einer abstrakten Symbolsprache. Kamlah vermutet, dass es nie eine Kultur ohne eine entwickelte Modellsprache gegeben habe. Bereits Galilei habe gegen die naive Auffassung argumentiert, für die Bewegung stets etwas Beobachtbares sein muss und, im Gegenteil, darauf insistiert, dass nur Relativbewegungen wahrnehmbar seien. Galilei habe auch gewusst, dass der Astronom die Grenzen des direkt anschaulich Fassbaren überschreiten müsse, um zu einem Verständnis der Bewegungen der Himmelskörper zu kommen.

¹[Kamlah 1997].

Der „direkt anschauliche Denkstil“ habe in der Astronomie versagt und könne auch in der Physik die Probleme nicht bewältigen.² Galilei war überzeugter Anhänger der kopernikanischen Lehre. Kopernikus' Interpretation der sichtbaren Planetenbewegungen beruhte ja gerade auf der Möglichkeit, unmittelbar wahrgenommene Bewegungen als „Scheinbewegungen“ zu interpretieren, und Galilei war es gewesen, der das nach ihm benannte Relativitätsprinzip zur Geltung gebracht hatte, um das von ihm entdeckte Trägheitsprinzip für irdische Bewegungsvorgänge gegen Einwände der Aristoteliker zu immunisieren. Indem Galilei derart die Theorie über die Sinne triumphieren ließ, durchbrach er mit Plato die Schranke des direkt anschaulichen Denkens. Die Grenzen des direkt anschaulichen Denkens machen die Suche nach indirekten Ersatzbildern oder Modellen virulent. Kamlah betont, dass in einer Modellsprache den semantischen Regeln eine größere Bedeutung zufalle, da die Bezüge der Eigenschaften des Modells zu denen der dargestellten wirklichen Sachverhalte erklärt werden müssten.³ Dies treffe in noch viel stärkerem Maße zu für das symbolische Denken. Die heutige Naturwissenschaft sei geradezu gekennzeichnet durch die Unentbehrlichkeit unanschaulicher, sprachlicher Zeichen: „Jeder Physikstudent muß lernen, Formeln zu verwenden, bei denen er sich nichts Anschauliches mehr vorstellen kann. Er benutzt Zeichen, die durch semantische Regeln mit der Wirklichkeit verknüpft werden, so daß man weiß, was in solchen Zeichen formulierte Aussagen bedeuten.“⁴ Anschauliche Vorstellungen könnten zwar hilfreich sein, um mit den Symbolen zu operieren, aber für die Bedeutung der Zeichen selbst seien solche Vorstellungen unwesentlich. Der Rückzug der modernen Physik auf die Symbolsprache der Mathematik wurde vorbereitet durch die von Heinrich Hertz zum Abschluss gebrachte, wengleich schon bei Descartes vorfindliche Einsicht, dass es äquivalente Modelle ein und desselben physikalischen Sachverhaltes geben könne. Denn wenn dies der Fall ist, dann ist nicht mehr das einzelnen Modell der Repräsentant der Wirklichkeit, sondern die in den verschiedenen Modellen steckende gemeinsame Struktur. Daraus resultiert allerdings ein Bedeutungsproblem für die wissenschaftlichen Termini: Während in der Beobachtungssprache die Bedeutung eines Wortes durch eine „Menge von Bildern von Dingen“⁵ gegeben ist, löst sich in der Symbolsprache in gewisser Weise die Sprache vom Vorstellen oder bildhaften Denken; ja, Sprache und Denken fallen mehr und mehr zusammen, da es kein Bild mehr als Vermittler zwischen Sprache und Denken gibt.

²[Kamlah 1997], S. 344.

³[Kamlah 1997], S. 339.

⁴[Kamlah 1997], S. 352.

⁵[Kamlah 2002], S. 43.

Es ist aber zweifelhaft, ob sich mit Symbolen operieren lässt, wenn sie nicht mehr sinnvoll mit Vorstellungen verknüpft werden können. Es lassen sich zunächst zwar beliebige mathematische Axiomensysteme ausdenken, die nur logischen Ansprüchen wie Widerspruchslosigkeit zu genügen haben. Aber es zeigt sich faktisch, dass es eine Evolution mathematischer Theorien gibt: Manche erweisen sich als lebensfähig (praktisch anwendbar, von reichhaltiger Struktur, den Kräften der Anschauung zugänglich), während auf der anderen Seite mathematische Disziplinen einem Niedergang ausgesetzt sind. Die vom „Unternehmen Bourbaki“, einem anonymen Autorenkollektiv von französischen Mathematikern in den neunzehnhundertsechziger Jahren betriebene „Neue Mathematik“ wollte eine Vermittlung des mengentheoretischen Aufbaus auch im Elementarunterricht durchsetzen. Anstelle eines „Rechenunterrichts“ sollte das Umgehen mit abstrakten Strukturen gelehrt werden, mottohaft repräsentiert durch farbige Spielsteine, mit denen Kindern einen Zugang zur Mengenlehre eröffnet werden sollte. Der streng logische Stil der Bourbaki-Gruppe, die sich an den von Hilbert initiierten formalistischen Tendenzen innerhalb der mathematischen Grundlagenforschung orientierte, prägte den Mathematikunterricht an den Universitäten nachhaltig, was aber nicht von allen Mathematikern begrüßt wurde. Es mehren sich seit den neunziger Jahren Anzeichen einer Rückkehr zu einer mehr geometrischen Perspektive auf die Gegenstände der Mathematik. Symptomatisch dafür ist eine Äußerung des russischen Mathematikers V. Arnold in einem Interview aus dem Jahre 1997:

„I do not think that the discoveries of Galileo ... are less important than, say, those of the pure philosopher Pascal. The real danger is not the applied mafia itself, but the divorce between pure mathematics and the sciences created by the (I would say criminal) formalization of mathematics and of mathematical education. The axiomatic-deductive Hilbert- Bourbaki style of exposition of mathematics, dominant in the first half of this century, is now fortunately giving place to the unifying trends of the Poincaré style geometrical mathematics, combining deep theoretical insight with real- world applications. By the way, I read in a recent American book that geometry is the art of making no mistakes in long calculations. I think that this is an underestimation of geometry. Our brain has two halves: one is responsible for the multiplication of polynomials and languages, and the other half is responsible for orientation of figures in space and all the things important in real life. Mathematics is geometry when you have to use both halves.“⁶

⁶Notices of the Amer. Math. Soc. 44, 432- 438 (1997).

Andererseits wird eine ganze Bewegung in der Bildwissenschaft unter dem Stichwort „iconic turn“ zusammengefasst, die zeigen möchte, wie sehr das Denken auch in den exakten Wissenschaften von bildhaften Vorstellungen geprägt wird.⁷

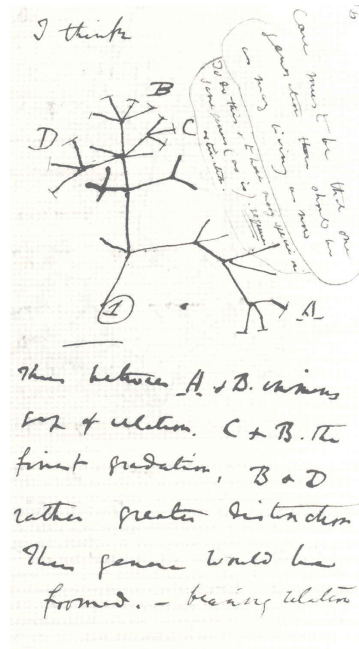


Abbildung 2.1: Charles Darwin, Evolutionsdiagramm aus Notebook B; 1837 ([Bredekamp 2005], S. 23, Abb. 14)

Der Kunsthistoriker Horst Bredekamp, der das Projekt des iconic turn unterstützt, zieht aus seiner Analyse Darwinscher Skizzen zur Evolutionstheorie, vor allem angesichts eines Evolutionsdiagramms von 1837, mit welchem Darwin die Entwicklung der Arten zu visualisieren versuchte und welches dieser verblüffend lapidar mit „I think“ eingeleitet hatte, einen anderen Schluss als Kamlah. Mit Darwin kommt Bredekamp zu dem Resultat, „daß, wenn die Darstellung der Geschichte einer alten Familie im Stammbaum nur mit Mühe dargestellt werden könne, ohne einen solchen aber hoffnungslos sei, dies umso mehr für die natürlichen Familien der Arten gelte, deren Entwicklung ohne Diagramm nicht zu erfassen und selbst mit Hilfe eines solchen Bildes kaum begreiflich zu machen sei“.⁸ Die mit „I think“ überschriebene Darwinsche Skizze stelle keine Illustration eines fertigen Gedankens, sondern den aktiven Träger eines Denkprozesses dar.⁹ Ist die moderne Physik also tatsächlich fähig, sich auf eine bild-

⁷Siehe z.B. [Maar/Burda 2004] oder G. Boehm, „Die Wiederkehr der Bilder“, in [Boehm 1994], S. 11-38.

⁸[Bredekamp 2005], S. 51 - 54.

⁹[Bredekamp 2005], S. 24.

und vorstellungsbereinigte Symbolsprache zurückzuziehen? Oder ist Bredekamps Wertung von Galileis zeichnend- konstruierendem Erkenntnisstil in den getuschten Mondbildern des „Sidereus Nuncius“ angemessener, wonach „alle Annahmen einer Dichotomie zwischen Anschauung und Denken verkennen, dass (eine) Zeichnung beide Seiten enthalten (kann)“?¹⁰

Als Galilei 1609 sein mit dem Fernrohr bewaffnetes Auge zum Mond richtete, musste er eine Entscheidung treffen. Die Licht- und Schattengebilde, die er dabei sah, passten keinesfalls zu der Vorstellung, die man sich Jahrhunderte lang vom Mond gemacht hatte. Man war bis dahin davon ausgegangen, dass unser Erdtrabant, als stellarer Körper, so perfekt sein müsse wie der Himmel selbst. Nun sah Galilei keine Anzeichen einer makellosen Mondoberfläche, sondern Schattengebilde, die sich auch als Berge und Täler deuten ließen, wenn er diese Schlussfolgerung nicht dadurch umgehen wollte, indem er die beobachteten Licht- und Schattenverhältnisse etwa einem fehlerhaft arbeitenden Fernrohr zuschrieb. Galileis mittelbarer Blick durch ein optisches Hilfsmittel evozierte also ein erkenntnistheoretisches Problem, nämlich die Frage nach dem Geltungsgrund der vom Fernrohr gelieferten Mondbilder. Galilei habe sich, so Bredekamp, des Gesehenen durch das Zeichnen des Gesehenen versichert, Galilei habe die Unebenheit der Mondoberfläche durch das Zeichnen be-griffen, erkannt und, darüber hinaus, objektiviert. Wenn Galileis Zeitgenossen schon dem Teleskop nichts abgewinnen konnten, so doch immerhin seinen Mondzeichnungen.¹¹ Der gestaltend nachvollziehende Visus hätte dann bei Galilei eine Objektivierungsfunktion übernommen, nachdem die Objektivität eines Dings durch Verwendung künstlicher Beobachtungsmittel fraglich geworden sei. Der Verlust einer von den „bloßen“ Sinnen garantierten Objektivität ist charakteristisch für die neuzeitliche Naturwissenschaft, insbesondere für die Astrophysik und für die Physik der Atome. Die Beobachterabhängigkeit der quantenphysikalischen Naturbeschreibung wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch zur Sprache kommen. Wichtiger noch wird die Auseinandersetzung mit dem Geltungsgrund physikalischer Aussagen werden, wenn sich die moderne Physik, vor allem die Quantenphysik, Beobachtungsmittel zunehmender Komplexität bedient. Hier gilt es zunächst nur, den Konflikt zwischen abstraktem und anschaulichem Denken weiterzuverfolgen.

Jede Anschauungskrise ist zugleich eine Krise des Räumlichen. Zu verschiedenen Epochen der Wissenschaftsgeschichte gab es verschiedene Raumkonzepte zur Deutung physikalischer Phänomene. Es gab verschieden Ansätze der Raumstrukturierung. Die Quantenmechanik griff auf die Konzepte von Newton, Lagrange und Faraday-Maxwell zurück.

¹⁰[Bredekamp 2002], S. 153.

¹¹[Bredekamp 2002], S. 151- 152.

2.2 Der Feldraum von Faraday

Die Anschauungen Michael Faradays über Elektrizität und Magnetismus haben auf die Entwicklung des Elektromagnetismus und der Elektrodynamik einen nicht überschätzbaren Einfluss gehabt, und zwar sowohl in praktischer wie auch in theoretischer Hinsicht. Die Erfindung der magnetischen und elektrischen Kraftlinien geht allein auf sein Konto, und man darf wohl ohne Übertreibung sagen, dass die heutige Elektrotechnik ohne die Vorstellung der Feldlinien nicht existenzfähig wäre.¹² Aber auch die theoretische Behandlung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen ist ohne Faradays Feldvorstellungen undenkbar, hat doch Maxwell direkt auf dieser Grundlage sein Gebäude der Elektrodynamik aufgebaut. Die fundamentalste der zahlreichen Faradayschen Entdeckungen ist die Induktion, also die Erzeugung elektrischer Ströme durch veränderliche magnetische Felder. Es gibt zwei Darstellungen Faradays über die Entdeckung der elektromagnetischen Induktion, die eine in seinen Experimental-Untersuchungen über Elektrizität, die andere in seinem wissenschaftlichen Tagebuch. Die erste ist pädagogisch angelegt. Faraday möchte dort „die Resultate ... nicht in der Reihenfolge, wie sie erlangt worden sind, sondern solchermassen beschreiben, dass sie den klarsten Ueberblick über das Ganze gewähren“.¹³ Dagegen gibt das Tagebuch den tatsächlichen Gang seiner Entdeckungen in ihrer chronologischen Reihenfolge wieder. Die Experimental-Untersuchungen beginnen die Darstellung der Induktionsphänomene, indem sie die Wirkung eines langen Drahtes auf einen Paralleldraht erörtern. Hier sind die Experimentierverhältnisse übersichtlich, jedoch ergibt sich in dieser Messanordnung kein Effekt.¹⁴ Das Tagebuch hat zum Ausgangspunkt die erste positive Induktionswirkung, die Faraday am 29. August 1831 an der Form einer (heute so genannten) Transformatorschaltung entdeckte, die einen zwar theoretisch umständlich zu beschreibenden, dafür aber kräftig ausfallenden Effekt ergab.¹⁵ Von hier aus gelangte Faraday zu seinen weiteren Induktionsexperimenten und schließlich auch zu der Induktionswirkung zwischen parallelen Drähten.

Faraday selbst bezeichnete den Induktionsvorgang als eine „production of electricity from magnetism“¹⁶, da er intuitiv davon ausging, dass wenn ein Strom ein Magnetfeld erzeugen

¹²Vgl. [Klein 1927], Teil I, S. 241.

¹³[Faraday 1891], Bd. 1, S. 2.

¹⁴[Faraday 1891], Bd. 1, S. 2- 3.

¹⁵[Faraday's Diary], Vol. I, S. 367- 392.

¹⁶[Faraday's Diary], Vol. I, S. 367.

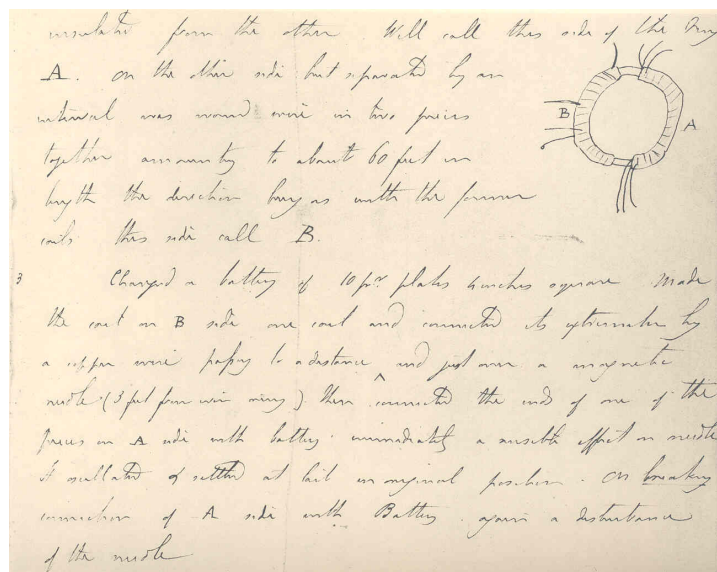


Abbildung 2.2: Faksimile der Tagebuchstelle des ersten erfolgreichen Induktionsexperimentes, 29. 08. 1831 ([Faraday's Diary], Vol. I, S. 367)

kann, der umgekehrte Vorgang in der Natur ebenso existieren müsse. Bezeichnend ist, dass Faraday den erst zu findenden Vorgang schon Induktion nannte, als er ihn noch gar nicht gefunden hatte, sondern ihm in immer neuen experimentellen Anläufen näherzukommen strebte. In dem Tagebucheintrag vom 28. November 1825 heißt es etwa:¹⁷ „Experiments on induction by connecting wire of voltaic battery. A battery of 4 troughs, ten pair of each, arranged side by side. (...) Could not in any way render any induction evident from the connecting wire.“ Der Terminus „Induktion“ ist in der heutigen Physik reserviert für die Erzeugung elektrischer Felder durch sich ändernde Magnetfelder; Faraday gebrauchte den Begriff in allgemeinerer Weise. Er verstand darunter „die Fähigkeit elektrischer Ströme, in ihnen unmittelbar benachbarten Körpern einen eigenthümlichen ... Zustand hervorzurufen“.¹⁸ Es ist überaus spannend, Faradays experimentelles Voranschreiten in den Tagebuchaufzeichnungen mitzuverfolgen, da man beinahe das Gefühl bekommt, Faraday beim Experimentieren über die Schulter zu schauen und ihm beim Selbstgespräch zuzuhören. Worauf es hier ankommt, ist der Umstand, dass Faradays erste Skizzen zu den erfolgreich durchgeführten Induktionsexperimenten noch keine Feldlinien enthalten. Und zwar fehlen Feldlinien-Argumente sowohl in den Aufzeichnungen zum ersten entscheidenden Induktionsexperiment vom 29. August 1831, als auch noch vierzehn Jahre später in den Notizen zu der Entdeckung des magneto-optischen Effektes.

¹⁷[Faraday's Diary], Vol. I, S. 279.

¹⁸[Faraday 1891], Bd. 1, S. 1.

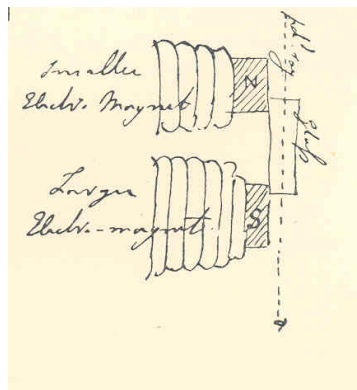


Abbildung 2.3: Skizze betreffend die Einwirkung des Magnetismus auf Licht; 13. 09. 1845 ([Faraday's Diary], Vol. IV, S. 264)

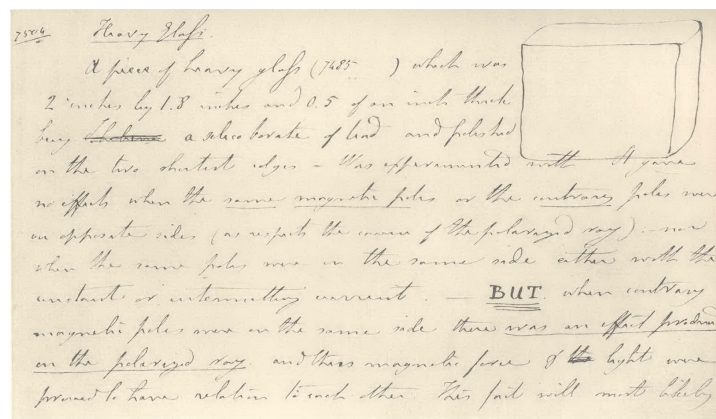


Abbildung 2.4: Faksimile des Tagebucheintrags zur Auffindung des magnetooptischen Effektes; 13. 09. 1845 ([Faraday's Diary], Vol. IV, S. 264)

Auf der anderen Seite kann die Rolle der Bilder nicht hoch genug geschätzt werden, um Strukturen eines physikalischen oder naturwissenschaftlichen Phänomens auf den Punkt zu bringen. Dies wird deutlich bei Faradays Versuch, die mannigfaltigen Erscheinungen der elektromagnetischen Induktion in einem (vor allem situationsinvarianten) Gesetz zusammenzufassen. Was er an Darstellung des Induktionsexperimente bringt, ist eine - dem heutigen Physiker sehr umständlich vorkommende - verbale Beschreibung, wobei ihm vorerst das Wesentliche der Induktion, die relative Änderung der räumlichen Beziehung zwischen Leiter und magnetischen Kraftlinien, noch nicht klar geworden ist.¹⁹ Zur Zeit der Entdeckung der elektromagnetischen Induktion bringt er die Feldlinien noch nicht in Zusammenhang mit den Induktionsphänome-

¹⁹Vgl. [Ramsauer 1953], S. 139.

nen; ihm ist der „elektrotonische Zustand“ der Begriff, unter den sich die Induktionsvorgänge subsumieren lassen sollen.²⁰ Den 1845 entdeckten magneto-optischen Effekt, die Drehung der Polarisationssebene des Lichtes beim Durchgang durch ein im Magnetfeld befindlichen Medium, bringt er zwar schon in Zusammenhang mit „lines of magnetic force“.²¹ Jedoch finden sich in unter den Skizzen zum magneto-optischen Effekt nur eine mit eingezeichneten magnetischen Feldlinien, und diese auch nur in sehr losem Zusammenhang mit dem Medium und dem durchgehenden Lichtstrahl (Abbildung 2.5).

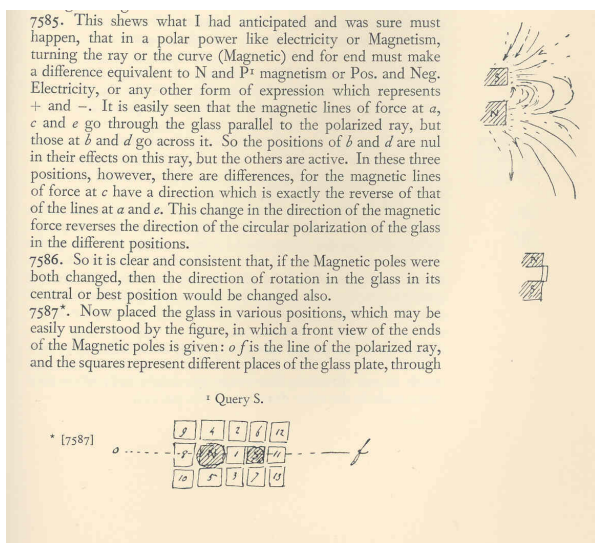


Abbildung 2.5: Skizze betreffend die Einwirkung des Magnetismus auf Licht; 18. 09. 1845 ([Faraday's Diary], Vol. IV, S. 273)

Erst im November 1845 ist er im Besitz des fundamentalen Begriffs der magnetischen und der elektrischen Feldlinien als eigenständiger physikalischer Entitäten, die ihm eine präzise und knappe Beschreibung des magneto-optischen Effekts ermöglichen:

„Unter *Linie magnetischer Kraft* oder *magnetischer Kraftlinie* oder *magnetischer Curve* verstehe ich diejenige Auesserung magnetischer Kraft, welche in Linien vor sich geht, die gemeinhin magnetische Curven genannt werden, und die sowohl von Magnetpolen fort und zu ihnen hin gehen, als auch concentrische Kreise um einen elektrischen Strom bilden. Unter *elektrischer Kraftlinie* verstehe ich die Kraft, die sich in Linien äussert, welche zwei nach den Principien der

²⁰[Faraday 1891], Bd. 1, S. 15- 22 („§ 3. Neuer elektrischer Zustand der Materie.“)

²¹[Faraday's Diary], Vol. IV, S. 263.

elektrostatischen Induktion ... auf einander wirkende Körper verbinden und die sowohl krumm als gerade sein können.“²²

Faraday betont in den sich auf den Oktober 1851 beziehenden Ausführungen in den „Experimental-Researches“, den Gebrauch des Ausdrucks „Kraftlinie“ so beschränken zu wollen, „dass er nicht mehr enthalte als den Zustand der Kraft hinsichtlich ihrer Stärke und Richtung an einer gegebenen Stelle und (einstweilen) keine Vorstellung über die Natur der physischen Ursache der Erscheinungen in sich schliesse“.²³ Faraday fährt in wichtigen erkenntnistheoretischen Ausführungen über die Zulässigkeit anschaulicher Bilder von unbeobachtbaren physikalischen Entitäten an gleicher Stelle fort, dass in dem Versuch, sich Erregung, Dasein und Fortpflanzung der physikalischen Kräfte durch anschauliche Darstellungen begreiflich zu machen, nichts Unstatthafes liege. Faraday geht bei der Einführung von Feldlinien- Vorstellungen behutsam und schrittweise vor. Er entwickelt das Bild von den magnetischen Feldlinien unter Wahrung einer erkenntniskritischen Vorsicht. Auf der anderen Seite weiß er um die erkenntnisfördernde Wirkung, die von einer geeigneten Darstellungsweise der Phänomene ausgeht. Kritisch ist nur seine naiv-realistische Vorstellung von einer unabhängig vom Menschen bestehenden „Naturwahrheit“ und der Aufgabe des Physikers, dieser Naturwahrheit durch darstellende Mittel möglichst nahe zu kommen.²⁴ Um Faraday Gerechtigkeit widerfahren zu lassen, ist aber zu betonen, dass Faraday in erster Linie Experimentalphysiker war. Es ist nachvollziehbar, dass der praktisch tätige Physiker die Naturgegenstände als von sich unabhängig existierend und ihnen im Experiment erst entgegentretend auffasst, obgleich er der Natur handelnd und seine Geschicklichkeit und Erfindungskraft an ihr ausprobierend gegenüber steht. Es ist dieses den- Dingen- Gegenüberstehen, welches für die realistische Sichtweise Faradays verantwortlich sein dürfte. Ein Erkenntnistheoretiker könnte leicht den entgegengesetzten Schluss ziehen, nämlich den, dass sich im aktiven Umgang mit den Naturgegenständen und in der Künstlichkeit der Experimentierbedingungen gerade der Herstellungscharakter und die Kultürlichkeit der Experimentalphysik offenbart. Das Feldlinienkonzept ist irgendwo zwischen realistischer und kulturalistischer Sichtweise anzusiedeln. Die Feldlinien sind zwar ein Produkt des absichtsvoll erkennenden Subjekts, jedoch wirken sie, indem sie den Weg zu neuen Erscheinungen ebnen, auch direkt auf die im Experiment manipulierten Gegenstände der Natur ein.

²²[Faraday 1891], Bd. 3, S. 2- 3.

²³[Faraday 1891], Bd. 3, S. 299- 300.

²⁴„Unsere Erkenntnis (erhält) die grösste Förderung, wenn die Naturwahrheit und deren conventionelle Darstellung am genauesten miteinander übereinstimmen.“ ([Faraday 1891], Bd. 3, S. 300)

Im Januar 1852 schlug Faraday die Messung der Intensität der magnetischen Kraft auf der Grundlage eines Induktionsvorgangs vor. Die Stärke des Magnetfeldes war dabei durch die bei der Bewegung eines Stromleiters quer durch das Feld hindurch induzierte Ladungsmenge zu messen. Zu diesem Zeitpunkt war es Faraday zur Gewissheit geworden, „dass die Kraftlinien die *Natur*, den *Zustand*, die *Richtung* und den *Betrag* der magnetischen Kräfte darstellen“.²⁵ Er anerkennt nun das Bild der magnetischen Feldlinien als „wundervolle Hilfsmittel in den Händen des Experimentators und Mathematikers“²⁶ und führt weiter aus:

„... ihr Nutzen besteht nicht bloss darin, dass sie eine vage Vorstellung zunächst zu grösserer Klarheit bringen, ihr gewissermassen eine feste Gestalt verleihen, so dass sie dem Versuch und der Rechnung unterworfen werden kann, sondern sie führen auch auf dem Wege der Deduction und durch Berichtigung zur Entdeckung neuer Erscheinungen, vermehren und fördern so die physikalischen Wahrheiten, welche, nicht wie die Hypothese, die zu ihnen leitet, dem Wechsel unterworfen sind, sondern zu fundamentalen Erkenntnissen werden.“²⁷

Faraday bewegt sich in seinen Ausführungen nahe an Bredekamps Interpretation des Darwinischen „I think“ über dem Evolutionsdiagramm von 1837. Bezeichnenderweise hat Faraday nicht zuerst das anschauliche Bild von den magnetischen Feldlinien entwickelt und sich anschließend, unter Anwendung einer Erkenntniskritik, auf eine bloß symbolische Interpretation der Feldlinien- Vorstellung zurückgezogen. Das Gegenteil war der Fall: Zunächst tastend und das Experiment hauptsächlich mit Worten darstellend, hat Faraday am Ende eines Entwicklungsprozesses den anschaulich-plastischen Begriff der Feldlinien aus seinen Experimenten herausdestilliert. Anschauliches Denken krönt hier das begriffliche Denken, denn die Feldlinien sind mehr als bloße Veranschaulichung von begrifflich schon verstandenen elektrodynamischen Vorgängen. Sie sind Träger von gegenwärtigen und zukünftigen Erkenntnissen.

²⁵[Faraday 1891], Bd. 3, S. 371.

²⁶[Faraday 1891], Bd. 3, S. 372.

²⁷[Faraday 1891], Bd. 3, S. 372.

2.3 Die energetischen Räume von Lagrange, Maxwell und Lorentz

2.3.1 Lagrange

Die Betrachtungen, die Joseph Louis Lagrange in seiner „*Mécanique analytique*“ von 1788 anstellte, sind aus heutiger Sicht energetische, obwohl es den Energiebegriff im 18. Jahrhundert in expliziter Form noch nicht gab. Lagranges Mechanik beruht auf der Kombination zweier mechanischer Prinzipien, dem schon der Renaissance bekannten Prinzip der virtuellen Verrückungen und dem D’Alembertschen Prinzip für die Bewegung mechanischer Systeme, die durch Koppelung in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt sind (ein einfaches Beispiel für ein solches gebundenes System ist ein Pendel, das infolge seiner starren Verbindung mit dem Aufhängepunkt nur Bewegungen längs einer Kreisperipherie ausführen kann). Das Prinzip der virtuellen Verrückungen, das schon von G. Ubaldi und G. Galilei benutzt wurde, um statische Gleichgewichte zu beschreiben, ist in der Tat eine energetische Aussage, wenn man das Prinzip in der Sprache der heutigen Physik liest, denn das jenes Prinzip beherrschende Produkt aus Kraft und Weg ist eine Arbeit, mithin eine Form von Energie. Der Grundgedanke, der hinter dem Prinzip steht, ist aber das Hebelgesetz von Archimedes. Lagrange definiert das Prinzip so: „Wenn ein beliebiges System von beliebig vielen Körpern oder Punkten, deren jeder durch beliebige Kräfte angegriffen wird, im Gleichgewichte ist und man diesem Punkte eine beliebig kleine Bewegung erteilt, infolge deren jeder Punkt eine unendlich kleine Strecke durchläuft, so ist die Summe aller Kräfte, jede multipliziert mit der Strecke, welche der Punkt, an dem sie wirkt, in der Richtung dieser Kraft durchläuft - eine Strecke, die man als Maß der *virtuellen Geschwindigkeit* ansehen ... kann - immer gleich null.“²⁸ In energetischer Sprechweise müsste das Prinzip so formuliert werden: Gleichgewicht besteht, wenn bei allen unendlich kleinen („virtuellen“) Lageänderungen des Mechanismus sich die Summe aller geleisteten und gewonnenen Arbeiten zu Null ergänzt. In dieser Formulierung wird der energetische Kern des Prinzips deutlich, denn es besagt, dass der Schwerpunkt eines abgeschlossenen Systems nicht von allein steigen oder sinken kann. Beim zweiseitigen Hebel ist diese Bedingung ganz offensichtlich erfüllt, denn gleichgültig, nach welcher Seite der Hebel sich auf der einen Seite senkt und auf der anderen steigt, so bleibt doch sein Schwerpunkt, das heißt der Drehpunkt, immer auf derselben Höhe.

²⁸Siehe [Lagrange 1887], S. 19.

Lagranges Leistung bestand darin, dass er das Prinzip der virtuellen Verrückungen, welches statischer Natur ist, mit dem dynamischen Prinzip von D' Alembert vereinigte. Gemäß dem Prinzip von D' Alembert (Traité de Dynamique, Paris 1743) bewegt sich ein unfreies Punktsystem so, dass sich die - in Folge der Bindungen vorhandenen - so genannten verlorenen Kräfte ($F_i - m\ddot{x}_i$) das Gleichgewicht halten. Lagrange erkannte, dass es lediglich der Anwendung des Gleichgewichtsprinzips der virtuellen Verrückungen auf jene verlorenen Kräfte bedurfte, um eine Regel zur Lösung des allgemeinen Bewegungsproblems angeben zu können. Interessanterweise enthält Lagranges Mechanik, im Gegensatz zu den Principia Newtons, keine einzige Figur. Lagrange rechtfertigt dies in der Vorrede seines Werkes auf folgende Weise:

„Ich habe mir vorgenommen, die Theorie der Mechanik und die Kunst, die darauf sich beziehenden Probleme zu lösen, auf allgemeine Formeln zurückzuführen, deren einfache Entwicklung alle für die Lösung jedes Problems notwendigen Gleichungen angibt. (...) Man wird in diesem Werke *keine geometrischen Figuren* finden. (...) Alle, welche die Analyse lieben, werden mit Vergnügen sehen, dass die Mechanik ein neuer Zweig derselben wird, und werden mir Dank wissen, dass ich die Herrschaft derselben in dieser Weise ausgedehnt habe.“²⁹

Lagrange formuliert hier das erkenntnistheoretisch unmögliche Unterfangen, die als experimentelle Wissenschaft zwingend auf Empirie angewiesene Mechanik zu einem Teilgebiet der Analysis und damit zu einer Disziplin der reinen Mathematik zu machen. Abgesehen davon muss der rechnende Physiker, um den allgemeinen Formalismus auf ein spezielles mechanisches Problem anwenden zu können, sich vor dem Beginn seiner Rechnungen Klarheit darüber verschafft haben, was den mathematischen Symbolen von Lagrange in der konkreten Problemstellung entsprechen soll. Indem Lagrange seine Ideologie, dass die Mechanik zu einem Teilgebiet der Analysis gemacht werden müsse, bedient und sein Werk von allen Zeichnungen und Skizzen freihält, beraubt er sich der Möglichkeit, Sachverhalte am Hebel oder am Flaschenzug kurz und prägnant auszudrücken. Denn an die Stelle von Skizzen treten umständliche Beschreibungen jener Elementargegenstände der Mechanik. Aber gleichgültig, welchen programmatischen Kurs Lagrange eingeschlagen hat, es bleibt dabei, dass die Grundprinzipien der Mechanik ihre Herkunft aus dem handwerklich-praktischen Umgang mit schweren Körpern haben, wie es eine Abbildung aus Stevins „De Beghinselen der Weeghconst“ auf „handgreifliche“ Weise zum Ausdruck bringt (siehe Abbildung 2.6).

²⁹[Lagrange 1887], S. V.

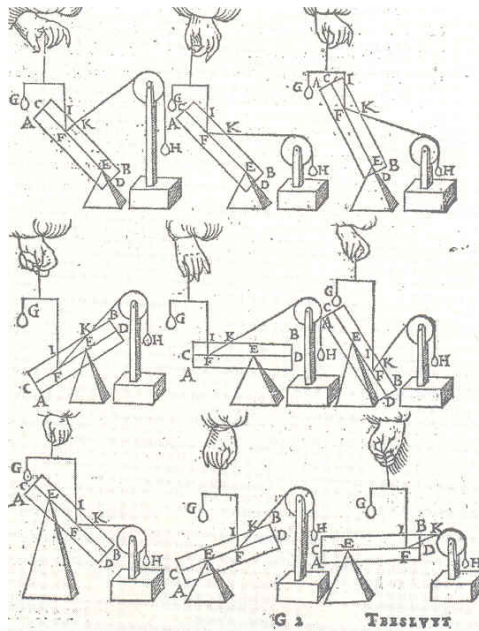


Abbildung 2.6: S. Stevin, Die Kunst des Wiegens ([Bredekamp 2006], S. 29, Abb. 10)

Der Lagrange-Formalismus wurde im Laufe des neunzehnten Jahrhunderts noch bedeutend ausgebaut; insbesondere gab ihr der Engländer Edward J. Routh eine Form, an die später Maxwell in besonderer Weise anknüpfen konnte. Routh stellte die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen eines Systems von Massenpunkten auf, von dem ein Teil der generalisierten Koordinaten in dem Ausdruck für die Lagrangefunktion überhaupt nicht vorkommen. Das sind die später von Helmholtz als „zyklische Systeme“ bezeichneten und untersuchten.³⁰ In der Praxis werden zyklische Koordinaten da verwirklicht, wo Rotationsbewegungen von symmetrischen Körpern stattfinden. Denn aufgrund der vorausgesetzten Symmetrie darf es keine Rolle für den Bewegungsvorgang spielen, welchen momentanen Wert der zugehörige Drehungswinkel besitzt. Gleichwohl gehen die zu den zyklischen Koordinaten zugehörigen generalisierten Impulskoordinaten in die Lagrangefunktion ein, so dass eine Drehbewegung um die Symmetrieachse zwar keine am Körper sichtbare Veränderung hervorrufen würde (man kann sich etwa einen Kreisel gleichmäßig mit Farbe bestrichen vorstellen; dann würde man allein durch Betrachten seiner Oberfläche nicht entscheiden können, ob dieser ruhte oder sich drehte), aber dennoch einer „unsymmetrischen“ Bewegung fähig wäre (etwa in Form einer Eierbewegung). Der Vorteil, der durch Routh' Modifikation des Lagrange-Formalismus gewonnen ist, besteht darin, dass der Formalismus nunmehr die sichtbaren und die unsichtbaren Phänomene ei-

³⁰Siehe [Klein 1927], Teil I, S. 209- 210.

ner gleichartigen Beschreibung zuführt. Den zyklischen Variablen entsprechen die unsichtbaren Bewegungen, das heißt in Reichenbachscher Terminologie die „Interphänomene“. Diesen Vorzug der Routhschen Form der Lagrange- Gleichungen machte sich Maxwell zunutze, da er die Bewegung der Elektrizität in einem Leiter als eine zyklische betrachtete.

2.3.2 Maxwell

Maxwell machte sich die Idee Faradays zu eigen, dass das Zwischenmedium eine Wirkung auf die elektrischen und magnetischen ausüben müsse. Die mathematischen Theorien der Elektrodynamik vor Maxwell waren Fernwirkungstheorien. Sie waren dem Ideal der Newtonschen Mechanik verpflichtet, indem sie nur Aussagen über Kraftwirkungen auf beobachtbare Ladungen und Ströme machten. Seine Experimente mit Dielektrika hatten Faraday zu der Überzeugung geführt, dass der Raum zwischen den Ladungen und Strömen einen Einfluss auf die direkt beobachtbaren und manipulierbaren Ladungs- und Stromträger hat. Maxwells Aufgabe bestand darin, eine Nahwirkungstheorie des Elektromagnetismus zu entwickeln. Er musste auch im scheinbar leeren Raum elektrodynamische Vorgänge annehmen, worüber die experimentelle Erfahrung nichts aussagt.³¹ Ferner nahm Maxwell, hydrodynamische Analogien verwertend, die Elektrizität als eine im Äther inkompressibel strömende Flüssigkeit an.

Nach Maxwell soll der Äther durch das elektromagnetische Feld in einen Zwangszustand versetzt werden, und da Maxwell sich den Äther als eine Art elastischen Mediums vorstellt, in welchem Störungen durch Nahwirkung vermittelt werden, spricht er diesem Äther bestimmte mechanische Eigenschaften zu, um die beobachtbaren elektrischen und magnetischen Phänomene, das heißt die Kraftwirkungen zwischen geladenen und magnetisierten Körpern, erfassen zu können. In den Aufsätzen „On physical lines of forces“ (Philosophical Magazine 21 (1861) und 23 (1862)) ist Maxwell dabei zu sehen, wie er sich in einem raumerfüllenden Medium einen Mechanismus ausdenkt, der die Entstehung von Induktionsströmen veranschaulichen soll. Er gelangt dabei zu folgendem Bild:

Das Medium wird durch elektrische Ströme in Rotation versetzt; zwischen den rotierenden Teilen des Mediums denkt Maxwell sich zur Vermeidung der Reibung kleine „Friktionsrollen“ eingebettet, die den Kugeln in einem Kugellager ähneln. Diese Friktionsteilchen betrachtet er als Sitz der Elektrizität. Die Brutalität dieses Mechanismus kann nicht genug betont werden,

³¹[Wiechert 1899], S. 50.

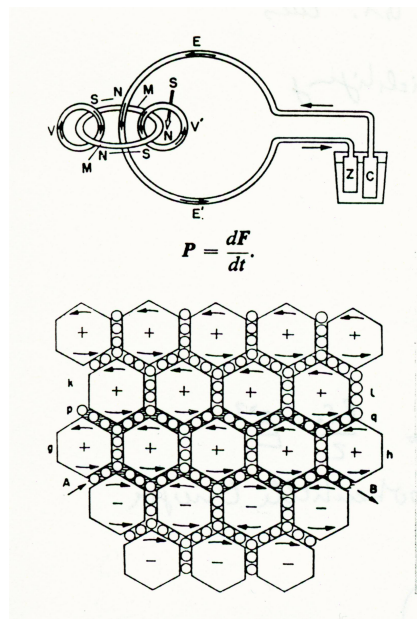


Abbildung 2.7: Friktionsrollen nach Maxwell ([Maxwell 1861])

denn diese „elektromagnetische Kugellagermaschinerie“ hat ihren Sitz im felderfüllenden Raum, nach heutiger Auffassung also, da die Physik von einem Äther nicht mehr sprechen möchte, im Vakuum selbst. Indem sie den Äther als eigentlichen Träger der elektromagnetischen Erscheinungen etablierte, gab Maxwells Theorie der Grundanschauung Faradays, dass sich die elektrischen und magnetischen Vorgänge im Zwischenmedium abspielen, ein mathematisches Gesicht und verdrängte ab dem Zeitpunkt, als Hertz mit dem Nachweis der elektromagnetischen Wellen eine entscheidende Bestätigung der Faradayschen Auffassung gelungen war, die bis dahin gültigen Fernwirkungstheorien der Elektrizität und des Magnetismus.

Im „Treatise on electricity and magnetism“ (1873) vermeidet Maxwell mechanische Modelle, ohne jedoch auf eine dynamische Theorie des Elektromagnetismus zu verzichten. Er wendet in einem Herzstück seines Treatise die Lagrangesche Mechanik zur mathematischen Beschreibung der Induktionsvorgänge an. In der Einleitung zum fünften Kapitel des Teils II (Band 2) bekennt Maxwell, dass sein „Bestreben dahin geht, die electrischen Phänomene in das Gebiet der Dynamik zu verlegen“.³² Er verzichtet demnach zwar auf anschauliche Modelle des Elektromagnetismus, hegt aber zumindest die Zuversicht, dass sich die elektrischen und magnetischen Vorgänge, durch Analogiebildung, mit den Mitteln der Lagrangeschen analyti-

³²[Maxwell 1883], S. 241.

schen Mechanik behandeln lassen müssten. Er vergleicht den Strom in einem Draht mit einer Flüssigkeitsströmung in einem Rohr, und die Selbstinduktion mit der Trägheit der strömenden Flüssigkeit. Diesen Vergleich will er nicht als Modell des elektrischen Stromes verstanden wissen, wohl aber als eine Analogie. Maxwells erkenntnistheoretischer Standpunkt ist der, dass sich der menschliche Geist, wenn er erst einmal eine Analogie zwischen den Erscheinungen der Induktion und denen der Bewegung materieller Körper gefunden habe, nur schwer daran zu hindern sei, die Analogie möglichst weit fortzusetzen. Er hält das mechanistisch-an anschauliche Denken für so fest verwurzelt in unserer Fähigkeit, die Welt zu verstehen, dass das Verständnis auch anderer Gebiete als nur das der reinen Mechanik unter einem Verzicht auf solche Analogien sehr leiden würden:

„Die grundlegende dynamische Auffassung der Materie, nach der diese durch ihre Bewegung ein *Receptor für Moment und Energie* sein soll, ist so eng mit der Art und Weise unserer Erkenntnis verwebt, dass uns überall da, wo wir auch nur die geringste Aufforderung ihr zu folgen erhalten, sofort das Gefühl überkommt, als ob wir jetzt wirklich einen Pfad entdeckt haben, der uns früher oder später notwendig zum vollständigen Verständnis unseres Gegenstandes führen müsse.“³³

Das Wesentliche der analytischen Mechanik sind, so bestätigt Maxwell hier noch einmal, Energiebetrachtungen, was nicht verwundert, da die Theorie auf der handwerklich-technischen Praxis des Umgangs mit Hebeln, Flaschenzügen und anderen Maschinen begründet worden war. Es scheint gemäß Maxwell dadurch, dass die Materie der Prototyp eines „Rezeptors für Impuls und Energie“ darstellt, eine Auszeichnung der Mechanik gegenüber den anderen Gebieten der Physik vorzuliegen. Dann würde den mechanischen Erkenntnissen ein höherer Grad von Gewissheit zufallen als den Erkenntnissen auf anderen Gebieten der Physik. Selbstverständlich ist es zweierlei, ob man den Anspruch erhebt, dass für alles eine mechanische Analogie konstruiert werden müsse, und der tatsächlichen Durchdringung eines physikalischen Phänomens mit Hilfe der Mechanik. Das Überraschende ist nun aber, dass es Maxwell in der Tat gelingt, die Induktionserscheinungen mit dem von der analytischen Mechanik bereit gestellten Lagrangeschen Formalismus einer mechanistischen Beschreibungsweise zuzuführen.

Maxwell betrachtet zwei stromdurchflossene Leiter. Zwischen diesen wirken zwei Arten von Kräften: die ponderomotorischen oder mechanischen Kräfte, die auf materielle Teile des Sys-

³³[Maxwell 1883], S. 238; Hervorhebung R. H.

tems wirken, sowie elektromotorische Kräfte, die an den bewegten Ladungen angreifen. Während der auf eine strömende Flüssigkeit wirkende mechanische Druck durch die von ihm an der Flüssigkeit verrichteten Arbeit mit Hilfe der Formel „Druck mal verschobene Flüssigkeitsmenge“ gemessen werde, die elektromotorische Kraft aber durch das Produkt dieser Kraft mit der Elektrizitätsmenge, könne man schließen, dass „man unter *Arbeit einer elektromotorischen Kraft* eine Größe von ganz derselben Art wie unter Arbeit einer mechanischen Kraft zu verstehen (hat)“.³⁴ Von der gesamten elektromotorischen Kraft werde ein Teil zur Überwindung des Widerstandes, den der Leiter dem durch sie in Bewegung gesetzten Strom entgegengesetzt, verbraucht, und erscheine als Wärme wieder. Ein zweiter Teil bewirke die wechselseitige Anziehung oder Abstoßung der beiden Leiter, während der Rest zur Vermehrung der kinetischen Energie des Stromes verwandt werde und sich in den Induktionserscheinungen manifestiere. Maxwell betont, dass wir über die inneren Mechanismen dieser energetischen Umwandlungen keine Kenntnis besitzen. Das System zweier stromdurchflossener Drähte ist sozusagen eine „black box“. Dennoch, das ist der Standpunkt Maxwells, „besitzen (wir) Methoden, mit Hilfe deren wir die Dynamik eines Systems auch ohne Kenntnis seines inneren Mechanismus zu verfolgen vermögen“.³⁵ Diese Methode ist die der Lagrangeschen Bewegungsgleichungen zweiter Art mit verallgemeinerten Koordinaten und Geschwindigkeiten. Maxwell glaubt, dass man die Bewegungsgleichungen für ein physikalisches Problem im Prinzip immer hinschreiben kann, wenn man nur weiß, wie viele Freiheitsgrade das Problem hat, über die Einzelheiten aber vorläufig noch im Unklaren ist. Wir kennen zwar die zu Grunde liegenden Mechanismen nicht, wir nehmen aber an, es gelten für dieselben die Lagrangeschen Gleichungen. Für die Entscheidung, den Lagrange-Formalismus auf Probleme der Elektrodynamik anzuwenden, hat Maxwell selbst eine erkenntnistheoretische Begründung formuliert. 1879, in seinem letzten Lebensjahr, verfasste er in der Zeitschrift „Nature“ eine Rezension über den Thomson-Taitschen *Treatise of Natural Philosophy*, worin er die Behandlung allgemeiner Bewegungsgleichungen durch Lagrange aufgriff (Maxwell konnte sich allerdings nur auf die von Routh auf zyklische Systeme erweiterten Lagrangeschen Gleichungen bezogen haben, R. H.):

„Wenn wir Grund zu der Annahme haben, dass die Phänomene, die wir beobachten können, nur ein kleiner Teil dessen sind, was sich in Wirklichkeit in dem System vollzieht, dann lautet die Frage, die wir uns stellen müssen, nicht: Welches Phänomen ergibt sich aus der Hypothese, das System sei von einer bestimm-

³⁴[Maxwell 1883], Kap. VI (Dynamische Theorie des Elektromagnetismus), S. 258.

³⁵[Maxwell 1883], S. 258.

ten Art? Die richtige Frage lautet vielmehr: Was ist die allgemeinste Spezifikation eines bestehenden materiellen Systems unter der Bedingung, dass die Bewegungen derjenigen Teile des Systems, die wir beobachten können, so sind, wie wir sie vorfinden?“³⁶

Maxwell führt also Koordinaten für die beiden Leiter und die elektrischen Teilchen ein, identifiziert die Intensitäten der Ströme mit ihren generalisierten Geschwindigkeiten, während die zugehörigen generalisierten Koordinaten nicht in der Lagrangefunktion erscheinen. Solchen Koordinaten, die nicht explizite in der Lagrangefunktion vorkommen, haben die mathematischen Physiker den Namen „zyklische Koordinaten“ gegeben. Der Ort einer in einem geschlossenen Kreislauf strömenden elektrischen Flüssigkeit ist nach Maxwells Hypothese also eine zyklische Koordinate. Die Hypothese der Zyklidizität ist eine sehr naheliegende, da es wegen der kontinuierlichen Aufeinanderfolge der Elektrizitätsteilchen nicht darauf ankommen sollte, wo das einzelne elektrische Teilchen sich gerade befindet. Sodann schreibt Maxwell die kinetische Energie des Systems hin. Dies ist ein dreiteiliger Ausdruck,

$$T = T_m + T_e + T_{me}. \quad (2.1)$$

T_m enthält nur die kinetische Energie der materiellen Teile des Systems, d.h. der beiden Drähte, und ist folglich eine quadratische Form der nicht-zyklischen Koordinaten, welche Form und relative Lage der beiden Drähte festlegen. T_e repräsentiert die kinetischen Energien der elektrischen Teilchen und ist eine quadratische Form der zyklischen Geschwindigkeiten. T_{me} schließlich ist eine aus den nicht-zyklischen und den zyklischen Geschwindigkeiten gebildete Bilinearform. Die Aufgabe, die sich nun stellt, besteht darin, zu klären, von welchen Variablen die Koeffizienten dieser quadratischen bzw. der Bilinearform abhängig sind. Aus beobachtbaren Tatsachen schließt Maxwell, dass sämtliche Koeffizienten nicht von den zyklischen Koordinaten abhängen können.

Es ist frappierend, zu sehen, wie die Lagrangeschen Gleichungen in unmechanisches Territorium einzudringen vermögen. Im siebenten Kapitel geht Maxwell von dem Energieausdruck aus, in dem die Quadrate und Produkte der Stromstärken vertreten sind, nämlich

$$T = \frac{1}{2}L_1\dot{y}_1^2 + M_{12}\dot{y}_1\dot{y}_2 + N_2\dot{y}_2^2 \quad (2.2)$$

³⁶[Peruzzi 2000], S. 9.

Dieser der Mechanik entlehnte Energieausdruck stimmt nun mit dem elektromagnetischen überein, wenn L_1 mit dem Selbstinduktionskoeffizient des ersten Leiters, M_{12} mit dem Koeffizienten der wechselseitigen Induktion und N_2 mit dem Selbstinduktionskoeffizienten des zweiten Leiters identifiziert wird. Auch hieran erkennt man, wie weitreichend die Methoden der analytischen Mechanik für die Behandlung der Induktionserscheinungen nutzbar gemacht werden können. Jene Möglichkeit, elektrische Erscheinungen mechanisch zu behandeln, ist von Boltzmann dazu genutzt worden, mechanische Modelle für elektrische und magnetische Phänomene zu ersinnen. Boltzmann steht damit in der ursprünglichen Maxwellschen Tradition, die elektromagnetischen Vorgänge in einer hydrodynamischen Analogie als Resultat von Bewegungsvorgängen im Äther erklären zu wollen. Jenes grob-mechanistische Bild wird im Treatise unterdrückt, jedoch war dies historisch der Weg, auf dem Maxwell allmählich, unter Verfeinerung der anfänglich massiv-realistischen Bilder hin zur abstrakt-energetischen Denkweise der analytischen Mechanik, zu den heute nach ihm benannten Gleichungen vordringen konnte. Die energetische Sichtweise ist zwar nicht *per se* anschaulich, da der Lagrange-Formalismus eine formelmäßige Beschreibung allgemeiner energetischer Eigenschaften mechanischer Systeme ist. Immerhin gibt es keine Aussage der analytischen Mechanik bezüglich irgendeiner Unmöglichkeit, sich die energetischen Verhältnisse der Systeme jederzeit durch Modellvorstellungen verständlich machen zu können. Die handgreiflichen mechanischen Modelle von Klein und Boltzmann für die Induktionsphänomene untermauern dies: Felix Klein³⁷ nutzte bei der Konstruktion einer mechanischen Analogie zum Induktionsvorgang die Tatsache aus, dass der symmetrische Kreisel, genau wie die beiden stromdurchflossenen Drähte, zwei zyklische Koordinaten besitzt, nämlich den Drehungswinkel ϕ um die Figurenachse, sowie die „Knotenlänge“ ψ , so dass diese Winkel Maxwells „Elektrizitätskoordinaten“ y_1 und y_2 entsprechen.³⁸ Aus den Bewegungsgleichungen für den symmetrischen Kreisel folgt die Konstanz der Geschwindigkeiten $\dot{\psi}$ und $\dot{\chi}$, was der Konstanz der Ströme y_1 und y_2 entspricht. Wenn einer der beiden stromführenden Drähte fixiert wird, wie es ja bei der Dynamomaschine der Fall ist, so existiert auch nur eine einzige Raumkoordinate x , welche die relative Lage der beiden Leiter angibt. Eine nähere Analyse zeigt, dass die Koordinate x mit dem dritten

³⁷Siehe [Klein 1898], Bd. 2, Dritter Hauptteil Die cyclischen Systeme, insbesondere S. 414- 423.

³⁸Man kann sich den symmetrischen Kreisel am einfachsten als ein sich drehendes Rad vorstellen. Aus Symmetriegründen kann das dynamische Verhalten des Rades nicht von der augenblicklichen Stellung, also auch nicht vom Drehwinkel ϕ abhängig sein. Tatsächlich hängt es nur von der Rotationsgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ des Rades um seine Achse ab. Die analog zur geographischen Länge gebildete Knotenlänge ψ ist der Winkel zwischen der so genannten Knotenlinie, das ist die Schnittgerade der raumfesten xy - Koordinatenebene mit der körperfesten $x'y'$ - Ebene, und der raumfesten x - Achse. Während der Kreisbewegung dreht sich auch die Knotenlinie.

Eulerschen Winkel ϑ des Kreisels identifiziert werden muss, um in der Kreiselbewegung ein mechanisches Abbild der Induktion zu erhalten.³⁹ Da ϑ die Neigung der Figurenachse gegen die raumfeste z -Achse ist, und aus den Eulerschen Gleichungen noch $\vartheta = const.$ folgt, liegt eine reguläre Präzession vor. Die Kraft, welche von außen auf den Kreisel wirken muss, damit ϑ einen konstanten Wert bekommt, ist das genaue Analogon zur ponderomotorischen Wirkung der beiden Ströme auf ihre Leiter.⁴⁰

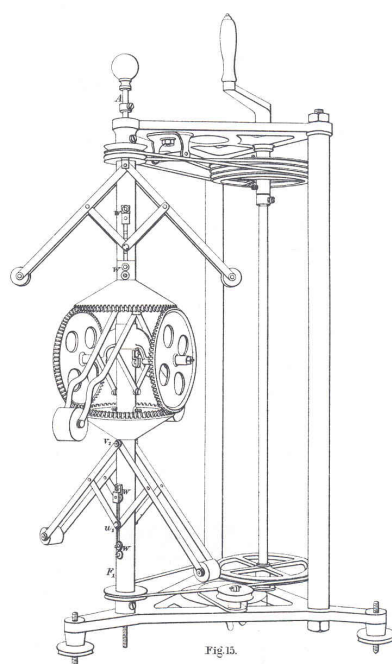


Abbildung 2.8: Boltzmanns mechanisches Modell für die elektromagnetische Induktion ([Boltzmann 1891], I. Teil, Tafel II, Fig. 15)

Ein anderes Modell für die Induktion hat Boltzmann in seinen „Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes“ angegeben. Um eine gemeinsame vertikal gestellte Achse drehen sich unabhängig voneinander zwei Räder I und II. Die beiden Räder sind über ein Zwischengetriebe miteinander verbunden, nämlich durch ein vertikales Doppelrad III, das mit Zahnrädern in die beiden Räder I und II eingreift (Abbildung 2.8). Das Zwischenrad bewirkt einen kinematischen Zusammenhang zwischen den Rädern I und II. Mit diesem Modell werden die Induktionserscheinungen nachgeahmt. Wenn man beispielsweise das Rad I plötz-

³⁹Siehe [Klein 1898], Bd. 2, S. 416.

⁴⁰Siehe [Klein 1898], Bd. 2, S. 417.

lich in Bewegung setzt, so wird das Zwischenrad sich zwar auch bewegen, jedoch wird seine Achse zunächst zurückbleiben, so dass sich Rad II entgegengesetzt zu I dreht. Das entspricht der Lenzschen Regel, dass ein beginnender Strom in einem benachbarten Stromkreis einen entgegengesetzt gerichteten Strom induziert. Das Zwischenrad im Boltzmannschen Modell entspricht bei den Induktionserscheinungen in der ursprünglichen Maxwellschen Lesart einer Friktionsrolle im Äther.

Maxwell kam das Verdienst zu, den Feldraum Faradays in einen Energiebetrachtungen zugänglichen Konfigurationsraum verwandelt zu haben. Das Modell der Friktionsrollen war ein erster Schritt in diese Richtung. Am Ende stand die Anwendung der Lagrangeschen und Routhschen Gleichungen auf Probleme der Elektrodynamik. Hinter wesentlichen Teilen der Maxwellschen Elektrodynamik verbirgt sich demnach das mechanische Konzept vom energetischen Gleichgewicht. Maxwells Theorie nahm keine Rücksicht auf die molekulare Konstitution der Materie, welche sich durch die Vorgänge bei der Elektrolyse, durch die Kathodenstrahlexperimente sowie die Zeemansche Entdeckung der magnetischen Beeinflussung der Spektrallinien und seine durch Lorentz gegebene elektronentheoretische Deutung den Physikern kurz nach Maxwells Tod immer mehr aufdrängten.⁴¹ Auf den ersten Blick schien die Molekularhypothese den älteren Fernwirkungstheorien viel stärker zuzuspielen als der Maxwellschen Äthertheorie, die eine Kontinuumstheorie war. Der erste, welcher die Maxwellsche Theorie unter Berücksichtigung des molekularen Aufbaus der Materie ausarbeitete, war H. A. Lorentz. Lorentz stellte sich die Materie als aus einzelnen kleinen Körpern, den Atomen, zusammengesetzt vor. Die Atome sollen im Äther eingebettet sein und sich in diesem bewegen. Durch diese Hypothese wurde eine Unterscheidung zwischen Äther und Materie in die Elektrodynamik eingeführt. Der kontinuumstheoretischen Behandlung des Elektromagnetismus im Maxwellschen Treatise war dieser Gedanke noch fremd, obwohl der Atomismus in Maxwells frühen Bildern der Induktionsvorgänge noch als Grundvorstellung mitschwang. Die Verfeinerung der Maxwellschen Theorie durch Lorentz schien auf den ersten Blick zu den älteren, fernwirkungstheoretischen Vorstellungen der Elektrodynamik zurückzukehren. Dies ist aber de facto nicht geschehen: Die weitere Entwicklung der Elektrizitätslehre in der Elektronentheorie hat den Gegensatz zwischen Kontinuumsvorstellung und Atomismus nicht entschieden, sondern nur überbrückt.

⁴¹Bahnbrechend wirkte von Helmholtz' Faraday- Lecture von 1881, in welcher von Helmholtz die atomistische Konstitution der Elektrizität mit Hilfe der Faradayschen Gesetze der Elektrolyse plausibel zu machen versuchte. Siehe Nature 23, 535- 540 (1881).

2.3.3 Lorentz

Hendrik Antoon Lorentz war der erste, welcher die Maxwellsche Theorie unter Berücksichtigung der atomistischen Konstitution der Materie ausarbeitete. Seine Absicht dabei war, die Elektrodynamik für die Behandlung der Optik bewegter Medien brauchbar zu machen.⁴² 1886 und 1887 hatten Michelson und Morley für die spätere Relativitätstheorie wichtig gewordene optische Experimente durchgeführt, die den Nachweis einer Relativbewegung von Erde und dem Lichtäther hätten erbringen sollen. Lorentz' Ausgangspunkt waren die atomistischen Träger der Ladung und das kontinuierliche elektromagnetische Feld, das die Wirkungen der materiellen Träger der Ladungen aufeinander vermittelt. Der elektrische Strom bestand für Lorentz aus einer Konvektion der Ladungsträger (Elektronen). Die Aufgabe bestand nun darin, einerseits den Zustand des elektromagnetischen Feldes oder „Äthers“ durch Ladung, Lage und Bewegung der Elektronen zu bestimmen, andererseits die Kraftwirkungen des Feldes auf die geladenen Teilchen anzugeben. Lorentz bediente sich des von Lagrange um das Prinzip der virtuellen Verrückungen ergänzten D' Alembertschen Prinzips, um diese beiden Aufgaben zu lösen, indem er das Elektron als mit dem Dielektrikum (präziser: mit dem das Dielektrikum charakterisierenden Feld der dielektrischen Verschiebung \vec{D}) verbundenes System auffasste, und verlangte, dass die Ladung des Elektrons immer identisch bleibt. Als unfreies System folgt das Elektron nicht einfach den einwirkenden elektrischen Feldkräften. Der Einfluss der Bindung muss sich darin äußern, dass manche Teile des Ions sich rascher bewegen, als sie es einzeln täten, andere dagegen langsamer. Wie bereits erwähnt steht hinter dem Prinzip von D' Alembert die Idee, dass für die verlorenen Komponenten der angreifenden Kräfte einer unfreien Bewegung genau dieselbe Relation besteht wie zwischen allen angreifenden Kräften im statischen Gleichgewicht. Somit ist das Prinzip eine Ausweitung des Archimedischen Hebelgesetzes auf das System der verlorenen Kräfte im Falle der Bewegung.⁴³ Die Durchführung seines Programms gab Lorentz in dem Aufsatz „La théorie electromagnetique de Maxwell et son application aux corps mouvants“⁴⁴. Lorentz gelangte zu einer Formel für die pro Volumeneinheit auf das bewegte Ion im elektromagnetischen Feld wirkende Kraft, die seitdem nach ihm benannt wird.⁴⁵ Unter der Voraussetzung, dass es sich bei den Elektronen um geladene Teilchen mit stets homogener Ladungsverteilung $\rho = const.$ handelt, lässt sich die

⁴²[Wiechert 1899], S. 86.

⁴³Siehe z. B. [Haas 1914], S. 164.

⁴⁴[Lorentz 1892].

⁴⁵[Lorentz 1892], S. 238, Formeln (61). In heutiger Symbolik handelt es sich um die Lorentzsche Kraftdichte $\vec{k} = \rho \cdot [\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$.

Lorentzsche Kraftdichte auch ersetzen durch die Lorentzkraft, welche auf das Elektron im elektromagnetischen Feld wirkt.⁴⁶ Wichtig ist, dass Lorentz in seiner ursprünglichen Arbeit von 1892 diesen Schritt noch nicht vollzieht, während es die Quantenmechanik aufgrund von Argumenten, die den Spin des Elektrons betreffen, gerade als notwendig erachtet, das Elektron als Punktteilchen aufzufassen.⁴⁷

2.4 Modelle „für etwas“

Die Mechanik nahm *de facto* eine Sonderrolle in der Physik ein. Sie wurde als Unterlage der Modellbildung auch für die jüngeren nicht-mechanischen Teilgebiete der Physik wie Elektro- und Thermodynamik verwendet. Vor Maxwells elektromagnetischer Lichttheorie gab es verschiedene mechanische Lichttheorien; die frühesten davon stammten von Newton und Huygens. Letzterer vermutete in seiner „Abhandlung über das Licht“ (1690), lange vor dem neunzehnten Jahrhundert mit seinem Credo der mechanistischen Naturerklärung: „Man wird nicht zweifeln können, dass das Licht in der Bewegung einer gewissen Materie besteht. Denn betrachtet man seine Erzeugung, so findet man, dass hier auf der Erde hauptsächlich das Feuer und die Flamme dasselbe erzeugen, welche ohne Zweifel in rascher Bewegung befindliche Körper enthalten, da sie ja zahlreiche andere sehr feste Körper auflösen und schmelzen (...) dies deutet sicher auf Bewegung hin, wenigstens in der wahren Philosophie, in welcher man die Ursache aller natürlichen Wirkungen auf mechanische Gründe zurückführt. Dies muss man meiner Ansicht nach tun, oder völlig auf jede Hoffnung verzichten, jemals in der Physik etwas zu begreifen.“⁴⁸ Auf diese Weise durchdrang die Mechanik, indem sie ganz allgemein von Ruhe und Bewegung der Körper handelte, nach und nach viele Bereiche der Physik. Dies hat Plausibilität, da die mechanischen Vorgänge in der Lebenswelt eben eine ausgezeichnete Rolle spielen. Sie beherrschen den elementaren Zugang zur Welt im Tastsinn und im handelnden Verändern der Welt. Daher ist die Mechanik eine Wissenschaft, die in mehrhundertjähriger

⁴⁶Der Ausdruck für die Lorentzkraft ist $\vec{K} = q \cdot [\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$.

⁴⁷Z. B. Bergmann und Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 2 (Elektromagnetismus), 8. Aufl. Berlin 1999, S. 474: „Spin und magnetisches Moment des Elektrons können überhaupt nicht anschaulich beschrieben werden, denn es gibt keine Hinweise auf eine räumliche Ausdehnung des Elektrons, es verhält sich immer wie ein punktförmiges Teilchen.“ Würde man das Elektron als geladene Kugel auffassen, so müsste es, um den beobachteten Wert seines magnetischen Spin- Moments zu erhalten, am „Äquator“ mit mehrfacher Lichtgeschwindigkeit um seine Achse rotieren.

⁴⁸Einleitung von Christiaan Huygens, Über das Licht (Traité de la lumière), hrsg. von E. Lommel, Frankfurt, 4. Aufl. 1996.

Entwicklung stets die Entwicklung der Kultur begleitet und einen entsprechenden Vorrat an Bildern und Denkmustern auch für andere Wissenschaften herangebildet hat. In der Hauptsache waren es energetische Beziehungen, welche sich zunächst im Umgang mit Hebeln und Maschinen herauskristallisierten und die dann die Operationsbasis für die Behandlung der elektrodynamischen Phänomene durch Maxwell und Lorentz abgaben. Maxwells mechanische Analogien der elektromagnetischen Vorgänge wecken den Verdacht, dass Machs Relativierung der Trias Raum- Zeit- Materie einen Schwachpunkt hat: Wie sollte es sich sonst erklären, dass mechanischen Analogien für Maxwell hinsichtlich der Erfassung der Induktionsphänomene einen großen Erfolg brachten. Es ist dies ein Hinweis darauf, dass die Physik insgesamt ein organisches Gebilde ist und von kulturhistorischen Voraussetzungen stärker abhängig ist, als es der Machsche Sensualismus wahrhaben will, und dass es auf einer faktisch erreichten Kulturstufe oder Höhe der wissenschaftlichen Durchdringung eines Gebietes nicht einfach wäre, das System von „Vor-Stellungen“ und „Voraus-Setzungen“, das bei dem Aufbau des Gebäudes benutzt wurde, durch ein anderes zu ersetzen, ohne das Bauwerk als Ganzes zu gefährden.

Heinrich Hertz macht in der berühmten Einleitung zu seinen „Prinzipien der Mechanik“ wichtige Bemerkungen zum Problem der Verbildlichung von Naturgegenständen. Es heißt dort, die wichtigste Aufgabe der Naturforschung sei die Vorhersage zukünftiger Erfahrungen. Als Grundlage zur Lösung dieser Aufgabe dienten vorangegangene Erfahrungen. Hertz beschreibt das Verfahren, dessen sich der Naturwissenschaftler zur Ableitung des Zukünftigen aus dem Vergangenen bedient, so:

„Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die denotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände.“⁴⁹

Die Erfahrung lehre uns nun, dass dieser Weg möglich und mit Erfolg gangbar sei. Hertz formuliert hier das Programm eines abbildtheoretisch wirksamen Geltungskriteriums physikalischer Theorien, welches aber an einer erheblichen inneren Schwäche leidet, indem es voraussetzen muss, wofür es eine Bestätigung sein will: Um nämlich die Gültigkeit, dass etwas ein zutreffendes Modell von etwas anderem sei, zu verbalisieren - und dies ist für ein Argumentieren simplerweise notwendig, wird eine gelungene sprachliche Darstellung des Modellierten

⁴⁹[Hertz 1894].

als bereits vollzogen vorausgesetzt. Dies führt ersichtlich in einen methodischen Zirkel. Bilder als Modelle von etwas im Sinne eines physikalischen Geltungskriteriums sind also ungeeignet, weil man die Bilder oder Modelle mit einer Realität vergleichen müsste, dieser Vergleich aber prinzipiell in Sprachform geleistet werden, mithin auch dasjenige, wovon das Bild oder Modell gemacht ist, immer schon in Sprache gefasst haben muss. Um das Argument an einem Beispiel zu erläutern: Gesetzt, man fordert ein Kind auf, eine Zeichnung „von diesem Baum dort“ anzufertigen. Selbstverständlich kann das Kind die Zeichnung herstellen, ohne vorher eine sprachliche Beschreibung des zu zeichnenden Gegenstandes gegeben zu haben. Jedoch, soll in einem anschließenden Diskurs (etwa von der Kunstlehrerin) die „Güte“ der Zeichnung beurteilt werden, so gelingt dies nur, wenn der zu zeichnende Baum als sprachlich erfasst mit der ebenso sprachlich erfassten Kinderzeichnung in Beziehung gesetzt wird. Erst auf diese Weise ist es möglich, den zu zeichnenden Baum und den gezeichneten Baum *sprachlich* miteinander zu vergleichen. Jeder Mensch lernt, den gesehenen Baum oder den Mond, auf den mit Fingern gezeigt wurde, in seinen Wortschatz aufzunehmen. Dieser Akt kann Thema der Entwicklungspsychologie, der Etymologie oder der Linguistik sein, jedoch nur im Sinne einer Theorie „über“. Der Spracherwerb selbst ist kein wissenschaftlicher Akt, sofern er notwendigerweise argumentationslos erfolgen muss. Nur wissenschaftliche Definitionen stehen, sofern es sich nicht um reine Nominaldefinitionen handelt, wissenschaftlicher Diskursen offen. Eine Möglichkeit, die sich bietet, eine Abbildung, eine Skizze oder ein Modell zu bewerten, *ohne* ein sprachlich bereits verarbeitetes Abzubildendes voraussetzen zu müssen, ist die Beurteilung des Bildes nach seiner Zweckmäßigkeit: Modelle „für etwas“ stehen einem handlungstheoretischen Diskurs offen, wenn sie, als eine Art von funktionaler Erklärung, nach Kriterien der Fruchtbarkeit oder Zweckmäßigkeit beurteilt werden.⁵⁰ Dann aber kann ein Zusammenbruch von Modellierungsstrategien nicht mehr in einer eben so seienden Natur gesucht werden, denn die Annahme einer unabhängig von den sprachlichen Bedingungen des erkennenden Subjekts vorhandenen Natur ist nach der hier gegebenen Argumentation gegen Modelle „von etwas“ zurückzuweisen. In einem Vorgriff auf die noch näher zu erörternde quantenmechanische Modellproblematik kann hier bereits festgehalten werden, dass die Ursache jener Problematik, jedenfalls nach der Stoßrichtung des vorliegenden Versuchs, in einer Unzulänglichkeit der physikalischen Theorie zu suchen ist und nicht als ein Faktum der Natur hingenommen werden sollte.

⁵⁰Diese Erkenntnisse verdanke ich Hinweisen P. Janichs, R. H.

2.5 Die Kinematik des Zeeman-Effektes

Funktioniert das Bild der präzedierenden Zeeman-Ellipse deswegen, weil der argumentative Kern dieses Bildes nicht raum-zeitliche, sondern irgendwelche anderen Beziehungen sind? Aus Symmetriegründen ist sowohl der Drehwinkel ϕ um die Figurenachse des Kreisels als auch der Ort des Elektrons auf seiner Ellipsenbahn eine zyklische Koordinate. Ferner ist sowohl beim Kiesel als auch bei dem Abrollen der Zeeman-Ellipse auf dem Kegelmantel die Knotenlänge ψ ebenfalls zyklisch. Denn es gibt keine Abrollstellung auf dem Kegelmantel, die gegenüber einer anderen bevorzugt wäre. Das Drehmoment beziehungsweise die Kraft, die von außen angreifen muss, um die Neigung der Figurenachse gegen die Vertikale konstant zu halten, wird im mechanischen Fall von der Schwerkraft, im atomaren Fall von der magnetischen Feldkraft erbracht. Die Larmorpräzession ist somit ein vollständiges Analogon zur Präzession des mechanischen Kreisels. Den Mechanismus der Strahlungserzeugung kann das anschauliche Bild der Zeeman-Ellipse nicht reproduzieren, da Quantensprünge in Raum und Zeit nicht darstellbar sind. Jedoch die durch die Larmorpräzession, das heißt die durch das Magnetfeld hervorgerufene Frequenzverschiebung stimmt mit der quantenmechanisch berechneten überein. Eine Vermutung, die sich hieran anknüpfen könnte, bestünde darin, dass es weder auf die Bewegung des Elektrons auf seiner Ellipsenbahn allein, noch auf den Abrollvorgang der Ellipse allein ankommt, sondern auf ihre Verkettung, ihr gegenseitiges Übersetzungsverhältnis. Würde sich dieser Verdacht erhärten, so wäre damit zugleich die Aufgabe formuliert, eine Quantenkinematik auf der Grundlage von „Kreisen mit Geschwindigkeitsverhältnissen“ zu entwickeln. Eine derartige Quantenkinematik würde, da sie von Geschwindigkeitsverhältnissen als primärer kinematischer Größe ausginge, eine relationale Theorie *sui generis* von Quantenphänomenen begründen.

3 Die Heisenbergsche Quantenmechanik

3.1 Übergang von der klassischen Physik zur Quantenphysik

Die Physik gelangte erst im ersten Dezennium des zwanzigsten Jahrhunderts zu der Überzeugung, dass die Atome mehr als eine bequeme Arbeitshypothese seien, dass die Behauptung des atomaren Aufbaus der Materie dieselbe Qualität habe wie die Aussage, dass das Licht eine elektromagnetische Welle ist. Die Entdeckung der atomistischen Konstitution der Elektrizität führte allmählich auch in der Physik zur Rezeption der Atomhypothese, nachdem Lorentz eine elektronentheoretische Erklärung der von P. Zeeman 1896 entdeckten Aufspaltung der Spektrallinien durch die Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes gelungen war. Eine entscheidende Erweiterung atomistischer Vorstellungen in der von Rudolf Clausius geschaffenen mechanischen Wärmetheorie bildete die von Ludwig Boltzmann aufgebaute statistische Wärmetheorie, insbesondere seine wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Vor Boltzmann hatte Helmholtz zwar schon thermodynamische Systeme durch zyklisch-mechanische Systeme modelliert. Allerdings scheiterte Helmholtz' Vorgehen an den irreversiblen thermodynamischen Prozessen, zu denen alle reale thermodynamischen Vorgänge gehören. Da der Mechanik das Prinzip der Irreversibilität fremd ist, kann die mechanische Wärmetheorie über die Irreversibilität keine Rechenschaft ablegen.¹ Eben deshalb wollten Planck und viele seiner Kollegen nicht an die Realität der Atome glauben. Boltzmann, überzeugter Atomist, hielt seinen Kritikern die Deutung der Entropieänderung, das heißt des Maßes der Irreversibilität einer thermodynamischen Zustandsänderung, als ei-

¹Siehe [Klein 1927], Teil I, S. 211- 215.

nes Übergangs von einem Zustand geringerer in einen solchen von größerer Wahrscheinlichkeit entgegen. In einer zielführenden Anwendung der Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Entropie auf das Problem der schwarzen Strahlung war Planck im Dezember 1900 auf den Boden der Atomistik getreten. Um für ein Licht emittierendes molekularen Oszillatorensystem die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Energieverteilung berechnen zu können, musste er - in Bruch mit der Stetigkeitshypothese der gesamten klassischen Physik - die Energie eines mit der Frequenz ω schwingenden Oszillators aus endlichen Energiequanten $\hbar\omega$ aufgebaut denken.² Plancks Erklärung der Energieverteilung im Normalspektrum mit Hilfe der Quantenhypothese $E = \hbar\omega$, welche als die Geburtsstunde der Quantentheorie gelten darf, war also gerade durch Boltzmanns Atomismus möglich geworden.

Niels Bohr und Arnold Sommerfeld entwickelten dann während des Ersten Weltkrieges ein Atommodell, welches das Atom als kleines Planetensystem darstellte und den Vorzug besaß, über die Spektrallinien erhitzter Gase Rechenschaft geben zu können. In diesem Bild bestand das Atom aus einem positiv geladenen Kern, um den auf bestimmten, durch gewisse Quantenbedingungen ausgezeichneten mechanischen Bahnen negativ geladene Elektronen Keplersche Bewegungen ausführen sollten. Bohr und Sommerfeld identifizierten die Elektronenbahnen mit den Energiezuständen, welche das Atom annehmen kann. Die Emission oder Absorption von Licht durch das Bohrsche Atom erfolgte durch Übergänge zwischen den verschiedenen Energieniveaus und wurde mit Hilfe der Bohrschen Frequenzbedingung $\omega = \frac{\Delta E}{\hbar}$ beschrieben. Anschaulich emittierte das Bohrsche Atom also ein Lichtquant $\hbar\omega$, indem es von einer Quantenbahn höherer Energie in eine solche niedrigerer Energie „sprang“. Der diskrete Energiesprung ΔE selbst war in keinem klassischen Bild fasslich zu machen. Aus diesem Grunde entschloss sich Werner Heisenberg im Frühjahr 1925 zu einem sehr viel abstrakteren als dem Bohrschen Atommodell.

3.2 Das Korrespondenzprinzip

Das von Bohr aufgestellte Korrespondenzprinzip³ stellt einen Zusammenhang her zwischen den Periodizitätseigenschaften der Elektronenbahnen eines mechanischen Atommodells und seinem tatsächlich beobachteten, quantentheoretischen Verhalten. In der klassischen Theorie,

²[Max Planck 1959], S. 23. Siehe auch [Planck 1900] und [Planck 1943].

³Unter diesem Namen wurde das Prinzip in [Bohr 1923], S. 142 ff. eingeführt.

also in der Maxwell-Lorentzischen Elektrodynamik, sind die emittierten Frequenzen identisch mit dem Frequenzspektrum der mechanischen Bewegung, welches darstellbar ist durch beliebige Linearkombinationen der Grundfrequenzen $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s$ eines s -fach periodischen Systems, in dem Falle des Bohrschen Atommodells, das heißt durch

$$\omega_{\tau_1 \dots \tau_s} = \tau_1 \cdot \omega_1 + \tau_2 \cdot \omega_2 + \dots + \tau_s \cdot \omega_s, \quad (3.1)$$

worin die $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_s$ ganzzahlig positiv oder negativ sind und die Nummern der Oberschwingungen bedeuten.⁴

Das empirische Faktum der chemischen Stabilität der Atome zwang Bohr, für das Atom Postulate einzuführen, die von Anfang an den Gesetzen der Klassik widersprachen. So ist das Atom nach Bohr einer Anzahl von ausgezeichneten oder stationären Zuständen fähig, denen eine Stabilität eigen ist, wie sie mit den Begriffen der klassischen Elektrodynamik nicht erklärt werden kann. Der Zeeman-Effekt machte es nahezu unausweichlich, die Spektrallinien der Atome als von inneratomaren Elektronenbewegungen verursacht anzunehmen; aber ein periodisch umlaufendes Elektron müsste nach Lorentz kontinuierlich Energie durch Abstrahlung verlieren und dabei seinen Zustand kontinuierlich ändern. Dagegen beobachtet der Chemiker, dass vor und nach einer chemischen Reaktion die Zustände der Reaktionspartner stabil sind. Auch der Spektroskopiker beobachtet eine diskrete Lage der Spektrallinien, während nach der Klassik ein kontinuierlich Energie verlierendes Elektron auch ein kontinuierliches Spektrum erzeugen würde. Bei den Spektrallinien wird Bohrs Stabilitätspostulat ergänzt durch die zweite Annahme, „daß, falls ein Übergang zwischen zwei stationären Zuständen von Emission von Strahlung begleitet ist, diese Strahlung aus einem Zug harmonischer Wellen besteht, deren Frequenz durch die Beziehung $h\nu = E_1 - E_2$ (was gleichbedeutend ist mit der Formel $\hbar\omega = E_1 - E_2$, R.H.) bestimmt wird, wo E_1 und E_2 die Energiewerte des Atoms im Anfangs- bzw. im Endzustand bedeuten.“⁵

Die Quantentheorie gibt daher den unmittelbaren Zusammenhang zwischen den inneratomaren Bewegungen und dem Resultat des Emissionsprozesses auf, indem nach Bohrs Postulat

⁴Der Periodizitätsgrad s ist dabei definiert als die Anzahl der Grundfrequenzen ω , die nötig sind, um die Bewegung durch diese „Grundfrequenzen“ $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s$ und ihre Oberschwingungen $2\omega_1, 3\omega_1, \dots; 2\omega_2, 3\omega_2, \dots; 2\omega_s, 3\omega_s, \dots$ auszudrücken.

⁵[Bohr/Kramers/Slater 1924], S. 72. Die Gleichwertigkeit der Formeln rührt von den Identitäten $\nu = \omega/2\pi$ und $h = 2\pi\hbar$ her.

die quantentheoretischen Frequenzen ω_{quant} als Differenzen eines stationären Anfangs- und eines stationären Endwertes einer Energie resultieren sollen:

$$\omega_{\text{quant}} = \frac{E(n'_1 \dots n'_s) - E(n''_1 \dots n''_s)}{\hbar} \quad (3.2)$$

Ein Zusammenhang zwischen der Klassik und der Quantentheorie wird nach Bohr erreicht,

„wenn man die verschiedenen möglichen Strahlungsprozesse den verschiedenen in der Bewegung des Atoms auftretenden harmonischen Schwingungskomponenten zuordnet, und zwar so, daß wir die Möglichkeit des Auftretens eines von Strahlung begleiteten Übergangs zwischen zwei stationären Zuständen eines mehrfach periodischen Systems, deren Quantenzahlen bzw. gleich $n'_1 \dots n'_s$ und $n''_1 \dots n''_s$ sind, als bedingt ansehen von der Gegenwart derjenigen harmonischen Schwingungskomponente in dem durch (2) gegebenen Ausdruck für das elektrische Moment des Atoms (gemeint ist, bis auf einen Faktor von der Dimension einer Ladungsmenge, die Fourierzerlegung $x(t) = \sum_{\tau_1 \dots \tau_s} a_{\tau_1 \dots \tau_s} \cdot e^{i(\tau_1 \omega_1 + \dots + \tau_s \omega_s) \cdot t}$ der als s -fach periodisch angenommenen Umlaufsbewegung des strahlungsverursachenden Elektrons, R.H.), für deren Schwingungszahl $\tau_1 \omega_1 + \dots + \tau_s \omega_s$ die Gleichungen gelten

$$\tau_1 = n'_1 - n''_1 \quad \dots \quad \tau_s = n'_s - n''_s.$$

Diese nennen wir deshalb die „korrespondierende“ Schwingungskomponente in der Bewegung, und den Inhalt der obigen Aussage bezeichnen wir als das „Korrespondenzprinzip“ für mehrfach periodische Systeme.“⁶

Es existiert, Bohrs Korrespondenzprinzip zufolge, eine Art von Übereinstimmung zwischen den quantentheoretisch möglichen Übergängen zwischen stationären Zuständen und den harmonischen Komponenten der Bewegung im klassischen Atommodell. Genauer gilt zum Beispiel für den einfachsten Fall eines *einfach*-periodischen Systems $x(t) = \sum_{\tau} a_{\tau} \cdot e^{i\tau\omega t}$, dass der τ -ten klassischen Oberschwingung $\tau \cdot \omega$ in der Quantentheorie eine Spektralfrequenz entsprechen soll, die durch Quantensprung von einem Anfangszustand n in einen Endzustand $n - \tau$ erzeugt wird.

⁶[Bohr 1923], S. 142; Hervorhebung und Anmerkung R.H.

3.3 Die virtuellen Oszillatoren

Das Verhalten eines Atoms ist nicht einfach mit den Bewegungen in den stationären Zuständen verknüpft. Was die Emission und Absorption von Strahlung betrifft, so sind die zugehörigen quantentheoretischen Frequenzen der Strahlung mit Energiedifferenzen der möglichen Übergänge verknüpft, während die klassischen Spektralfrequenzen einfach identisch wären mit den Frequenzen der inneratomaren Bewegungen (genauer: des Fourierspektrums, wenn die inneratomaren Bewegungen, da sie periodisch gedacht werden müssen, in eine Fourier-Reihe entwickelt werden). Ferner zeigen die Dispersions- und Fluoreszenzphänomene, dass das Atom auf ein äußeres Strahlungsfeld nicht mit den Eigenschaften der klassischen Bahnen reagiert, sondern mit den tatsächlich beobachteten spektralen, das heißt mit den quantentheoretischen Frequenzen.

Das Korrespondenzprinzip zeigt nun aber, dass wenigstens im Grenzfall hoher Quantenzahlen, also im Grenzfall hoher Energien, quantentheoretische Frequenz und korrespondierende klassische Schwingungsfrequenz asymptotisch gleich sind. Dieser Zusammenhang brachte Bohr auf die Idee, dass es bei kleinen Quantenzahlen möglich sein müsse, den quantentheoretischen Frequenzen periodische Bewegungen wenigstens von „virtuellen“ Oszillatoren im Atom zuzuordnen. Eine explizite Formulierung dieser Idee findet sich in der Arbeit von Bohr, Kramers und Slater von 1924 mit dem Titel „The quantum theory of radiation“:⁷

„Das Korrespondenzprinzip hat dazu Anlaß gegeben, die Reaktion eines Atoms auf ein Strahlungsfeld mit der Reaktion auf ein solches Feld zu vergleichen, die man nach der klassischen Elektrodynamik von einer Anzahl von „virtuellen“ harmonischen Oszillatoren erwarten sollte, deren Frequenzen den nach Gleichung (1) (gemeint ist die Gl. $\hbar \omega = E_1 - E_2$, wo E_1 und E_2 die Energiewerte des Atoms im Anfangs- bzw. Endzustand bedeuten, R.H.) für die verschiedenen möglichen Übergänge nach anderen stationären Zuständen bestimmten Frequenzen gleich sind.“⁸

Die Hauptschwierigkeit der Quantentheorie in den Jahren 1924 und 1925 war, dass diese virtuellen Oszillatoren, die ja den quantentheoretischen Übergangsmöglichkeiten von einem bestimmten stationären Zustand relativ kleiner Energie aus entsprechen, sich nicht eindeutig

⁷Phil. Mag. 47, 785- 802 (1924); in deutscher Fassung unter dem Titel „Über die Quantentheorie der Strahlung“ in [Bohr/Kramers/Slater 1924].

⁸[Bohr/Kramers/Slater 1924], S. 74.

den harmonischen Schwingungskomponenten in der Elektronenbewegung zuordnen ließen. Asymptotische Gleichheit ließ das Korrespondenzprinzip nur für hohe Quantenzahlen, also für große Energiewerte der stationären Zustände, zu. Obgleich die Einführung der virtuellen Oszillatoren dazu dienen sollte, die auftretenden quantentheoretischen Strahlungsfrequenzen wieder mit „mechanischen“ Schwingungen im Atom in Verbindung zu setzen, waren die Schwingungen der virtuellen Oszillatoren dennoch nicht identisch mit den mechanischen Schwingungen im Atom nach der alten Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie. Das Hauptziel dieser Zeit bestand darin, den Zusammenhang zwischen den Schwingungen der virtuellen Oszillatoren und den tatsächlichen, in der Spektroskopie direkt beobachtbaren quantentheoretischen Schwingungen systematisch zu erraten, oder, in Heisenbergs Sprechweise, das Korrespondenzprinzip geeignet zu „verschärfen“, um so Anhaltspunkte für eine quantentheoretische Voraussage insbesondere der Intensitäten der Spektrallinien zu gewinnen. Denn während die Klassik eine direkte Berechnung der Intensitäten via Amplituden der zugehörigen Fourierentwicklung ermöglicht, enthält die ursprüngliche Bohrsche Theorie keinerlei Aussage über Intensitäten von Emissions- oder Absorptionslinien. Das Korrespondenzprinzip baute dabei eine Brücke zwischen den virtuellen Oszillatoren hoher Energie und den klassisch nach Fourierzerlegung der mechanischen Bahnen berechneten Frequenzen. Die verbleibende Lücke, also die Frequenzen der virtuellen Oszillatoren mit kleiner Energie, waren durch eine Ausweitung („Verschärfung“) des Korrespondenzprinzips ins Gebiet niedriger Quantenzahlen zu extrapolieren.

„Abgesehen von der Grenze hoher Quantenzahlen gestattet das Korrespondenzprinzip im allgemeinen nur angenäherte Schlüsse über die Intensität und den Schwingungszustand der den möglichen Übergangsprozessen zugeordneten virtuellen Oszillatoren. Dies hat seinen Grund darin, daß die virtuellen Oszillatoren nur in einer sehr symbolischen Weise mit der Bewegung der Elektronen in den stationären Zuständen verknüpft sind. (...) Wenn es sich in dieser Weise gezeigt hat, daß die virtuellen Oszillatoren die Strahlung des Atoms bestimmen, in gewissem Sinne unabhängig von der Bewegung der Elektronen des Atoms in dem betreffenden stationären Zustand sind, so kann man erwarten, daß sich die Analogie der virtuellen Oszillatoren mit den klassischen Strahlungsgrößen in manchen Fällen schärfer durchführen läßt, als dies bei einer Betrachtung der stationären Zustände allein möglich erschiene. So werden wir im folgenden zu zeigen versuchen, daß sich ... das Korrespondenzprinzip hinsichtlich der Beschreibung der

virtuellen Oszillatoren so weit verschärfen läßt, daß eindeutige Schlüsse auf die quantentheoretische Strahlung, was Intensität und Polarisierung betrifft, möglich sind.“⁹

Den entscheidenden Schritt zur Festlegung der Schwingungsfrequenzen der virtuellen Oszillatoren auch mit niedrigem Energieinhalt tat Heisenberg im Frühsommer 1925. In einem Brief an Ralph Kronig, datiert vom 5. Juni 1925 nimmt in Heisenbergs Gedanken die Idee Gestalt an, dass die Kenntnis der Gesamtheit der Schwingungsamplituden ausreichen müsste, um alles auszurechnen, was am Atom interessieren könnte. Die Grundlage dieses Gedankens ist die Tatsache, dass schon in der Klassik jede kinematische oder dynamische Größe (Ort, Impuls, Kraft usw.), sofern sie nur periodisch ist, eindeutig durch die Gesamtheit ihrer Fourierkoeffizienten repräsentiert werden kann. Die Fourierkomponenten sind nun aber gerade diejenigen Größen, auf die sich das Korrespondenzprinzip bezieht, um sie in quantentheoretische Schwingungsamplituden respektive Übergangswahrscheinlichkeiten zu verwandeln.¹⁰ Da in der Klassik Fourierentwicklungen auch potenziert oder allgemeiner miteinander multipliziert werden müssen, um zu quantitativen Folgerungen betreffs der strahlungsmäßigen Größen zu kommen, besteht das Hauptproblem der quantentheoretischen Verwandlung darin, eine allgemeine Regel für die Multiplikation der quantentheoretischen Schwingungsamplituden aufzustellen. Heisenberg betrachtete in dem Brief an Kronig das beobachtbare elektrische Feld, welches von einem (unbeobachtbaren) anharmonisch schwingenden Oszillator abgestrahlt wird. Das Quadrat der Fourierentwicklung des elektrischen Feldes an einem entfernten Ort vom Schwingungszentrum ergibt einen Wert für die messbare Intensität des Feldes in jenem Punkt. Heisenberg ging nun rückwärts vor: Er drückte die einzelnen Fourierkoeffizienten oder -amplituden des elektrischen Feldes als Funktionen der Amplituden einer Fourierentwicklung der nicht messbaren Ortsvariablen $x(t)$ des Oszillators aus. Heisenberg erkannte, und dies ist tatsächlich der auch für die Quantentheorie springende Punkt, dass in der klassischen Theorie alle beobachtbaren Größen, die mit der emittierten Strahlung zusammenhängen, als Beziehungen zwischen den Fourieramplituden der unbeobachtbaren mechanischen Bewegung des Oszillators dargestellt werden können. Heisenberg schöpfte hieraus den Verdacht, dass diese grundlegende Idee auch in der Quantentheorie gelten könnte. Seine Aufgabe bestand jetzt darin, die Beziehungen zwischen den Fourieramplituden der Ortskoordinate des

⁹[Heisenberg 1925a], S. 617- 618.

¹⁰Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen quantentheoretischer Schwingungsamplitude $a(n, n - \tau)$ und Einsteinscher Übergangswahrscheinlichkeit $A_{n-\tau}^n$ lautet $A_{n-\tau}^n = \frac{4e^2}{3c^3\hbar} \cdot |a(n, n - \tau)|^2 \cdot \omega^3(n, n - \tau)$.

Oszillators neu zu deuten, und zwar so, dass daraus Relationen zwischen den beobachtbaren Eigenschaften der emittierten Strahlung wurden. Die quantentheoretische Verwandlung geht aber gerade mit einer Transformation der unbeobachtbaren Fouriersummanden $a_\tau \cdot e^{i\tau\omega t}$ in spektroskopisch sich bemerkbar machende virtuelle Oszillatoren $a(n, n - \tau) \cdot e^{i\omega(n, n - \tau)t}$ parallel, so dass Heisenberg mit einer Mischung dieser quantentheoretischen Verwandlung und der anderen Idee, alles spektroskopisch Relevante mit den Amplituden der Ortsfunktion auszudrücken, die lange verschlossene Tür zur Quantenmechanik aufschloss. Heisenberg fand die quantentheoretische Multiplikationsregel als Analogon zur Multiplikationsvorschrift für Fourierreihen, indem er das Ritzsche Kombinationsprinzip investierte: Der Übergang von einem spektroskopischen Term n zu einem anderen Term m ließ sich gemäß einer von W. Ritz bereits 1908 aufgestellten Regel¹¹ durch Zwischenterme k realisieren, wo k zwischen n und m gelegen ist, zum Beispiel

$$\omega(n, n - 2) = \omega(n, n - 1) + \omega(n - 1, n - 2) \quad (3.3)$$

Auf diesem Ritzschen Kombinationsprinzip gestützt verwandelte Heisenberg zum Beispiel das Quadrat des Fouriersummanden

$$b \cdot e^{i2\omega t} = (a \cdot e^{i\omega t})^2 = a^2 \cdot e^{i2\omega t} \quad (3.4)$$

in das entsprechende quantentheoretische Quadrat

$$\begin{aligned} b(n, n - 2) \cdot e^{i\omega(n, n - 2)t} &= (a(n, n - 1) \cdot e^{i\omega(n, n - 1)t})^2 \\ &= a(n, n - 1) \cdot a(n - 1, n - 2) \cdot e^{i[\omega(n, n - 1) + \omega(n - 1, n - 2)]t} \end{aligned} \quad (3.5)$$

oder, wegen $\omega(n, n - 1) + \omega(n - 1, n - 2) = \omega(n, n - 2)$,

$$b(n, n - 2) = a(n, n - 1) \cdot a(n - 1, n - 2) \quad (3.6)$$

¹¹[Pohl 1976], S. 191.

Man erkennt, dass es das empirisch gesicherte Kombinationsprinzip der Spektren ist, welches diese Regel für das quantentheoretische Quadrat nach sich zieht. Da nun der Grundgedanke der war, jede spektroskopische oder strahlungsmäßige Größe klassisch durch Fourierkoeffizienten, quantentheoretisch jedoch durch die diesen durch das Korrespondenzprinzip zugeordneten Strahlungsamplituden zu repräsentieren, war Heisenberg nunmehr im Besitz eines Werkzeugs, welches die von den Spektroskopikern direkt messbaren Strahlungsamplituden (genauer sind es die diesen zugeordneten Übergangswahrscheinlichkeiten, die in der Spektroskopie direkt als Intensitäten von Spektrallinien gemessen werden) *zueinander* in Relation setzt, indem die in Übergangsamplituden entwickelten kinematischen Größen in die (Newtonschen) Bewegungsgleichungen eingesetzt werden. Auf diese Weise hatte Heisenberg einen relational arbeitenden Schlüssel zu den Atomvorgängen gefunden, der zwar nicht mehr in Raum und Zeit schloss, aber doch in der *Gesamtheit* der zwischen den Übergangsamplituden geltenden Relationen. Es war gerade der Übergang von den kinematischen Größen zu ihren Fourierentwicklungen beziehungsweise zu ihren quantentheoretischen Repräsentationen, die die Betrachtung des Atoms vom Raumzeitlichen in die Symbolik einer unendlichdimensionalen Algebra übersetzte. Heisenberg war sich dieses Fortschritts im besagten Brief an Kronig wohl bewusst, zweifelte allerdings noch, ob sein „atomtheoretischer Relationalismus“, der ja auf eine unendlichdimensionale Algebra und Kombinatorik hinauslief, überhaupt praktisch rechenbar wäre. Heisenberg erahnte auch bereits das durch die „quantentheoretische Verwandlung“ entstandene Problem der physikalischen Bedeutung des neuen, rein relationalen Rechenschemas:

„Was mir an diesem Schema gefällt, ist, dass man wirklich alle Wechselwirkungen zwischen Atom und Außenwelt dann auf die Übergangswahrscheinlichkeiten reduzieren kann ... Nicht zufrieden bin ich zunächst mit der mathematischen Seite (ich sehe bis jetzt keine Möglichkeit einer einfachen Berechnung der Intensitäten) ... Die physikalische Bedeutung des obengenannten Schemas zur Berechnung der Intensitäten gibt auch wieder sehr sonderbare Gesichtspunkte.“¹²

Die letzte Stufe auf dem Weg, das Korrespondenzprinzip zu verschärfen, stellt Heisenbergs Abhandlung „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“ dar. In dieser Arbeit gelingt es Heisenberg, den Nachweis zu führen, dass der von ihm ersonnene Schematismus wenigstens in den physikalisch einfachsten Beispielen die Intensitäten und den Polarisationzustand von Spektrallinien zu berechnen gestattet. Obwohl in dieser

¹²[Kronig 1960], S. 25.

Arbeit nicht ein einziges Mal von virtuellen Oszillatoren die Rede ist, stehen dieselben doch stets im Hintergrund der Heisenbergschen Entwicklungen. Der Grundgedanke Heisenbergs ist, alles, was an beobachtbaren Phänomenen bezüglich der Strahlungsvorgänge beim Atom vorhanden ist, auf eine geeignete, neue Kinematik und Mechanik dieser virtuellen Oszillatoren zurückzuführen und jede Beziehung der Strahlungsvorgänge zu irgendwelchen klassischen Bahnvorstellungen abzuschneiden, weil „schon die ... Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an eine Gültigkeit der klassischen Mechanik schlechterdings nicht gedacht werden kann.“¹³

Alle physikalischen Eigenschaften der Atome durch eine Verschmelzung der direkt beobachtbaren Größen mit einfachen Eigenschaften der virtuellen Oszillatoren erklärlich zu machen, das ist die Geburtsstunde einer mit Recht so heißen Quantenmechanik, während die alte Bohr-Sommerfeldsche Quantentheorie lediglich eine aus der Not heraus geborene Vermengung widersprüchlicher klassischer und quantentheoretischer Postulate gewesen war. Der Quantenmechanik geht eine neue Kinematik voraus, welche die Unterlage für korrekte Rechnungen der Mechanik der virtuellen Oszillatoren bildet. Es stellt sich heraus, dass die Kinematik der virtuellen Oszillatoren durch unendlichdimensionale Matrizen zu beschreiben ist; dies ist eine direkte Folge des Versuchs, nur direkt Beobachtbares als Grundelemente der neu zu bauenden Quantenmechanik zuzulassen, nämlich Schwingungsfrequenzen und Übergangswahrscheinlichkeiten, das heißt Intensitäten von Spektrallinien. Um Quantenmechanik treiben zu können, ist dann eine Bewegungsgleichung für die unendliche Anzahl von Matrizengrößen aufzustellen. Der Geburtshelfer der neuen Matrizenmechanik ist das Korrespondenzprinzip, da im Grenzfall hoher Quantenzahlen alles in die bekannte, klassische Mechanik übergehen muss, daher die Matrizenmechanik sich asymptotisch der Newtonschen Mechanik mit ihrem Bewegungsgesetz „Die Kraft ist gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung“ anzunähern hat. In der Quantenmechanik ist die Bewegungsgleichung eine Beziehung zwischen Orts- und Geschwindigkeitsmatrix, also eigentlich eine Beziehung zwischen Übergangswahrscheinlichkeiten oder Intensitäten, da die Matrizen von Heisenberg aus den Einsteinschen Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen stationären Zuständen konstruiert sind.

Es musste als ein glücklicher Umstand erscheinen, dass die Bewegungsgleichungen, ausgedrückt in den Übergangsamplituden, auch in der Quantenmechanik weiterhin ihre Gültig-

¹³[Heisenberg 1925b], S. 879- 880.

keit behielten, obwohl jene Gleichungen sich ursprünglich auf klassische kinematische Größen bezogen, die ja vom Heisenbergschen Prinzip der Beobachtbarkeit im Aufbau der neuen Atomtheorie ausgeschlossen sein sollten. Bei Heisenberg stellte sich die Sache etwas anders dar. Für ihn war es nicht das Verwunderliche, dass auch die quantentheoretischen Amplituden die (nach wie vor als gültig unterstellten) Bewegungsgleichungen und vor allem den Energieerhaltungssatz befriedigten, sondern bei Heisenberg lautete die Frage, „was eigentlich die Bewegungsgleichungen bedeuten, wenn man sie als Relation zwischen Übergangswahrscheinlichkeiten auffaßt“.¹⁴ Die „Passung“ von Übergangswahrscheinlichkeiten und Bewegungsgleichungen ließe sich allenfalls zurückführen auf das Korrespondenzprinzip, denn dieses war ja der Berechtigungsschein dafür, dass zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik bzw. Elektrodynamik analogisiert werden durfte. Aber da Heisenbergs Bestreben, den Begriff der Elektronenbahnen im Atom „restlos umzubringen und geeignet zu ersetzen“¹⁵, aus dem Versagen der Bohr- Sommerfeld- Theorie beim Heliumatom und bei den anomalen Zeeman-Effekten motiviert worden war, scheint es beinahe so, als trete mit dem verschärften Korrespondenzprinzip auch die Klassik durch die Hintertür in die Quantenmechanik wieder ein. Die hiermit angedeutete Tendenz, trotz eines unausgesprochen relationalen Vorgehens wieder in die Begrifflichkeit der Newtonschen Physik zurückzufallen, wurde in den auf 1925 folgenden Jahren noch stärker. Es war nicht nur das Bedürfnis der Quantentheoretiker, die unanschauliche Matrizenmechanik einem physikalischen und das hieß einem in Raum und Zeit gestaltbaren Verständnis zuzuführen. Es sollte auch die von Bohr ausgegebene Parole, dass die Sätze der Quantenmechanik auf die Experimentierpraxen zu beziehen seien, formal präzisiert werden, so dass eine Anbindung des quantenmechanischen Formalismus an den in klassischer sprachlicher Beschreibung gegebenen Vollzug der Experimente unumgänglich erschien. Das Bedürfnis nach einem visualisierbaren Verständnis von Heisenbergs quantenmechanischen Bewegungsgleichungen wurde stark, weil es Experimente gab, in denen sich Elektronen und andere Mikroteilchen sich ganz klassisch und mit den gewöhnlichen Mitteln der Newtonschen und Maxwellschen Physik beschreiben ließen, etwa wenn Elektronenstrahlen durch ein makroskopisch homogenes elektrisches oder magnetisches Feld flogen (Kathodenstrahlversuche), wo also keine Rede davon sein konnte, dass die Bahn von Elektronen prinzipiell unbeobachtbar sei.

Es könnte gegen die vorstehende Analyse der Heisenbergschen Ideenentwicklung eingewen-

¹⁴Heisenberg in einem Brief an Pauli, 24. Juni 1925. Siehe [Pauli, Briefe], Brief Nr. 93.

¹⁵[Pauli, Briefe], Brief Nr. 96 (datiert 9. Juli 1925).

det werden, dass doch in dem grundlegenden Aufsatz „Über quantentheoretische Umdeutung klassischer kinematischer und mechanischer Beziehungen“ mit keinem Wort die virtuellen Oszillatoren genannt werden, die in den Monaten vor Juli 1925 in Heisenbergs Arbeiten so wichtig waren. Darauf ist zu antworten, dass Heisenberg in jenem Aufsatz das Prinzip der Beobachtbarkeit zum Ausgangspunkt seiner Gedanken macht. Das Prinzip der Beobachtbarkeit sollte, nach dem Scheitern der Bohr-Sommerfeldschen Quantenmechanik bei der Berechnung des Heliumspektrums, angesichts der unüberwindlichen Schwierigkeiten, welche der anomale Zeeman-Effekt einer korrespondenzmäßigen Behandlung entgegenstellte, und da Heisenberg als Ursache für das Scheitern der alten Quantentheorie die Vermengung sich widersprechender klassischer Begriffsbildungen und quantentheoretischer Postulate ansah, sicherstellen, dass die zu schaffende Theorie frei sei von widersprüchlichen Begriffen. Die virtuellen Oszillatoren sind kein Gegenstand der Erfahrung, denn sie waren ja rein hypothetisch eingeführt worden, um das klassisch unverständliche Verhalten des Atoms bei den Phänomenen der Dispersion und der Fluoreszenz quantentheoretisch verständlich zu machen. Aber, das muss betont werden, die Vorstellung der virtuellen Oszillatoren steht hinter den Zeilen der Umdeutungsarbeit von Juli 1925. Wie wäre es sonst zu erklären, dass Heisenberg, trotz Ablehnung jeglicher klassischer Begriffsbildung, das Korrespondenzprinzip an eminenter Stelle heranzieht, und zwar, wo es um die Aufdeckung einer Multiplikationsregel für die Übergangswahrscheinlichkeiten geht? Eine Korrespondenz hat nur dann Sinn, wenn eine quantentheoretische, beziehungsweise genauer, eine spektroskopisch beobachtete Gesetzmäßigkeit zwischen Spektrallinien mit einer anderen Situation verglichen werden soll oder kann. Da die Klassik als Vergleichstheorie ausscheidet, kommt nur noch die Gesamtheit der virtuellen Oszillatoren in Frage. Ganz in diesem Sinne interpretierte auch A. Landé in seinem 1926er Aufsatz „Neue Wege der Quantentheorie“ die Heisenbergsche Vorgehensweise:

„Es handelte sich praktisch darum, wenigstens eine mathematisch richtige Vorschrift (Gesetzmäßigkeit) zu finden, welche die verschiedenen *beobachteten* Eigenschaften eines Atoms, die Größe seiner Zustandsenergien, Strahlungsfrequenzen und -intensitäten miteinander verknüpft. Im Anschluß an ... Born sollte dabei kein Gebrauch gemacht werden von den mit der Beobachtung unvereinbaren raumzeitlich- kontinuierlichen Mechanismen, speziell von dem ... Momentbild der Lagen und Geschwindigkeiten der einzelnen Elektronen. (...) Die wesentliche Erkenntnis, daß die Quantenmechanik konsequent durch virtuelle klassische Bilder faßbar ist, welche den *Übergängen*, nicht den *Zuständen* zugeordnet sind und

welche somit eine exakte Formulierung des Korrespondenzprinzips geben, darf aber wohl schon als bleibende Frucht der neuen Theorie betrachtet werden.“¹⁶

Es muss zwar zugegeben werden, dass Heisenbergs virtuelle Oszillatoren, indem sie nicht klassischen Schwingungszuständen, sondern quantentheoretischen Termübergängen zugeordnet sind, durch die Maxwell- Lorentzsche Elektrodynamik nicht mehr einholbar sind, denn dort gibt es eine durch Quantenübergang verursachte Lichtausstrahlung nicht. Insofern kommt den virtuellen Oszillatoren die Aufgabe zu, über die klassische Elektrodynamik hinaus die quantenhafte Ausstrahlung von Licht durch ein möglichst nahe an klassischen Vorstellungen angelehntes Bild begreifbar zu machen. Wenn behauptet wird, die Heisenbergsche Theorie habe sich bereits in dem Moment von der Anschaulichkeit emanzipiert, als Heisenberg den quantenmechanischen Kern, die umgedeuteten Fourieramplituden, von den virtuellen Oszillatoren isolierte und sie als quantentheoretische Übergangsamplituden in ein Rechenschema einbaute, so ist dem zwar nicht zu widersprechen.¹⁷ Jedoch bleibt es bei dem Faktum der virtuellen Oszillatoren, die Heisenberg überhaupt erst den Weg wiesen zu einer rechenbaren Quantenmechanik, die als fertige Theorie so unanschaulich erscheinen kann, wie sie will.

3.4 Die Heisenbergsche Vertauschungsrelation

Born und Jordan erkannten noch im Sommer 1925, dass sich die Schemata der Übergangsamplituden zweckmäßig und elegant im Rahmen des Matrizenkalküls behandeln ließen.¹⁸ Die Gesamtheit der Übergangsamplituden, deren Betragsquadrate den Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Quantenzustand in einen anderen proportional sind¹⁹, ließ sich in ein unendliches quadratisches Schema stecken, das Born und Jordan als Analogon der kartesischen Ortskoordinate auffassten. Entsprechend wurde das quadratische Schema der Zeitableitungen

¹⁶[Landé 1926], S. 456 und 458.

¹⁷Siehe [Lacki 2002], S. 448: „The formal carrier of the ... observable quantities (amplitudes), namely the series, was itself classically related to an *anschaulich* entity, being for instance the expression of a dipole in space. Stripped off of this coefficients, it became irrelevant, and so its (spatio- temporal) reference, the amplitudes were left floating, so to speak in the air, without a formal organizational support. This was ended a radical step out of an *anschaulich* formalism.“

¹⁸Siehe [Born/Jordan 1925].

¹⁹Zur Erinnerung sei nochmals der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen Übergangswahrscheinlichkeit $A_{n-\tau}^n$ und Übergangsamplitude $a(n, n-\tau)$ genannt: $A_{n-\tau}^n = \frac{4e^2}{3c^3\hbar} \cdot |a(n, n-\tau)|^2 \cdot \omega^3(n, n-\tau)$.

der Übergangsamplituden mit der kartesischen Impulskoordinate analogisiert. Aus den Zahlenwerten von Ort und Impuls eines Teilchens in der klassischen Mechanik waren in der Quantenmechanik also unendlichdimensionale Matrizen geworden. Eine halbklassische Regel für die Übergangsamplituden, die kurz vor Heisenbergs Entdeckung der Matrizenmechanik durch quantentheoretische Umdeutung der klassisch- elektronentheoretischen Dispersionsformel gewonnene Summenregel von Thomas und Kuhn, fand an zentraler Stelle der Heisenbergschen Theorie ihren neuen Platz. Diese Summenregel ließ sich matrizenmäßig als Vertauschungsbeziehung für Orts- und Impulsmatrix reinterpretieren und übernahm die Rolle der „Quantenbedingung“ der älteren Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie.

Heisenberg erklärt in seiner fundamentalen Arbeit „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“ nicht, warum seine Quantenbedingung gleichbedeutend mit dem Thomas-Kuhnschen Summensatz ist. Es soll hier eine Überlegung eingeschoben werden, wie man vom Summensatz zur Heisenbergschen Vertauschungsbeziehung gelangen kann. Die Überlegung findet sich, freilich viel knapper skizziert, in der Einleitung von B. L. van der Waerdens Quellensammlung „Sources of quantum mechanics“ auf den Seiten 31 und 32. Ausgangspunkt sei die Originalform des Thomas-Kuhnschen Summensatzes, auch f -Summensatz genannt, nach [Thomas 1925]:

„Durch geeignete Umdeutung der Größen der klassischen Theorie in quantentheoretische und gewisser Differentialquotienten in Differenzenquotienten konnte Kramers durch Korrespondenzbetrachtungen eine Dispersionsformel ableiten, die für einen speziellen Fall bereits von Ladenburg aus Strahlungsbetrachtungen gewonnen war. Die erwähnte Methode liefert auch einen Zusammenhang zwischen den Übergangswahrscheinlichkeiten, die einem stationären Zustand zugeordnet sind, der unabhängig ist von Bahngrößen und keine speziellen Modellvorstellungen voraussetzt ...:

$$\sum f_a - \sum f_e = \text{Periodizitätsgrad}$$

f bedeutet das Produkt Übergangswahrscheinlichkeit \times Abklingungszeit eines klassischen Oscillators der betreffenden Frequenz; der Index a bezieht sich auf alle Absorptionslinien, der Index e auf alle Emissionslinien, die von der betrachteten Bahn ausgehen.“

Der Summensatz war prädestiniert, Eingang in die Heisenbergsche Quantenmechanik zu finden. Denn, wie sich Thomas ausdrückt, der f -Summensatz ist bereits so formuliert, dass in ihm keine Bahnvorstellungen mehr auftauchen. Das aber war genau Heisenbergs Intention: Eine Quantenmechanik zu schaffen, die keinen Gebrauch mehr macht von unbeobachtbaren Elektronenbahnen im Atom. Heisenberg schrieb am 24. Juni beziehungsweise am 9. Juli 1925 an Wolfgang Pauli:

„Grundsatz ist: Bei der Berechnung von irgendwelchen Größen, also Energie, Frequenz usw. dürfen nur Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen vorkommen“.

„Es ist wirklich meine Überzeugung, daß eine Interpretation der Rydbergschen Formel im Sinne von Kreis- und Ellipsenbahnen in klassischer Geometrie nicht den geringsten physikalischen Sinn hat, und meine ganzen kümmerlichen Bestrebungen gehen dahin, den Begriff der Bahnen, die man doch nicht beobachten kann, restlos umzubringen und geeignet zu ersetzen.“²⁰

Wie hängt nun der f -Summensatz mit der Vertauschungsbeziehung von Heisenberg, in welcher an Stelle der Oszillatorenstärken f die „Übergangsamplituden“ $a(n, n - \tau)$ für einen mit Strahlung verbundenen Übergang aus einem Quantenzustand n in den Quantenzustand $n - \tau$ stehen, zusammen?

Wie aus der zitierten Stelle aus Thomas' Artikel hervorgeht, sind die $f_{n, n-\tau}$ den von Einstein eingeführten Übergangswahrscheinlichkeiten $A_{n-\tau}^n$ proportional, mit dem Proportionalitätsfaktor²¹

$$\delta = \frac{3mc^3}{2e^2(\tau \cdot \omega)^2}, \quad (3.7)$$

der die Abklingungszeit eines gedämpften klassischen Oszillators, der mit der Frequenz $(\tau \cdot \omega)$ schwingt und dabei Strahlungsenergie verliert, beschreibt.

Eine Verbindung zu Heisenbergs Übergangsamplituden $a(n, n - \tau)$ gelingt, wenn man die Larmorsche Formel für die von einem klassischen Dipol der Ladung q pro Sekunde ausgestrahlte Energie berücksichtigt:²²

²⁰Beide Zitate sind aus [Pauli, Briefe].

²¹Vgl. [Ladenburg 1921], S. 451.

²²[Larmor 1900], S. 226.

$$S = -\frac{dE}{dt} = \frac{2q^2}{3c^3} \cdot \overline{(\ddot{x})^2} \quad (3.8)$$

Für ein mit dem Weg-Zeit-Gesetz $x = a_\tau \cdot e^{i\tau\omega t} + \bar{a}_\tau \cdot e^{-i\tau\omega t}$ oszillierendes Elektron lautet die Larmorsche Formel

$$S = -\frac{dE}{dt} = \frac{4e^2}{3c^3} \cdot (\tau \cdot \omega)^4 |a_\tau|^2 \quad (3.9)$$

In der Quantentheorie ist S zu ersetzen durch $A_{n-\tau}^n \cdot \hbar(\tau \cdot \omega)$, denn der Einsteinsche Koeffizient $A_{n-\tau}^n$ hat die Bedeutung: „Wahrscheinlichkeit der spontanen Strahlungsemission der Energie $\hbar(\tau \cdot \omega)$ pro Sekunde beim Quantenübergang $n \rightarrow n - \tau$ “. Das ergibt

$$A_{n-\tau}^n = \frac{4e^2}{3\hbar c^3} \cdot (\tau \cdot \omega)^3 |a_\tau|^2 \quad (3.10)$$

Nach Thomas und Ladenburg war

$$f_{n,n-\tau} = A_{n-\tau}^n \cdot \frac{3mc^3}{2e^2(\tau \cdot \omega)^2} \quad (3.11)$$

Einsetzen des Wertes für $A_{n-\tau}^n$ liefert

$$f_{n,n-\tau} = \frac{2m(\tau \cdot \omega) |a_\tau|^2}{\hbar} \quad (3.12)$$

In der Heisenbergschen Interpretation des Korrespondenzprinzips sind auf der rechten Seite dieser Formel die Ausdrücke $(\tau \cdot \omega)$ und a_τ zu ersetzen durch $\omega(n, n - \tau)$ und $a(n, n - \tau)$. Wir bekommen²³

$$f_{n,n-\tau} = \frac{2m \cdot \omega(n, n - \tau) \cdot |a(n, n - \tau)|^2}{\hbar}, \quad (3.13)$$

und einen analogen Ausdruck für die Absorptionsstärken:

²³Ein weiteres Ergebnis ist der in den Fußnoten schon zweimal erwähnte exakte Zusammenhang von Übergangswahrscheinlichkeiten und Heisenberg- Amplituden: $A_{n-\tau}^n = \frac{4e^2}{3c^3\hbar} \cdot |a(n, n - \tau)|^2 \cdot \omega^3(n, n - \tau)$.

$$f_{n,n+\tau} = \frac{2m \cdot \omega(n+\tau, n) \cdot |a(n+\tau, n)|^2}{\hbar} \quad (3.14)$$

Einsetzen dieser Ausdrücke für $f_{n,n-\tau}$ und $f_{n,n+\tau}$ in den Summensatz ergibt schließlich

$$\boxed{\sum_{\tau=0}^{\infty} |a(n+\tau, n)|^2 \cdot \omega(n+\tau, n) - \sum_{\tau=0}^{\infty} |a(n, n-\tau)|^2 \cdot \omega(n, n-\tau) = \frac{\hbar}{2m}} \quad (3.15)$$

Dies ist die von Heisenberg in der Umdeutungsarbeit auf S. 886, Formel (16), hingeschriebene Vertauschungsrelation, die also eine gewisse Beziehung zwischen den sämtlichen Übergangsamplituden eines Atoms ausspricht. Heisenberg ersetzt durch sie die Quantenbedingung

$$\oint p dq = \oint m \cdot \dot{x}^2 dt = J = n \cdot h$$

der Bohr-Sommerfeldschen Theorie, in der noch Bahnvorstellungen enthalten waren, um eine Quantenbedingung frei von jeglicher Bahnvorstellung zu haben.

Born hat der neuen Quantenbedingung eine etwas andere Gestalt gegeben, indem er in ihr die Produkte aus Orts- und Impulsmatrix einführte. Seien $X(n, k) = a(n, k) \cdot e^{i\omega(n,k) \cdot t}$ und $P(n, k) = i \cdot \omega(n, k) m \cdot a(n, k) \cdot e^{i\omega(n,k) \cdot t}$ die Matrizen für Ort und Impuls. Dann lässt sich, wenn man mit Born den Index k an Stelle von $n + \tau$ setzt und beachtet, dass bei der Summation von $-\infty$ bis $+\infty$ (an Stelle von 0 bis ∞) die Summen mit einem Faktor $\frac{1}{2}$ zu versehen sind, Heisenbergs Quantenbedingung auch so schreiben:

$$\boxed{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} P(n, k) X(k, n) - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(n, k) P(k, n) = \frac{\hbar}{i}} \quad (3.16)$$

Auf der linken Seite des Summensatzes stehen die Matrizenprodukte aus Orts- und Impulsmatrix. Heisenberg selbst war dieser Zusammenhang zwischen seinen Schemata und der Matrizenrechnung entgangen; erst Born, der während seines Studiums bei Rosanes in Breslau Vorlesungen über Matrizenrechnung gehört hatte, hatte diesen Zusammenhang im Herbst 1925 bemerkt. Der Summensatz ließ sich somit kompakter schreiben als Vertauschungsbeziehung zwischen der Ortsmatrix und der Impulsmatrix (E bedeute die unendlichdimensionale Einheitsmatrix):

$$P \circ X - X \circ P = \frac{\hbar}{i} E \quad (3.17)$$

In eigenartiger Weise wurden im weiteren Aufbau der Quantenmechanik die unendlichdimensionalen Matrizen X und P , deren Einträge ja im wesentlichen Übergangswahrscheinlichkeiten, also Intensitäten von Spektrallinien, sind, als Symbole für den Ort x beziehungsweise für den mechanischen Impuls p selbst, nicht nur eines Elektrons, sondern eines beliebigen Mikrogebildes, uminterpretiert. Dies musste zu dem Problem der Deutung dieser Vertauschungsbeziehung führen, denn die klassische Physik kennt keine solche Regel für die Messung von Ort und Impuls eines Körpers.

Dass die Quantenmechanik eine Krise der Anschauung evozierte, war dadurch befördert worden, dass Born den Thomas- Kuhnschen Summensatz in eine Beziehung zwischen Orts- und Impulsmatrix umfunktionierte. Plancks \hbar fand genau hier, im quantentheoretisch umgedeuteten Summensatz von Thomas und Kuhn, Eingang in die Matrizenmechanik. Das Hineinbringen von Plancks Konstante beruht, kurz gesagt, auf der Hypothese, dass das beobachtbare Strahlungsfeld einer Lichtquelle, aufgefasst als kontinuierlich schwingender Hertzscher Dipol, im zeitlichen Mittel sich gleichwertig von einer großen Zahl diskret emittierender Planckscher Oszillatoren herrührend vorstellen lässt: Das Plancksche \hbar übersetzt die Larmor-Hertzsche Theorie der Lichtemission in die quantentheoretische.

4 Die Deutung der Quantenmechanik

4.1 Die Wellenmechanik

Es bedarf eines Eingehens auf eine von Erwin Schrödinger herausgearbeitete Form der Quantenmechanik, da es eigentlich Schrödingers Theorie ist, an die die Interpretationen der Quantenmechanik geknüpft werden.¹ Neben Heisenbergs korrespondenzmäßiger Umdeutung der Strahlungsamplituden für den Fall stationärer Quantenzustände, die in der älteren Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie mit dem Modell periodischer Elektronenumläufe beschrieben worden waren, gelang Schrödinger im Winter 1925/26 ein ganz anderer Zugang zur Mechanik der Mikroprozesse, vor allem zu einer ungezwungenen Interpretation der Quantenbedingung $\oint p dq = n \cdot h$ der alten Theorie. Schrödinger erinnerte sich an den von William Rowan Hamilton Mitte des 19. Jahrhunderts aufgedeckten Zusammenhang zwischen Mechanik und Optik. Hamilton hatte herausgefunden, dass man die geometrische Optik, das heißt die Optik der Lichtstrahlen, auf der von Newton begründeten Emissionstheorie des Lichtes aufbauen und dass man umgekehrt die ganze Mechanik als eine Art Optik in einem geeigneten n -dimensionalen Raum behandeln kann.² Diese von Hamilton aufgedeckte optisch-mechanische Analogie geriet bald wieder in Vergessenheit. Erst Felix Klein erinnerte um die Jahrhundertwende wieder, zunächst erfolglos, an Hamiltons Entdeckung der Analogie von Mechanik und Optik. Über Kleins Schüler Arnold Sommerfeld sind die Hamiltonschen Gedankengänge zu Schrödinger gekommen, wie dieser selbst in einer Anmerkung zu Beginn seiner Zweiten Mitteilung zur „Quantisierung als Eigenwertproblem“ notiert.³ Somit erscheint der Schöpfer der

¹Aufgrund der Meinung der Mehrzahl der Physiker, diese beiden Theorien seien mathematisch äquivalent, die Wellenmechanik sei jedoch mathematisch leichter handhabbar.

²Einen ersten Überblick zu Hamiltons Arbeiten gibt [Klein 1927], Teil I, S. 194- 197.

³[Schrödinger 1926], S. 490.

Wellenmechanik zugleich als Vollender der Hamiltonschen Ansätze, die weiterzuverfolgen vor De Broglies Hypothese der Wellennatur der Materie (1924) keinem Physiker in den Sinn gekommen war.⁴

„Es schien so, als hätte die Natur ein und dieselbe Gesetzmäßigkeit zweimal auf ganz verschiedene Weise verwirklicht: das eine Mal beim Licht vermittels eines ziemlich durchsichtigen Wellenspiels, das andere Mal bei den Massenpunkten, wo man gar nicht durchsah, es sei denn, dass man auch ihnen irgendwie Wellennatur zuschreiben wollte. Und das schien fürs erste ausgeschlossen. Denn die ‚Massenpunkte‘, an denen die Gesetze der Mechanik wirklich experimentell bestätigt waren, waren zu der Zeit bloss die grossen, sichtbaren, zum Teil *sehr* grossen Körper, die Planeten, für die so etwas wie ‚Wellennatur‘ gar nicht in Frage zu kommen schien.“⁵

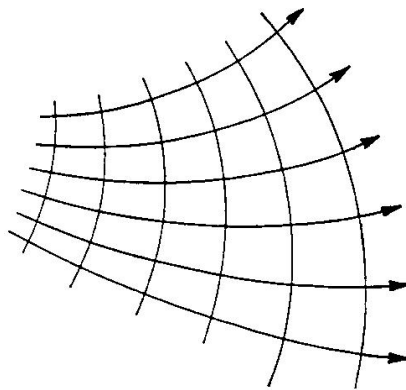


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen Lichtstrahlen und Wellenfronten im inhomogenen Medium ([Schrödinger 1933], S. 3)

Im Bild der Emissionstheorie stellt der Lichtstrahl die Bahn eines Teilchens dar, das gewissen Kräften unterliegt. Kraftwirkungen sind notwendig anzunehmen, da der Lichtstrahl keine gerade Linie sein wird, wenn das Medium, in dem er sich ausbreitet, nicht homogen oder isotrop ist. Da die Lichtfortpflanzung im homogenen, isotropen Medium geradlinig erfolgt, muss das Newtonsche Lichtteilchen entweder kräftefrei sein, oder die wirkenden Kräfte halten sich das Gleichgewicht. Das „Lichtpotential“ hat innerhalb eines solchen Mediums einen konstanten Wert, während es in inhomogenen beziehungsweise anisotropen Medien einen Gradienten hat,

⁴Deutsche Übersetzung der Dissertation L. De Broglies in [De Broglie 1927].

⁵[Schrödinger 1933], S. 4.

der die Kraftwirkung und damit eine Reflexion beziehungsweise die Lichtstrahlkrümmung verursacht.

Die klassische Mechanik versagt bei sehr kleinen Bahndimensionen und bei sehr starken Bahnkrümmungen. Dieser Umstand zeigt sich in der älteren, Bohr- Sommerfeldschen Fassung der Quantentheorie darin, dass man der Dynamik des atomar gebundenen Elektrons gewisse Quantenbedingungen aufzuerlegen hatte, die der klassischen Theorie fremd waren. Schrödinger schöpfte den Verdacht, dass dieses Versagen eine Entsprechung haben müsse in dem Scheitern der geometrischen Optik, sobald die beteiligten Öffnungen oder Hindernisse nicht mehr groß sind gegen die Wellenlänge des Lichtes. Denn dann treten die Welleneigenschaften des Lichtes in Erscheinung. Wie angedeutet, lässt sich die klassische Mechanik seit Hamilton als eine Art geometrischer Optik in dem n -dimensionalen sogenannten Konfigurationsraum des jeweils betrachteten mechanischen Problems behandeln. Die Zahl n gibt dabei an, wie viele Freiheitsgrade das System hat. Der Konfigurationsraum ist ein abstraktes Schema; er ist nur in sehr einfachen Fällen der geometrische Aufenthaltsraum des Körpers, da als Konfigurationskoordinaten q im allgemeinen nicht seine kartesischen Koordinaten, sondern weniger einfache Bestimmungsstücke wie Winkel, Flächen oder dergleichen heranzuziehen sind.⁶

Schrödinger vermutete, dass die klassische Mechanik das volle Analogon der geometrischen Optik sei und als solche versage, sobald die Dimensionen der Bahn „nicht mehr groß sind gegen eine gewisse Wellenlänge, der im q -Raum reale Bedeutung zukommt.“⁷ Daher war eine „Wellenmechanik“ zu suchen, entsprechend der Tatsache, dass auch die geometrische Optik bei Berücksichtigung der Wellenlänge λ des Lichtes durch die Wellenoptik ersetzt werden muss. Das Unterscheidungsmerkmal zwischen geometrischer und Wellenoptik ist das Fehlen einer Wechselwirkung der Lichtstrahlen bei ersterer. Dass Lichtstrahlen miteinander wechselwirken oder interferieren können, zeigt sich in solchen Situationen, wo die beteiligten materiellen Teile der Versuchsanordnung sehr klein sind, beispielsweise beim Schattenbild eines menschlichen Haares. Im Schattenraum beobachtet man nämlich ein Hell-Dunkel-Muster, das es nach der geometrischen Optik nicht geben dürfte, es sei denn, man nimmt an, dass Lichtstrahlen in den Schattenraum hineingebogen werden können, das Licht somit gebeugt wird.

⁶Dieser Umstand trägt wesentlich dazu bei, dass der Schrödingerschen Wellenfunktion ψ keine unmittelbar anschauliche Bedeutung zukommt. Ferner ist der Konfigurationsraum, als weitere Komponente seiner Abstraktheit, im allgemeinen Fall mit einer nichteuklidischen Maßbestimmung ausgestattet; die Metrik wird nämlich durch den Ausdruck $ds^2 = \frac{2}{m} T dt^2$ gegeben, worin T die kinetische Energie des Teilchens ist und als Funktion der sogenannten verallgemeinerten Geschwindigkeiten \dot{q} aufzufassen ist.

⁷[Schrödinger 1926], S. 497.

Man folgert daraus, dass die Schattenkegel der geometrischen Optik das Resultat einer Wechselwirkung von vielen Lichtstrahlen, oder besser vielen Lichtwellen sind. An Öffnungen hat man analoge Erscheinungen gefunden, die sich unter die Regel „Licht plus Licht ergibt - unter Umständen - Dunkelheit“ subsummieren lassen. Auch diese gehören zu den Beugungserscheinungen. Die Beugungseffekte lassen sich nur mit der Vorstellung einer Interferenz der Lichtstrahlen deuten. Analog sollte der Gewinn beim Übergang von der alten Mechanik zur Wellenmechanik der sein, dass man die Beugungserscheinungen der Materiewellen mit umfasst, „oder besser gesagt etwas, was den Beugungsphänomenen des Lichtes streng analog ist“⁸, so dass zum Beispiel „das Atom in Wirklichkeit gar nichts weiter sei als das Beugungsphänomen einer vom Atomkern eingefangenen Elektronenwelle.“⁹ Im Zuge der Interferenzfähigkeit der Wellenerscheinung „Licht“ verliert der Begriff der Bahn eines fiktiven Lichtteilchens seine Bedeutung, weil das Resultat der Interferenz an einer bestimmten Stelle des Raumes, nämlich Auslöschung oder Verstärkung von Helligkeit, durch Überlagerung *aller* dort eintreffenden Lichtwellen zustandekommt und man deshalb von einer einzelnen Lichtbahn nicht mehr sinnvoll sprechen kann. Anders ausgedrückt: das Bild des Lichtstrahls berücksichtigt nicht, dass sich im Wellenbild des Lichtes eigentlich Wellenfronten fortbewegen, wo es noch wesentlich auf den Gesamtzusammenhang aller Wellenfronten ankommt. Zwar kann aus den Wellenfronten die Gesamtheit der möglichen Lichtwege als Orthogonaltrajektorien rekonstruiert werden, doch sind diese Lichtwege weitaus vielfältiger als die allein gemäß geometrischer Optik nachvollziehbaren Lichtstrahlen. Daher spricht auch die Wellenmechanik, im Unterschied zur alten Mechanik, nicht mehr von der konkreten Teilchenbahn, sondern nur noch von der Vielheit aller möglichen Bahnen eines Elektrons oder anderer Mikropartikel.

Bis hierher ist nur die wellentheoretische Beschreibung mikroskopischer Bewegungsvorgänge plausibel gemacht worden. Es fehlt eine formelmäßige Beziehung der Wellentheorie zu den Begriffen der Partikelmechanik. Erst wenn eine Verbindung von Wellentheorie und Mechanik hergestellt ist, darf von einer Wellenmechanik geredet werden. Das Bindeglied zwischen Wellen- und Partikelvorstellung wird einerseits durch die Einsteinsche Lichtquantenformel $E = \hbar \omega$ für die Energie der Photonen, die einer mit der Frequenz ω schwingenden Lichtwelle zugeordnet sind, andererseits durch die De-Broglie-Beziehung $p = \frac{\hbar \omega}{c} = \hbar k$ zwischen Impuls

⁸[Schrödinger 1933], S. 578.

⁹Ebd., S. 580.

p und Wellenzahl $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ geliefert.¹⁰ Erst dadurch wurde es Schrödinger möglich, die auf Partikelvorstellungen beruhende Quantenbedingung $\oint p dq = n \cdot h$ der alten Quantentheorie als eine wellenmäßige Randbedingung zu gewinnen, welche die Wellenfunktion ψ zu erfüllen hat, damit sie dem Schwingungsvorgang eines atomaren Systems unter von der Physik des Systems geforderten Nebenbedingungen entsprechen kann. Denn gebundene, das heißt stationäre Atomzustände stellen im Wellenbild Resonanzphänomene dar, die immer nur bei Einhaltung gewisser Randbedingungen auftreten können.

Schrödingers Wellenmechanik eliminiert, ebenso wie Heisenbergs Matrizenmechanik, den Begriff der Elektronenbahn im Atom, und erst recht den des Elektronenortes auf einer inneratomaren Bahn. Während jedoch Heisenbergs Ansatz die direkt beobachtbaren „Lebensäußerungen“ des Atoms, wie beispielsweise die emittierten Spektrallinien, an eine gedachte Maschinerie, den virtuellen Oszillatoren, anband, setzt Schrödingers Vorgehen von vorn herein bei einem abstrakt- unanschaulichen Kalkül, der Hamiltonschen Form der theoretischen Mechanik, an, um die nicht direkt beobachtbaren Elemente der Bohr- Sommerfeldschen Atomvorstellung aus der Theorie zu entfernen. An die Stelle der tatsächlich durchlaufenen Bahn tritt in Schrödingers Theorie eine Gesamtheit von *möglichen* Bahnen, das sind die orthogonalen Trajektorien zu den Wellenflächen. Von hier ist es nur noch ein kurzer Schritt zu Borns statistischer Deutung der Wellenfunktion. Man kann eben nur Wahrscheinlichkeiten angeben, mit denen das Teilchen eine bestimmte der unendlich vielen, prinzipiell erlaubten Bahnen tatsächlich durchläuft. Die Rolle von Heisenbergs Lichtmaschine übernehmen im Schrödingerschen Bild diese mit Wahrscheinlichkeiten behafteten Trajektorien. Die in den Jahren nach 1925 versuchte Synthese von Heisenbergs und von Schrödingers Vorstellungen führte dann zu den Hauptschwierigkeiten einer vernünftigen Interpretation der Quantenmechanik, und die Schwierigkeiten wurden noch forciert durch die von Born 1926 gegebene statistische Interpretation der Wellenmechanik. Die Schrödingersche ψ - Funktion wird in jener statistischen Deutung nicht mehr als mathematisches Symbol für einen real stattfindenden Wellenausbreitungsvorgang verstanden, sondern erst das Betragsquadrat der (weiterhin „Wellenfunktion“ genannten) Größe ψ soll mit der empirisch kontrollierbaren Aufenthaltswahrscheinlichkeit des durch ψ repräsentierten Teilchens zusammenhängen: Die Wahrscheinlichkeit dafür, das Teilchen in einem Volumenelement dV des Konfigurationsraums vorzufinden, soll $|\psi|^2 dV$ betragen. In der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung spielt der Mittelwert oder Er-

¹⁰De Broglie hatte die Einsteinsche Lichtquantenhypothese, die Zuordnung von Lichtteilchen zu einem Wellenfeld, umgekehrt und materiellen Korpuskeln ein Wellenfeld zugeordnet, indem er die Beziehung $E = \hbar \omega$ zu einer allgemein gültigen erklärte.

wartungswert einer Messgröße eine große Rolle. Daher besitzen die quantenmechanischen Messgrößen wie Ort und Impuls eines Teilchens in Borns statistischer Deutung der Schrödingerschen Theorie einen Erwartungswert. Dasselbe gilt für die Streuung oder Standardabweichung. Eine mathematische Deduktion erlaubt es, aus der Vertauschungsrelation $px - xp = \frac{\hbar}{i}$ eine Beziehung der Standardabweichungen von Ort und Impuls, Δx und Δp , zu gewinnen, nämlich die Formel $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$. Diese aufgrund ihrer messtheoretischen Implikationen als Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls bezeichnete Formel besagt, dass eine gleichzeitige *genaue* (also streuungsfreie) Messung von Ort und Impuls eines Teilchens unmöglich ist, und sie gibt darüber hinaus die Mindestgröße des Produktes der Standardabweichungen an. Da sie eine mathematische Folge aus dem wellenmechanischen Formalismus und seiner statistischen Interpretation ist, steht und fällt die Wellenmechanik mit der Richtigkeit der Unbestimmtheitsbeziehung. Heisenberg schrieb 1927 zu Recht an Pauli, wenn es je ein Experiment gäbe, das Ort und Impuls gleichzeitig und genau zu bestimmen gestattete, so müsste die Quantenmechanik notwendigerweise falsch sein.¹¹ Dies ist also eine Möglichkeit, die Unbestimmtheitsrelation $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ zu rechtfertigen, nämlich als eine mathematische Folge der Synthese dreier Ingredienzien: der Wellentheorie, der Anbindung der wellentheoretischen Größen Frequenz und Wellenzahl an die korpuskularen Größen Energie und Impuls, sowie der statistischen Interpretation der daraus konstruierten Wellenmechanik. Da alle drei Komponenten wesentlich erfahrungsabhängige Eigenschaften von Quantenobjekten sind, bekommt die Unbestimmtheitsrelation in dieser Form der Herleitung einen wesentlich empirischen Status. Dem steht nun ein anderer, historisch zuerst gegebener Rechtfertigungsgrund für die Unbestimmtheitsrelation gegenüber. Es ist dies Heisenbergs 1927 vorgeschlagene Interpretation der Vertauschungsbeziehung $px - xp = \frac{\hbar}{i}$ als eine bei der Deutung von Beobachtungen heranzuziehende Vorstellung apriorischen Charakters.

4.2 Heisenbergs Deutung der Vertauschungsrelation

Aus dem Bild der virtuellen Oszillatoren heraus hatte Heisenberg im Frühsommer 1925 die grundlegenden Formeln der Matrizenmechanik destilliert. Die aus dem Summensatz von Thomas und Kuhn gewonnene Vertauschungsbeziehung für Ortsmatrix und Impulsmatrix war die wesentliche Frucht der Heisenbergschen Betrachtungen. Sie war dem Schematismus der klas-

¹¹[Pauli, Briefe], Brief Nr. 154, S. 378.

sischen Mechanik ganz fremd. Ein halbes Jahr später veröffentlichte Schrödinger in kurzer Folge seine vier Mitteilungen zur Wellenmechanik, die einen völlig anderen Zugang zu den Quantenphänomenen wählten als die Arbeit Heisenbergs, nämlich den Weg über eine optisch-mechanische Analogie in der Hamiltonschen Form der theoretischen Mechanik gingen, aber in seinen Endresultaten mit denen der Matrizenmechanik übereinstimmte, sofern es um stationäre Quantenzustände, wie dem Energiespektrum des Wasserstoffatoms, ging. Trotzdem sich die Leistungsfähigkeit der neuen Methoden rasch unter Beweis stellte, blieb es ein ungelöstes Problem, sowohl die Matrizenmechanik als auch die Wellenmechanik einer anschaulichen Deutung zuzuführen, denn beide Theorien hatten eine wesentlich unanschauliche Komponente: Bei der Matrizenmechanik war es die als Beziehung zwischen Ort und Impuls umgedeutete Vertauschungsbeziehung, bei der Wellenmechanik die Wellenfunktion ψ , die sich einer anschaulichen Interpretation entzog, nachdem Born 1926 gezeigt hatte, dass es allenfalls möglich war, das Betragsquadrat der Wellenfunktion als Aufenthaltswahrscheinlichkeit zu interpretieren, aber auch, weil der Schauplatz der Wellenfunktion nicht der Anschauungsraum, sondern der Konfigurationsraum des Systems war. Es war insbesondere die Erkenntnis, dass es die Quantenphysik unter bestimmten Beobachtungsbedingungen (welche ausnahmslos die aperiodisch- translatorischen Bewegungen von Atomen und Elementarteilchen betrafen) mit solchen Vorgängen zu tun hatte, die auch schon vor der Quantenmechanik in der Sprache der klassischen Mechanik und Elektrodynamik beschreibbar gewesen waren. Die Situation von Heisenberg im Herbst/Winter 1926/27 war diese: Er fand den matrizenmechanischen und den wellenmechanischen Formalismus vor. Er hielt dem abstrakten, mit den klassischen kinematischen Begriffen unvereinbaren Formalismus die Tatsache entgegen, dass physikalische Beobachtungen letzten Endes immer raumzeitliche Feststellungen betreffen müssten, wie Zeigerstellungen, Zusammenstöße und so weiter. Daher sah er sich gezwungen, eine Brücke zwischen dem Formalismus und der Erfassung des Experimentiervorgangs in klassischer oder Alltagssprache zu schlagen.

Heisenberg analogisierte seine Situation mit derjenigen Einsteins im Jahr 1905: Damals waren die Lorentz-Transformationen und insbesondere die Lorentzsche Ortszeit aus der Elektrodynamik für bewegte Medien her bekannt, aber man konnte sich keine rechte Vorstellung vom Wesen dieser Ortszeit machen. Einstein löste das Problem der Ortszeit, indem er die Fragestellung umkehrte: Nicht, wie man von den Erscheinungen zu dieser Ortszeit komme, sollte gefragt werden, sondern, ob die Gesetze der Elektrodynamik und Kinematik so uminterpretierbar seien, dass die Lorentzsche Ortszeit „reale“ Existenz bekäme. Man frage daher nicht,

wie man von der Beobachtung zu den Lorentzschen Formeln gelangt, sondern zeige, dass die Naturgesetze so beschaffen sind, dass sie unter allen Umständen den Formeln von Lorentz unterworfen sein müssen. Man zeige also, dass die Lorentzschen Formeln bei geeigneter Interpretation der Ortszeit ein konsistentes Gebäude beobachtbarer Beziehungen ergeben. Eine Relativitätstheorie sei möglich, weil die Naturgesetze die Freiheit ließen, die Gleichzeitigkeit mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit zu *definieren*. Wären instantane Signalübertragungen möglich, so hätte man diese Freiheit in der Definition der Gleichzeitigkeit nicht, und die Relativitätstheorie wäre unmöglich. Dasselbe Interpretationsschema versuchte Heisenberg nun, entgegen aller positivistischen Beteuerungen, die beim Aufstellen seiner Matrizenmechanik eine Rolle gespielt hatten, in der Interpretation der Vertauschungsrelation zur Anwendung zu bringen.¹² Heisenbergs Arbeit von 1927 formuliert das Ziel darzulegen, „*wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können.*“¹³

Aufgrund der Vertauschungsrelation $px - xp = \frac{\hbar}{i}$ schien es Heisenberg klar, dass die alten klassischen Begriffe von Ort und Geschwindigkeit nicht identisch wiederzugewinnen seien. Andererseits konnten sich Experimentatoren bei der Beschreibung der Durchführung ihrer Experimente nur in der gewohnten Alltagssprache mit ihren Begriffen von Raum und Zeit miteinander verständigen. Heisenberg sah keine andere Möglichkeit, um diesem Paradox zu entkommen, als die klassischen Begriffe in ihrer Anwendbarkeit auf atomare Vorgänge einzuschränken. Diese spezielle Erkenntnistheorie hat dann zu einem Verständnis der Unbestimmtheitsbeziehung geführt. Heisenberg schreibt darüber in einem Aufsatz über „Die Entwicklung der Quantentheorie 1918- 1928“:¹⁴

„Obwohl der Formalismus der Quantentheorie keine raumzeitliche kausale Verknüpfung von physikalischen Phänomenen zuläßt, sich vielmehr in hochdimensionalen mathematischen Räumen abspielt, verwandte man zur Beschreibung der

¹²Vgl. Heisenbergs Rückblick auf ein Gespräch mit Einstein in 1926 ([Heisenberg 1973], S. 91- 99). Heisenberg schildert darin seine antipositivistische Erleuchtung, die ihm durch Einsteins markante Bemerkungen „Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann“ und „Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann“, zuteil geworden war und ihm einen Weg zur Interpretation der Vertauschungsrelation bzw. der Unbestimmtheitsrelation bot.

¹³[Heisenberg 1927], S. 172 (Hervorhebung R.H.); siehe ferner Heisenbergs Aufsatz „Prinzipielle Fragen der modernen Physik“ von 1936. Dort sagt Heisenberg, so wie die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit Einstein die Möglichkeit gegeben habe, die Konstanz derselben zum Postulat zu erheben, wodurch eine Relativierung der Gleichzeitigkeit die Elektrodynamik bewegter Körper widerspruchsfrei machen konnte, so bekämen auch „die in den Unbestimmtheitsrelationen ausgesprochenen Beschränkungen der klassischen Begriffe ihre Fruchtbarkeit erst dadurch, daß diese Relationen, wenn man sie als prinzipiell erklärt, die für die widerspruchsfreie Ordnung der Erfahrung nötige Freiheit geben.“ ([Heisenberg 1936], S. 114)

¹⁴[Heisenberg 1929a], S. 494.

Fakten kritiklos die aus unserer anschaulichen Raum-Zeitvorstellung übernommenen Begriffe und verwickelte sich dabei naturgemäß in Widersprüche.

Andererseits schien es hoffnungslos, die Konstruktion einer Sprache, d.h. einer Begriffswelt zu versuchen, die diesen geschilderten mathematischen Zusammenhängen adäquat wäre; denn unser ganzes Denken ist untrennbar mit der anschaulichen Raum-Zeitvorstellung verknüpft; wir beschreiben das Ergebnis unserer Experimente stets in Worten, die dieser anschaulichen Raum-Zeitwelt entlehnt sind. Die einzig mögliche Lösung dieser Schwierigkeiten bestand also darin, zwar die bisherigen anschaulichen Begriffe beizubehalten, aber ihren Anwendbarkeitsbereich, soweit es notwendig war, einzuschränken.“

Die Beschreibung der Makrokörper in den Begriffen der klassischen Physik sei nicht zufällig oder willkürlich, sondern sogar notwendig, denn die Begriffe der klassischen Physik seien nichts anderes als die Verfeinerung unserer täglichen Erfahrung, und die tägliche Erfahrung ist die einzige Quelle unserer Begriffe und damit der Worte unserer Sprache. Heisenberg drückt dies so aus:

„Die Physik bildet einen Teil der Naturwissenschaft und muß in dieser Eigenschaft eine Beschreibung und ein Verständnis der Natur anstreben. Jede Art von Verständnis aber, sei es wissenschaftlich oder außerwissenschaftlich, hängt von unserer Sprache ab, hängt davon ab, daß wir Gedanken mitteilen können. Auch jede Beschreibung von Erscheinungen, von Versuchen und ihren Ergebnissen beruht auf der Sprache als dem einzigen Mittel zur Verständigung. Die Wörter dieser Sprache stellen die Begriffe des täglichen Lebens dar, die in der wissenschaftlichen Sprache der Physik verfeinert werden können. (...) Wenn man daher von dem Atomphysiker verlangt, daß er eine Beschreibung geben soll von dem, was wirklich in seinen Versuchen geschieht, so können sich die Worte ‚Beschreibung‘ und ‚wirklich‘ und ‚geschieht‘ nur auf die Begriffe des täglichen Lebens oder der klassischen Physik beziehen. Sobald der Physiker versuchen wollte, diese Grundlage aufzugeben, so würde er die Möglichkeit verlieren, sich ... zu verständigen, und er könnte seine Wissenschaft nicht fortsetzen.“¹⁵

Der Anwendungsbereich der klassischen Begriffe und Bilder wird bei dieser Strategie durch die Vertauschungsrelation $px - xp = \frac{\hbar}{i}$ eingeschränkt, denn in der klassischen Mechanik gibt

¹⁵[Büchel 1965], S. 366- 367.

es keine derartige Beziehung zwischen dem Aufenthaltsort x und dem Teilchenimpuls p . Die kinematischen Vorstellungen, die sich in der vorquantenmechanischen Physik finden, gehen von einer unbegrenzt genauen Bestimmbarkeit von Ort und Impuls eines Körpers aus. Die Mechanismen, Automaten, Modelle der klassischen Physik verlören ihren Sinn, wenn man von einem Zahnrad, einem Hebel oder von einer rollenden Kugel Ort und Geschwindigkeit oder Impuls prinzipiell nicht mehr genau wissen könnte. Die Ungenauigkeit müsste sich beispielsweise in einem nicht beseitigbaren Schlottern des Getriebes, oder in einer nur in eigener Nebulosität dahinrollenden Kugel bemerkbar machen. Die Einschränkungsgesetze, genauer gesagt die aus ihr fließende Unbestimmtheitsrelation $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ sorgt nach Heisenberg dafür, dass ein Widerspruch zwischen unraumzeitlich quantenmechanischer und anschaulich klassischer Beschreibungsweise nicht auftritt. Negativ gewendet bedeutet diese Einschränkung allerdings auch, dass es eine *durchgängige* anschauliche, genauer, eine raumzeitlich konsistente Visualisierung quantenphysikalischer Prozesse nicht geben soll.

Schließlich gab es einen dritten Vorschlag, die Unbestimmtheitsrelation zu rechtfertigen. Er geht auf Bohrs Como- Vortrag ¹⁶ zurück, soll aber in der von Reichenbach gegebenen prägnanteren Darstellungsweise wiedergegeben werden. Es handelt sich, grob gesagt, um die Behauptung, die Unbestimmtheitsrelation verhindere, dass Wellen- und Teilchenvorstellungen in ihrer Anwendung auf Quantenphänomene jemals zur gegenseitigen Auslöschung führten. Dieser dritte Begründungsversuch hat sich auch die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik zu Eigen gemacht.¹⁷

4.3 Der Bilder-Dualismus von Wellenbild und Teilchenbild

Der Sieg der Maxwellschen Elektrodynamik über die älteren Fernwirkungstheorien der Elektrizität lag darin begründet, dass es Maxwell gelungen war, ein verstehbares Bild von der nicht instantanen Übertragung der elektrischen und magnetischen Wirkungen durch das Zwischenmedium hindurch konstruiert zu haben. Insofern kann man sagen, dass es Maxwells Elektrody-

¹⁶[Bohr 1928].

¹⁷Siehe Paulis Darstellung in [Pauli 1958], die den Welle- Teilchen- Dualismus an den Anfang aller mathematischen Konklusionen stellt. Leider gehen nicht nur bei Pauli, sondern auch bei Heisenberg und anderen Autoren der Quantenmechanik die verschiedenen Begründungen für die Unbestimmtheitsrelation durcheinander. (Das hat das Herausschälen der drei wesentlichen Begründungsschienen sehr erschwert, R.H.)

namik vermochte, eine Erklärung der - übrigens nur an makroskopischen geladenen Körpern direkt wahrnehmbaren - elektrischen und magnetischen Kraftwirkungen unter Einbeziehung der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit jener Kräfte durchzuführen. Die Leistung seiner Theorie besteht darin, die stets makroskopischen Trägern anhaftenden elektromagnetischen Phänomene mit Hilfe des gedanklich konstruierten Zwischenphänomens „Äther“ in kausale Beziehung gebracht zu haben. In der Quantenphysik stellt sich eine analoge Frage nach dem erkenntnistheoretischen Status gedachter Zwischen- oder Interphänomene: In Hans Reichenbachs Buch „Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik“ wird gleich zu Beginn die Frage gestellt, ob es denn möglich sei, eine Kausalergänzung auch für die „Tatsachen“ der Quantenphysik durch geeignete Interpretation der unbeobachteten quantenphysikalischen Vorgänge ohne Widerspruch durchzuführen.¹⁸ Reichenbach führt eine verfeinerte Redeweise von den Tatsachen oder Phänomenen der Quantenphysik ein, um diese sich selten je handgreiflich machenden Vorgänge (dies ist etwa bei der Supraleitung der Fall) von den wirklich beobachtbaren, makroskopischen Erscheinungsformen jener Quantenphänomene unterscheiden zu können. Alphateilchen beispielsweise sind unsichtbar kleine Atomkernbausteine, aber indem sie sich in einer Nebelkammer ausbreiten und auf die Wassermoleküle in ihrer Umgebung ionisierend wirken, erzeugen sie sichtbare Kondenswasserspuren. Es liegen gute Gründe vor, hinter dem makroskopischen Vorgang der Kondensstreifenbildung einen realen Ausbreitungsvorgang des Quantenphänomens Alphateilchen zu erblicken. Es liegt sozusagen im Wesen der Quantenphysik als einer Wissenschaft vom Kleinen und Kleinsten, dass sie von zwar nicht unmittelbar erfahrbaren, aber doch als real anzunehmenden Prozessen handelt, die ihr das Recht geben, manche nicht wahrnehmbare Prozesse schadlos als Phänomene bezeichnen zu dürfen. Reichenbach differenziert dann noch einmal zwischen einem Bereich der Phänomene und einem der Interphänomene. Die Phänomene, etwa Zusammenstöße zwischen Elektronen, seien, mit makroskopischen Geschehnissen durch kurze Kausalketten verknüpft, zum Beispiel via Geiger-Zähler, Wilson-Kammer oder Fotoplatte. Wenn die quantenphysikalischen Phänomene auch nicht direkt beobachtbar seien, so dürften sie dennoch insofern als *verifizierbar* angesehen werden, als sie durch vergleichsweise kurze Schlussketten mit direkt beobachtbaren Makrophänomenen verknüpft sind. Im streng erkenntnistheoretischen Sinne freilich sei keines der quantenphysikalischen Geschehnisse beobachtbar; diese seien „alle aus makroskopischen Daten erschlossen, welche die einzige Basis darstellen, die der Beobachtung durch die menschlichen Sinnesorgane zugänglich ist“.¹⁹ Die Kondenswasserspuren, die

¹⁸[Reichenbach 1949], S. 15.

¹⁹[Reichenbach 1949], S. 32.

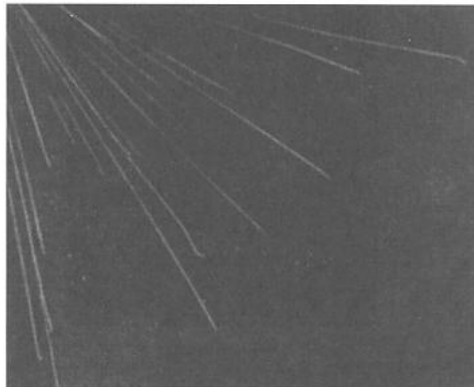


Fig. 1

Abbildung 4.2: Nebelkammeraufnahme ([Heisenberg 1929b], Tafel I, Fig. 1)

von radioaktiven Partikeln in einer Nebelkammer hinterlassen werden und das Aufleuchten des fluoreszierenden Hintergrundes bei Kathodenstrahlversuchen, ferner das Knacken eines Zählrohres und der Lichtblitz beim Aufprall eines Photons auf einer Silberjodidschicht „beweisen“ die Anwesenheit der Mikroteilchen. Dagegen seien Interphänomene Geschehnisse, die sich *zwischen* den Phänomenen ereigneten, wie die Bewegung eines Elektrons von seinem Emissionsort bis zum Ort des Zusammenpralls mit anderer Materie, oder die Fortpflanzung eines Lichtstrahls im leeren Raum. Ihre Einführung erfolge durch kompliziertere Schlussketten, sie seien in Form einer Interpolation innerhalb der Welt der Phänomene konstruiert. Die Einführung der Interphänomene sei nur möglich im Rahmen der quantenmechanischen Gesetze, da jene Gesetze die Konstruktionsweise der „langen“ Schlussketten regelten.

Reichenbach versteht sodann unter einer „normalen“ Beschreibung eines physikalischen Vorganges eine solche, in der die Naturgesetze gelten, gleichgültig ob die Objekte, die sie beschreiben, beobachtet werden können oder nicht. Das Problem der normalen Beschreibung stelle sich schon in der klassischen Physik, zum Beispiel bei der Frage, ob man, ohne je in Widersprüche zu verfallen, behaupten dürfe, dass ein Baum da ist, während man nicht hinsieht. Es stelle sich aber empirisch heraus, dass eine normale Beschreibung hier niemals zu Problemen führt. Wir würden annehmen, dass die Gesetze der Optik für die Betrachtung des Baumes auch dann gelten, wenn wir ihn nicht direkt beobachten. Auch wenn wir den Baum nicht beobachten, schlössen wir aufgrund unserer Annahme, dass die Gesetze der Schattenerzeugung immer noch gelten, dann auf seine Existenz, sobald wir seinen Schatten sehen könnten. Es

ist für Reichenbach eine Sache der Erfahrung, dass wir im Alltag mit einer solchen Annahme durchkommen. In der Quantenmechanik stelle sowohl die Wellenbeschreibung als auch die Korpuskelbeschreibung eine „interphänomenale“ Beschreibungsmöglichkeit der „invarianten“ Phänomene dar; beide Beschreibungen seien der Versuch, eine „Kausalergänzung für die beobachteten Tatsachen durch die Interpretation unbeobachteter Werte ohne Widerspruch durchzuführen“.²⁰ Reichenbachs These ist schließlich die, dass die Quantenphänomene eine *einheitliche* Kausalergänzung durch Interpolation mit Interphänomenen *nicht* zuließen²¹, oder mit anderen Worten, dass es in der Quantenphysik unmöglich sei, „eine Definition der Interphänomene derart zu geben, daß die Forderungen der Kausalität erfüllt werden“.²² Als Empirist vertritt Reichenbach den Standpunkt, dass die Frage, ob es eine normale Beschreibung der Quantenphänomene gibt, nur durch die Erfahrung beantwortet werden kann. Er fährt daher mit einer Analyse der Interferenz am Einzel- und am Doppelspalt fort, mit dem Ziel, die hier aufgeworfene Frage zu verneinen.

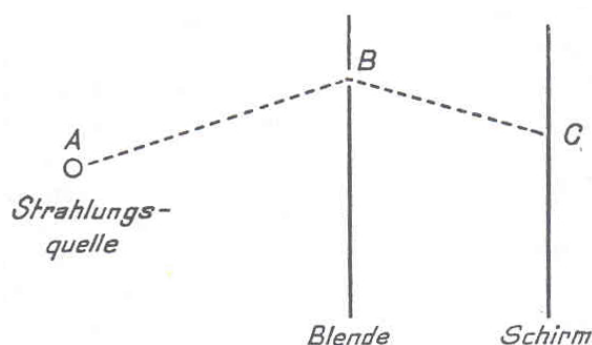


Fig. 4
Beugung der Strahlung durch einen Schlitz B.

Abbildung 4.3: Interferenz am Einzelspalt ([Reichenbach 1949], S. 37)

Reichenbach betrachtet die Situation, in der von einer Strahlungsquelle Lichtstrahlen, Elektronen oder andere Massenteilchen durch eine Blende hindurchgehen und auf einen Schirm fallen, so dass ein Interferenzmuster auf dem Schirm entsteht, dessen Gestalt von den geometrischen Bedingungen des Experiments, insbesondere der Zahl der Blendenöffnungen, abhängt. Bei sehr niedriger Strahlungsintensität wird das Interferenzmuster nicht auf einmal erhalten, sondern nur einzelne Lichtblitze an lokalisierten Stellen (etwa in dem Punkt C der Abb. 4.3

²⁰[Reichenbach 1949], S. 15.

²¹[Reichenbach 1949], S. 15.

²²[Reichenbach 1949], S. 45.

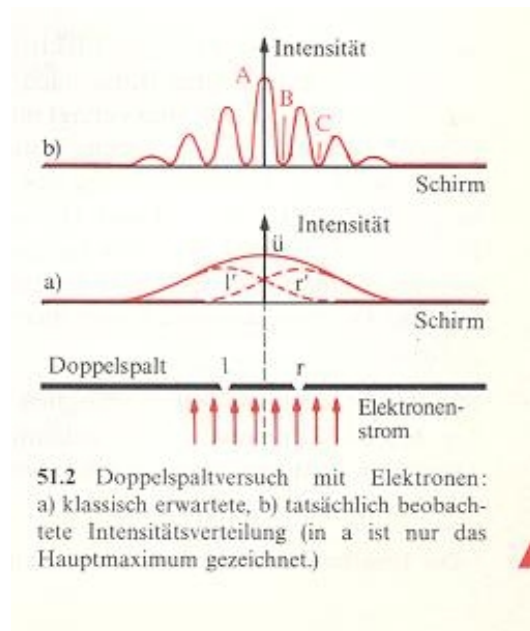


Abbildung 4.4: Interferenzmuster beim Doppelspaltexperiment ([Dorn-Bader 1977], S. 51)

und 4.5). Wenn man die Emission einzelner Teilchen lange genug fortsetzt, dann folgt die Verteilung der nacheinander auftreffenden Lichtblitze dem genannten Interferenzmuster.

Die Interferenzerscheinungen bilden in der Welleninterpretation sowohl am Einzel- wie auch am Doppelspalt, sobald wir die Intensität des Teilchenstroms so weit herunterregeln, dass auf dem Schirm hinter der Blende einzelne Lichtblitze oder Schwärzungen sichtbar werden, ein erstes Beispiel für eine kausale Anomalie: Man hat das Problem, eine instantane Umwandlung eines räumlich ausgedehnten Wellenfeldes in einen lokalisierten Lichtblitz oder Schwärzungspunkt erklären zu müssen.²³ Man ist also, um einer Anomalie zu entgehen, gezwungen, sich in diesen Experimenten auf die Korpuskularinterpretation zu beschränken und die Welleninterpretation zu unterdrücken.

Andererseits kann auch die Korpuskularinterpretation zu Anomalien führen, besonders drastisch im Doppelspaltexperiment, wenn die Blende nicht eine, sondern zwei Öffnungen besitzt, durch die das Teilchen hindurchgehen kann.

²³Außerdem ist das Verschwinden der Welle nach dem Erscheinen des Lichtblitzes ein Vorgang, welcher der Schrödingergleichung *nicht* folgt.

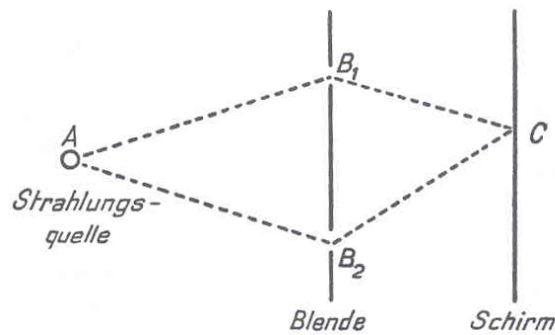


Fig. 5
Beugung der Strahlung durch zwei Schlitze, B_1 und B_2 .

Abbildung 4.5: Interferenz am Doppelspalt ([Reichenbach 1949], S. 39)

Das Doppelspaltexperiment hat in der Korpuskularinterpretation die kausale Anomalie, dass das Interferenzmuster nicht identisch ist mit der Überlagerung der Einzelmuster, wenn je einer der beiden Spalte B_1 , B_2 in Abbildung 4.5 geschlossen wäre; vielmehr ergibt sich die obere Interferenzfigur in Abbildung 4.4. Man müsste daher annehmen, dass die Wahrscheinlichkeit, ob ein Teilchen, das durch B_1 hindurchgeht, eine bestimmte Stelle auf dem Schirm trifft, davon abhängt, ob der Spalt B_2 offen ist oder nicht. Die Anomalie besteht hier darin, „daß es eine ‚Fernwirkung‘ gibt, die in B_2 ihren Ausgangspunkt nimmt und sich nach B_1 ausbreitet, so daß sie die Stöße, die den hindurchgehenden Teilchen in B_1 gegeben werden, beeinflusst“.²⁴ Das in der Physik allgemein anerkannte Prinzip der Nahwirkung ist daher in der Korpuskularinterpretation verletzt, denn es gibt nach dem experimentellen Befund keine *Ausbreitung* der Wirkung von B_2 nach B_1 . Das kann man daran erkennen, dass Veränderungen im Material der Blende oder Veränderungen ihrer Form, etwa durch Verbiegen des Metalls zwischen den Spalten, keinen Einfluss auf das Interferenzmuster haben. Diese Schwierigkeit ließe sich jedoch umgehen, wenn die Korpuskularinterpretation in diesem Falle verboten würde.

Das Mittel, welches die quantenmechanischen Anomalien eliminierbar macht, sei das Unbestimmtheitsprinzip, das heißt die Unbestimmtheitsrelation. Dieses Prinzip mache es unmöglich, jemals ein *experimentum crucis* anzustellen, welches zwischen Welleninterpretation und Korpuskelinterpretation zu entscheiden vermöchte. Das Doppelspaltexperiment erlaubt es zwar, eine Frequenz und damit den Impuls eines Teilchens zu messen; auf diese Weise sind gemäß des Unbestimmtheitsprinzips zugleich alle Aussagen über den Ort des Teilchens ausgeschaltet: Man darf nicht mehr fragen, durch welchen der beiden Spalte, also an welcher Stelle,

²⁴[Reichenbach 1949], S. 40.

das Teilchen hindurchgegangen ist. Die kausale Anomalie ist aus dem Gebiet zulässiger Aussagen verschwunden.²⁵ Beim Einzelspalt zeigen die Lichtblitze oder Schwärzungspunkte den genauen Einschlagsort des Elektrons oder Photons an; wieder verbietet das Heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip eine falsche Fragestellung, diesmal die Frage nach einer in verschiedenen Punkten des Schirms gleichzeitig ankommenden Welle, womit diesmal die Ermittlung einer Wellenlänge und demzufolge eines Impulses illusorisch wird. Reichenbach bezeichnet diese Beschränkung der zulässigen Aussagen als „Einschränkungsregel“ und schreibt über sie:

„Alle ungesunden Teile der quantenmechanischen Sprache werden durch die Einschränkungregel wie durch einen chirurgischen Eingriff entfernt. Unglücklicherweise werden dabei, wie bei allen solchen Operationen, auch einige gesunde Teile mit herausgeschnitten. So ist es z. B. schwer, eine Aussage wie die über das Hindurchgehen des Teilchens durch den einen oder anderen Schlitz aufzugeben. Alles, was gegen diese Aussage geltend gemacht werden kann, ist, daß sie zu unerwünschten Folgen führt.“²⁶

Die unerwünschten Folgen betreffen die Theorie, genauer die Wellenmechanik in statistischer Interpretation, während das, was schwer ist, als Frage zu unterdrücken (wie die nach dem Durchgangsort des Teilchens), eine Frage der Anschauung zu sein scheint. Die Einschränkungregel Heisenbergs betrifft damit nicht nur die mathematischen Symbole für Ort und Impuls, sondern auch elementare Bedürfnisse des Anschauungsvermögens, die sich eben auch auf die Interphänomene erstrecken. Da Reichenbach sich diesem Problem nicht weiter widmet, scheint es für ihn ein zwar gefühltes, aber kein die Quantenmechanik als Theorie bedrohendes Dilemma darzustellen. Es ist aber ein zentrales Anliegen des vorliegenden Versuchs, neben der Analyse von Modellvorstellungen bei der Auffindung der Heisenbergschen Quantenmechanik gerade diesen Konflikt zwischen Theorie und Anschauung ernst zu nehmen, um zu einer Rehabilitierung des Visuellen beizutragen. In der Reichenbachschen Terminologie wären ja auch die elektrischen Felder und der Lichtäther nur als Interpolationen innerhalb der Bewegungsvorgänge von Ladungen und Strömen konstruiert. Während lediglich die von Ladungen und Strömen ausgehenden Kraftwirkungen zu den Phänomenen zählen, dienen Faradays Feldlinienbilder oder Maxwells Bild einer inkompressiblen elektrischen Flüssigkeit dazu, die Geschehnisse, die sich bei den Ladungen und Strömen abspielen, von ihrem Aus-

²⁵[Reichenbach 1949], S. 53.

²⁶[Reichenbach 1949], S. 54.

gangspunkt innerhalb von Phänomenen bis zu ihrem Wirkungspunkt innerhalb von Phänomenen nahwirkungsmäßig, und das heißt vor allem, mit Zeitverzögerung geschehend, verständlich zu machen. Es fragt sich, wieso die Quantenmechanik sich zu einer Einschränkung des Gebrauchs geometrischer und kinematischer Termini veranlasst sieht, während dies für die Elektronentheorie von H. A. Lorentz, die den Atomismus mit Maxwells Kontinuumsvorstellungen und somit zwei gegensätzliche Konzepte miteinander verschmolz, nicht gilt. Für den logischen Positivisten Reichenbach brauchte dies kein Problem zu sein. Da der vorliegende Versuch jedoch einen antipositivistischen Standpunkt einnimmt, muss er sich dieser Frage stellen. Der scheinbare Widerspruch deutet darauf hin, dass die Setzungen und Denkmuster, die in Lorentz' Elektrodynamik noch funktionieren, für die Quantenmechanik kritisch hinterfragt werden müssen, allerdings auf eine andere Weise, wie es die Kopenhagener Interpreten und Reichenbach tun, wie sich herausstellen wird.

Reichenbach zufolge gibt es keine normale Beschreibung für *alle* quantenmechanischen Interphänomene. Für *ein* gegebenes Experiment wird aber wenigstens *eine* der beiden Beschreibungsweisen, Wellen- oder Korpuskelbeschreibung, normal sein.²⁷ Die Welt der Phänomene lässt sich aber nicht durch eine einheitliche Interpolation ergänzen, und „das heißt, daß die Forderung unveränderter Naturgesetze in der Welt atomarer Dimensionen nicht für die Gesamtheit der Interphänomene durchgeführt werden kann.“²⁸ Das ist ein Beispiel für die Behauptung der Nicht-Objektivierbarkeit der quantenmechanischen Naturbeschreibung, welche das Fundament der sogenannten Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik bildet. Es gibt die Kopenhagener Interpretation in einem physikalischen und in einem philosophischen Sinn. Im physikalischen Sinn bezeichnet die Kopenhagener Interpretation einfach die Beschreibung der Atome, Moleküle und Elementarteilchen durch eine Wellenfunktion. Im philosophischen Sinn bedeutet die Kopenhagener Interpretation eine bestimmte Erkenntnistheorie, die Bohr, Heisenberg, Pauli, von Weizsäcker und andere entwickelt haben: „Die Quantenmechanik in ihrer von Bohr, Heisenberg und Pauli ausgearbeiteten Kopenhagener Deutung bricht mit gewissen Grundsätzen der klassischen Physik. In der klassischen, vorquantentheoretischen Physik wird ein physikalisches System 1) *beobachtungsfrei* und 2) *wahrscheinlichkeitsfrei* beschrieben. (...) Systembeschreibungen der klassischen Physik sind mithin als beobachtungsfrei zugleich *objektiviert* und als wahrscheinlichkeitsfrei zugleich *determiniert*. (...) Gegenüber der klassischen Situation ist nun für die Quantentheorie die Kopenhagener Botschaft gerade die, daß

²⁷[Reichenbach 1949], S. 46.

²⁸[Reichenbach 1949], S. 52.

hier eine dem Formalismus angemessene Interpretation auf die experimentelle Anordnung Bezug zu nehmen hat und daß zur Zustandsbeschreibung Wahrscheinlichkeiten benötigt werden.“²⁹

Eng verwandt mit den kausalen Anomalien Reichenbachs ist das von Weizsäcker-Heisenberg-Gedankenexperiment zur Ortsbestimmung eines Elektrons. Die Analyse dieses Experimentes ist ein noch drastischeres Beispiel für die Nichtobjektivierbarkeit der quantenmechanischen Naturbeschreibung, indem sogar die Wahl der Wellenfunktion selbst nicht mehr beobachtungsfrei getroffen werden kann. Das Resultat dieses Experiments ist nämlich, dass *dasselbe* Elektron durch *verschiedene* Wellenfunktionen beschrieben werden muss, je nachdem, unter welchen Bedingungen die Beobachtung erfolgt. Man muss daraus wohl die Folgerung ziehen, dass nicht nur Wellenbild und Teilchenbild unvereinbar sein können, sondern auch verschiedene Vorstellungen innerhalb des Wellenbildes selbst.

Die im folgenden gegebene Beschreibung des Gedankenexperiments von Weizsäcker und Heisenberg lehnt sich an die Darstellung in [Büchel 1965] an; die betreffende Originalabhandlung ist [von Weizsäcker 1931]. Es handelt sich hier um eine solche Messanordnung, die eine anschauliche Deutung des Schrödingerschen Konfigurationsraums als Anschauungsraums und eine ebenso anschauliche Interpretation der Wahrscheinlichkeitswellen, als wären es gewöhnliche Lichtwellen, zuzulassen scheint.

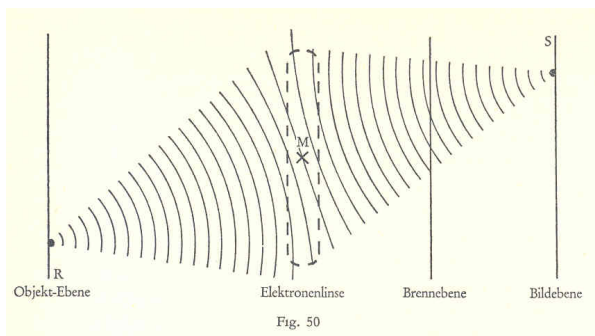


Abbildung 4.6: Ortsbestimmung nach von Weizsäcker ([Büchel 1965], S. 408)

(1) An dem Elektron soll eine Ortsbestimmung durch Beleuchtung des Elektrons vorgenommen werden. Dazu werde eine auf diskrete Photonenemission heruntergeregelter Lichtquelle auf die Objektebene eines Mikroskops gerichtet und abgewartet, bis ein innerhalb der Objektebene fliegendes Elektron in den Lichtstrahl hineingerät. Das beim Zusammenprall von

²⁹[Scheibe 1990], S. 163- 164.

Elektron und Lichtquant abgebeugte Licht gehe durch ein Mikroskop und werde dann auf einer photographischen Platte aufgefangen. Um ein scharfes Bild des Elektrons zu erhalten, wird die Photoplatte in die der Objektebene entsprechenden Bildebene des Mikroskops gestellt. Nach den Gesetzen der Optik werden alle von einem Punkt der Objektebene ausgehenden Wellenzüge von der Elektronenlinse in einem Punkt in der Bildebene vereinigt. In diesem Fall ist die Wellenfunktion des Lichtquants nach dem Zusammenprall durch eine Kugelwelle darzustellen, die sich vom Ort des Zusammenstoßes nach allen Seiten ausbreitet, in die Linsen eindringt, um dort in eine andere Kugelwelle transformiert zu werden, deren Zentrum der entsprechende Auftreffpunkt auf der Photoplatte ist, wo das Lichtquant eine punktuelle Schwärzung hervorruft. Gemäß der Abbeschen Theorie des Mikroskops ist der *ganze* Öffnungswinkel des Mikroskops an dem Prozess der Umwandlung von der einen Kugelwelle in die andere beteiligt. Die genaue Lage des Elektrons, das heißt der Ort des Zusammenstoßes von Elektron und Lichtquant in der Objektebene, kann mit den Gesetzen der Optik berechnet werden, wenn der Schwärzungspunkt auf der in der Bildebene des Mikroskops platzierten Photoplatte bekannt ist. Es gibt dabei aber keine Möglichkeit, die Richtung des Elektronenimpulses in Erfahrung zu bringen, denn das Elektron kann ja, da sich seine Wellenfunktion nach dem Zusammenstoß kugelförmig ausbreitet, vom Ort des Zusammenstoßes an eine beliebige Richtung eingeschlagen haben. Dies wird durch die Tatsache erhärtet, dass gemäß der Wellentheorie des Lichtes³⁰ eigentlich eine Linse mit unendlich großem Öffnungswinkel vorhanden sein müsste, um in der Bildebene ein punktförmiges Bild erzeugen zu können. Ein genau lokalisierter Schwärzungspunkt auf der photographischen Platte schießt somit die präzise Kenntnis des Elektronenimpulses aus.

(2) Zu einer anderen Beschreibung des Zusammenstoßes gelangt man, wenn man die Photoplatte nicht in der Bildebene, sondern in der Brennebene des Mikroskops anbringt. Ein Schwärzungspunkt auf der Platte ist nun, wieder nach den Gesetzen der Optik, charakteristisch für eine bestimmte Richtung, in der das Licht ins Mikroskop eingedrungen ist. Denn eine Linse transformiert eine ebene Welle in eine Kugelwelle, deren Zentrum in der Brennebene liegt. Die Wellenfunktion des Lichtquants ist nach dem Zusammenstoß eine ebene Welle. Die Richtung, in der das Lichtquant ins Mikroskop eingetreten ist, liegt also fest, damit aber auch die Richtung des Impulses nach dem Zusammenstoß und, wegen des Impulserhaltungssatzes, ist dann auch der Impuls des Elektrons vor dem Zusammenprall rechnerisch bestimmbar. Völlig unbestimmt bleibt aber der Ort des Zusammenstoßes von Elektron und Lichtquant.

³⁰Genauer gilt: Die Abbesche Theorie des Mikroskops fordert dies.

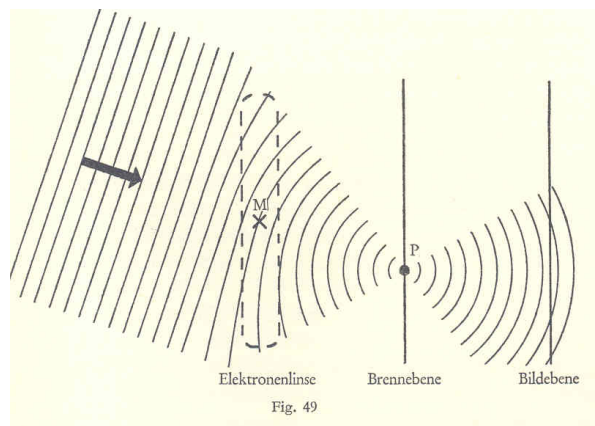


Abbildung 4.7: Impulsbestimmung nach von Weizsäcker ([Büchel 1965], S. 406)

Die Beobachterabhängigkeit der in Betracht zu ziehenden Wellenfunktionen folgt daraus, dass nicht nur zu dem Lichtquant, sondern auch zu dem Elektron nach dem Zusammenprall in beiden Fällen eine Wellenfunktion gehört. Im ersten Beispiel muss dem Elektron nach dem Gesagten eine Wellenfunktion mit scharfem Ort und unscharfem Impuls zugeordnet werden, während es sich im zweiten Beispiel gerade umgekehrt verhält. Obwohl also mit dem Elektron in diesem Fall nichts anderes passiert ist als im ersten, muss man seinen Zustand nach dem Zusammenstoß durch eine andere Wellenfunktion beschreiben. Grete Hermann zog daraus den Schluss, „daß man ... je nach dem vorliegenden Beobachtungszusammenhang für dasselbe System und für den gleichen Zeitpunkt - nämlich für das Elektron zur Zeit unmittelbar nach dem Zusammenstoß mit dem Lichtquant - verschiedene Wellenfunktionen erhalten kann“, so dass „die quantenmechanische Charakterisierung dem physikalischen System nicht wie die klassische gewissermaßen noch ‚an sich‘ zu(kommt), und das heißt hier: unabhängig davon, durch welche Beobachtungen man sich Kenntnis von ihm verschafft.“³¹

Sowohl Reichenbach als auch von Weizsäcker verfolgen eine Argumentationsstrategie, welche die quantenmechanische Unbestimmtheit als ein Mittel erweisen soll, widersprechende oder zumindest schwer vereinbare Vorstellungen (Wellenbild - Teilchenbild, ebene Welle - Kugelwelle) nicht in Konflikt kommen zu lassen. Bei dem von Weizsäcker- Heisenberg- Gedankenexperiment wird außerdem noch das Bedürfnis nach einer Darstellung der Unbestimmtheit als einer organischen Weiterführung klassisch-optischer Gesetze fühlbar. Dies Experiment soll die Problematik der Nichtobjektivierbarkeit sogar auf die Wellenfunktion ausweiten, um deut-

³¹[Hermann 1935], S. 720.

lich zu machen, dass es weniger der quantenmechanische Formalismus selbst ist, der problematisch ist, sondern vielmehr die dem Formalismus voraufgehenden, aber wohl unhintergehbaren Setzungen und Gedankenbilder.

5 Kultur und Quantenphysik

5.1 Das Prinzip der Beobachtbarkeit bei Heisenberg

Heisenberg ging bei der Aufstellung der Quantenmechanik von der erkenntnistheoretischen Forderung aus, dass in die Grundlagen einer Theorie nur prinzipiell beobachtbare Größen eingehen sollten. Da nun aber alles Inneratomare prinzipiell unbeobachtbar bleiben muss, weil jedes Messgerät ebenfalls aus Atomen aufgebaut ist, muss eine Hypothese gemacht werden, um einen Zusammenhang von Atommechanismus (Erzeugung von Licht) und Eigenschaften der beobachtbaren Lebensäußerungen des Atoms (Spektrallinien) konstruieren zu können. Heisenbergs Ansatz bedient sich des Bildes der virtuellen Oszillatoren, denn es soll, so Heisenberg, etwas im Atom geben, was mit der richtigen Frequenz schwingt. Zu einer bestimmten Atomsorte sollen gerade so viele virtuelle Oszillatoren gehören, wie erforderlich sind, um die Gesamtheit aller von dem chemischen Stoff emittierbaren Spektralfrequenzen erklären zu können.

Heisenbergs heuristisches Prinzip war also: Eine physikalische Theorie soll nur Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen darstellen. Daher soll eine physikalische Theorie nach Möglichkeit nur solche Begriffe einführen, die eine unmittelbare Deutung im Experiment zulassen. Spektralfrequenzen gehören zu den direkt beobachtbaren Größen, denn ohne diesen Begriff ließen sich die Messungen mit einem Spektralapparat überhaupt nicht beschreiben. Dagegen sind inneratomare Umlauffrequenzen von Elektronen hypothetisch und nur zu dem Zweck eingeführt worden, um das Verhalten der Atome in Anlehnung an die klassische Mechanik und Elektrodynamik vorherzusagen. (Nach Hertz und Lorentz sendet ein mit der Frequenz ω auf einer Kreisbahn umlaufendes Elektron eine Lichtwelle derselben Frequenz aus.) Aber der Ort und die inneratomare Bewegung eines Elektrons sind nicht beobachtbar. Heisenberg bringt hier ein vergleichbares Prinzip in Anschlag, welches Leibniz bereits gegen Newtons Begriff einer absoluten Bewegung anführte. Es ist das Prinzip der Beobachtbarkeit (*principe*

de l' observabilité), das Leibniz im fünften Schreiben an Clarke erklärt: Bewegung gibt es nur dort, wo eine der Beobachtung zugängliche Veränderung stattfindet; ist diese Veränderung durch keine Beobachtung feststellbar, so ist sie auch nicht vorhanden: *Quand il n' y a point de changement observable, il n' y a point de changement du tout.*¹

Nach Leibniz bedürfen wissenschaftliche Annahmen zwar nicht der unmittelbaren Darstellung in wirklicher Erfahrung, aber die Beziehung auf mögliche Erfahrung muss in ihnen gewährleistet bleiben. Eine Hypothese erlangt dadurch wissenschaftliches Recht, dass sie sich, wenigstens mittelbar, in ihren Folgen im System des Erfahrbaren bewährt.

Nun ist klar, dass eine Elektronenbewegung im Atom kein Gegenstand einer unmittelbaren Erfahrung sein kann. Insofern deckt sich Heisenbergs Ansatz mit dem Prinzip der Beobachtbarkeit von Leibniz. Aber erfüllt Heisenbergs Ansatz auch das weitergehende Kriterium, dass eine Hypothese erst dann als unzulässig zu verwerfen ist, wenn sie sich auch mittelbar nicht für die Erfahrung bewährt? Zunächst scheint es, als ob Heisenbergs Ansatz hier nicht durchkommt, denn das von Bohr und Sommerfeld angenommene umlaufende Elektron kann doch die atomare Emission von Licht erklären. Aber es stellt sich nun heraus, dass Heisenbergs Kritik tatsächlich berechtigt ist, und dass sein Ansatz sich doch mit dem Leibnizschen Prinzip der Beobachtbarkeit deckt. Dies liegt daran, dass zwischen den beobachteten Spektrallinien empirische Beziehungen gelten, die denjenigen Beziehungen widersprechen, welche sich ergeben, wenn man sich die inneratomaren Elektronenumläufe den Regeln der herkömmlichen Kinematik unterworfen denkt. Die beobachteten Spektrallinien gehorchen grob gesagt nicht der klassischen Obertongleichung $\omega(n) = n \cdot \omega(1)$, sondern dem Rydberg- Ritzschen Kombinationsprinzip $\omega(n, m) = \omega(n, k) + \omega(k, m)$. Heisenbergs Ansatz deckt sich also vollständig mit dem Leibnizschen Prinzip: Die Annahme von Keplerschen Umlaufbahnen hat weder für die unmittelbare, noch für die mittelbare Erfahrung einen Wert, und es ist nicht viel mehr als Zufall, dass sich im Bohr-Sommerfeld-Modell des Wasserstoffatoms gerade noch die richtigen Energieniveaus und Übergangsfrequenzen ergeben, wohingegen dieses halbklassische Atommodell bereits beim nächst komplizierteren Element, dem Helium, völlig versagt.²

Bei einer solchen Sachlage schien es berechtigt, die Beschreibung der Atome mit Hilfe solcher Größen wie „Koordinate des Elektrons zu einer bestimmten Zeit“ ganz aufzugeben und statt ihrer nur solche Größen zu benutzen, die wirklich beobachtbar sind. Man wird bereit sein,

¹Siehe [Leibniz 1904], S. 188.

²Vgl. [Heisenberg 1925b], S. 880: „... daß die teilweise Übereinstimmung der genannten Quantenregeln (von Bohr- Sommerfeld; R.H.) mit der Erfahrung mehr oder weniger zufällig sei ...“

die Existenz von Umlauffrequenzen aufzugeben und annehmen, dass die Vorgänge im Atom keine anderen Frequenzen enthalten als die von der Spektroskopie tatsächlich beobachteten. Hierfür ist es nötig, den Begriff der Bewegung abzuändern, denn wenn Bewegungen durch die Angabe von Koordinaten als Funktionen der Zeit beschrieben werden, so führt die Fourier-Zerlegung der Koordinaten immer zur klassischen Obertongleichung und damit zu falschen, nicht dem Ritzschen Kombinationsprinzip gehorchenden Spektralfrequenzen. Es ist also notwendig, eine völlig neue Kinematik aufzubauen. Es stellt sich heraus, dass Heisenberg, um diese neue Kinematik zu finden, „nichts weiter“ zu machen brauchte, als das klassische Bild vom umlaufenden Elektron einer quantentheoretischen Umdeutung zu unterwerfen. Dass sich dadurch eine von der klassischen Kinematik und Mechanik andersartige neue Mechanik, die Matrizenmechanik oder Quantenmechanik, ergab, ist in diesem Zusammenhang nicht das Entscheidende. Wichtig ist vielmehr, dass Heisenberg trotz der prinzipiellen Nichtbeobachtbarkeit der inneratomaren Vorgänge mit Erfolg ein Bild gebraucht; es ist das Bild von den virtuellen Oszillatoren, die nach Heisenberg im Atom mit der „richtigen“ Frequenz schwingen. Auf der Grundlage dieser einfachen Vorstellung schafft es Heisenberg, die klassische Bewegungsgleichung gerade so viel abzuändern, dass die klassische Obertongleichung ersetzt wird durch das richtige Kombinationsprinzip der Spektren. Es ist klar, dass Heisenberg ohne den Gebrauch irgend eines Bildes überhaupt nichts vom Atom hätte aussagen können, er überhaupt keine Möglichkeit gehabt hätte, die beobachteten Spektrallinien mit inneratomaren Vorgängen welcher Art auch immer, und seien es nur energetische, in Beziehung zu setzen. Er hätte nicht im luftleeren Raum spekulieren können.

5.2 Einsteins Kritik am Positivismus

Einstein verstand sich selbst nicht als Positivist, obwohl Wissenschaftshistoriker gern davon sprechen, Einstein habe in seiner Relativitätstheorie den Positivismus Ernst Machs zur Geltung gebracht, indem er Raum und Zeit vom Olymp des Kantischen Apriori wieder hinunter in die sicheren Gefilde der Empirie getragen habe.³ Einstein hielt den positivistischen Standpunkt für nicht durchführbar. Das betonte er unter anderem in seinen Bemerkungen zu den Aufsätzen, die zu Ehren seines siebzigsten Geburtstages in dem Band „Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher“ von P. A. Schilpp herausgebracht wurden. Dort schrieb Einstein über den

³Vgl. z.B. den Titel des Aufsatzes [Renn 2004].

Positivismus der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik, jedoch auch bezogen auf Heisenbergs ursprüngliche Meinung, eine physikalische Theorie dürfe nur Beziehungen zwischen direkt beobachtbaren Größen herstellen:

„Was mir an dieser Art des Argumentierens nicht gefällt, ist die nach meiner Überzeugung unhaltbare positivistische Grundeinstellung, die mit dem Berkeley'schen Grundsatz ‚*esse est percipi*‘ zusammenzufallen scheint. Das ‚Sein‘ ist immer etwas von uns gedanklich Konstruiertes, also von uns (im logischen Sinne) frei Gesetztes. Die Berechtigung solcher Setzungen liegt nicht in ihrer Ableitbarkeit aus dem Sinnlich-Gegebenen. Eine derartige Ableitbarkeit ... gibt es nie und nirgends, auch nicht in der Domäne des vorwissenschaftlichen Denkens. Die Berechtigung der Setzungen, die für uns das ‚Reale‘ repräsentieren, liegt allein in deren vollkommenerer oder unvollkommenerer Eignung, das Sinnlich-Gegebene intelligibel zu machen.“

Aus diesen Worten Einsteins lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Erstens, die Abschaffung der absoluten Gleichzeitigkeit durch die Spezielle Relativitätstheorie erfährt ihre letzte Berechtigung nur durch die Ermöglichung einer widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper. Lorentz' Formelsystem unterscheidet sich in nichts von dem Einsteins; daher ist auch das Lorentzsche Konzept der Ortszeit geeignet, die Elektrodynamik auf sichere theoretische Grundlage zu stellen. Man kann daher nicht sagen, nur weil sie nicht beobachtbar sei, existiere eine absolute Zeit nicht. Wenn das Konzept einer absoluten Zeit die Phänomene theoretisch zu ordnen vermag, ist auch dieses Konzept ein erlaubtes. Erst die Hinzunahme eines zusätzlichen Prinzips, in diesem Falle des Relativitätsprinzips, macht eine Aussage für oder gegen die von Lorentz als reine Hilfsgröße eingeführte Ortszeit sinnvoll und eine Gleichberechtigung aller Systemzeiten möglich. Und zweitens, aus demselben Grund gibt es keine prinzipiellen Bedenken gegen die Verwendung von Begriffen wie „Elektronenort“, „Bahnradius“ und so weiter in einer Quantentheorie. Denn eine gute Theorie kann sehr wohl mit ihren mathematischen Schlussfolgerungen für den Anschluss dieser Begriffe an das Beobachtungsmaterial sorgen. Das ist es, was Einstein meint, wenn er sagt: „*Die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.*“

Unter dem Eingreifen Einsteins hat Heisenberg, als es um die physikalische Deutung der Quantenmechanik ging, den Standpunkt eingenommen, dass Erfahrung nur möglich sei unter Zuhilfenahme eines Mindestvorrates an gedanklichen Setzungen. Dies ist vor allem zu beto-

nen, weil Heisenberg im Frühsommer 1925 der Durchbruch zur Quantenmechanik noch unter einem ganz anderen Leitstern gelungen war: Die neue Theorie sollte nur direkt beobachtbare Größen enthalten. Insofern hat Heisenberg innerhalb von nur zwei Jahren eine Wandlung vom Positivisten Machscher Prägung zum Holisten durchgemacht. Es sei in einem Vorgriff auf den folgenden Abschnitt schon hier darauf hingewiesen, dass das Vorgehen von Einstein und Heisenberg mit einem methodologischen Problem behaftet ist, denn es wird in der *sprachlich* vermittelten Argumentation für dieses Vorgehen eine im *Handeln* der messenden Physik stattfindende Reihenfolge nicht nachvollzogen.

5.3 Das Messgeräte-Apriori des Methodischen Kulturalismus

Naturwissenschaftliche Erfahrung benötigt einen Mindestvorrat an gedanklichen, nicht durch ebendiese Erfahrung selbst einholbaren Setzungen, so dass der Machsche Sensualismus als undurchführbar betrachtet werden darf. Mach wollte die Welt möglichst einfach und neutral beschreiben, unter alleinigem Rückgriff auf Logik, Mathematik und „einfachen“ Sinneserlebnissen. Theorien galten ihm als „denkökonomische“, von der Mathematik unterstützte Ordnungssysteme von Sinnesdaten. Weder die Astronomie, noch die Physik sind *de facto* so verfahren, noch wäre das Rechenschema der spektralen Intensitäten auffindbar gewesen, hätte Heisenberg am Positivismus festgehalten.

Der Methodische Kulturalismus ist eine Richtung der theoretischen Philosophie, die den Konstruktivismus der Erlanger Schule fortsetzt. Diese Richtung des Philosophierens hat sich in Marburg um Peter Janich entwickelt. Die Erlanger Schule (Paul Lorenzen, Rüdiger Inhetveen) knüpfte an Arbeiten von Hugo Dingler an, der, mit dem empiristischen Selbstverständnis der Physik seiner Zeit unzufrieden, eine Revitalisierung des Kantischen Apriori betrieb. Nach Dingler sollte es Voraussetzungen der Physik geben, die jeder Erfahrung vorausgehen und darum durch Experimente nicht widerlegbar sind. Dingler erblickte diese apriorischen Voraussetzungen der Physik in der Konstruktion der physikalischen Messgeräte, so dass auch von dem Dinglerschen „Messgeräte-Apriori“ gesprochen werden kann. Die Erlanger Schule setzte Dinglers Begründungsprogramm für die exakten Wissenschaften Mathematik und Physik fort und präziserte die apriorischen Voraussetzungen der Physik in sogenannten Homogenitätsprinzipien. Im Rahmen dieser Auffassung behauptete Lorenzen, dass sich die Geometrie Eu-

klids aus Homogenitätsprinzipien rekonstruieren lassen müsse. Als Beispiel nannte Lorenzen das Dinglersche Dreiplattenschleifverfahren, das eine konstruktive Definition des Terminus „eben“ erlauben sollte. Entsprechende Homogenitätsprinzipien gab es dann auch für andere Grundbegriffe, wie orthogonal, parallel und so weiter. Da nun physikalische Messgeräte zuerst räumliche Gebilde darstellten, wird gesagt, dass die Messgerätebauer diese Homogenitätsprinzipien als apriorische Elemente in die zu fertigenden Geräte investierten. Nur auf der Grundlage dieses Herstellungswissens, nämlich des Wissens um das Bewirkenwollen gewisser Homogenitäten als Herstellungsziele, könnten Störungen der Messgeräte als Abweichungen von den Herstellungszielen zirkelfrei definiert und dann praktisch kontrolliert werden. Um ein Beispiel zu geben: Die Gleichförmigkeit des Uhrengangs sei *kein* Ergebnis einer Erfahrungswissenschaft, wie es der Empirismus gerne darstellen möchte. Denn empirische Kontrolle setze ihrerseits „wahre“, also ungestörte Messwerte voraus, so dass eine empirische Kontrolle der Gleichförmigkeit des Uhrengangs als zirkulär ausscheidet. Jene Gleichförmigkeit „ist vielmehr, als Bedingung der Möglichkeit messender Physik, eine normative Idee, die, als Zweck bei der Herstellung und Verwendung von Uhren der Geschichte des Uhrenbaus unterstellt, ein Verbesserungskriterium für Uhren abgibt. (...) Die Gleichförmigkeit der mit Uhren gemessenen Zeit ist also kein natürliches Gesetz, sondern ein kultureller Zweck.“⁴

Janich baute das Dinglersche Begründungsprogramm in den achtziger Jahren zu einer Proto-physik von Raum, Zeit und Masse aus. Über allen Bestrebungen des Methodischen Kulturalismus steht die Frage nach der Geltung wissenschaftlicher Aussagen: Wie ist, mit Kant gesprochen, Wissenschaft möglich, oder: Was verleiht den wissenschaftlichen Aussagen Geltung? Im Unterschied zu den beiden Hauptströmungen der Wissenschaftstheorie des zwanzigsten Jahrhunderts, Empirismus und Formalismus, geht der Kulturalismus einen dritten Weg, der das Begründungsproblem durch einen Rückgriff auf die lebensweltliche Praxis, die jeder wissenschaftlichen Betätigung zu Grunde liegt, löst. Der *nichtsprachliche* Vollzug einer Handlung ist unverzichtbarer Bestandteil der Begründung einer Aussage in Bezug auf Wahrheit und Geltung. Es wird nicht, wie in der klassischen Wahrheitsidee gefordert, die Übereinstimmung von Aussage und Sachverhalt festgestellt, sondern durch Herstellung herbeigeführt.

Der Lösungsvorschlag des Methodischen Kulturalismus besteht in der Rückführung der Geltung wissenschaftlicher Sätze auf das *sprachfreie* Handeln der Handwerker und Techniker. Der Vorzug dieser Begründungsstrategie liegt in der *Unhintergebarkeit sprachfreien Handelns* durch die Theorie. Um von der Lebenspraxis zur Wissenschaft oder Theorie zu kom-

⁴[Janich 1982], S. 14.

men, benutzt Janich ein „Ideationsverfahren“, welches in der *Rede darüber* besteht, wie der Handwerker oder Techniker seine Handlungsziele, insbesondere die protophysikalischen Homogenitätsprinzipien (zum Beispiel die Gleichförmigkeit des Uhrengangs), herbeiführen würde. Eine „Als-Ob“-Rede findet statt, nämlich als ob man die Herstellungsziele schon erreicht hätte. Diskursfähige Wissenschaft entsteht dann, indem in einem zweiten Schritt mit formallogischen Mitteln die Konsequenzen aus den als erfüllt unterstellten Herstellungszielen weiterverfolgt werden. Der Unterschied zwischen lebensweltlichen Künsten und wissenschaftlichen Methoden liegt in der Diskursfähigkeit der letzteren: Ihre Geltung gewinnt eine wissenschaftliche Methode nicht allein durch bloßen praktischen Erfolg, sondern durch einen *sprachlich-argumentativen* „Ausweis ihrer Leistungsfähigkeit für bestimmte Zwecke.“⁵ Es muss also ein Sprung vom Handeln in das Reden über Handlungen erfolgen, um Wissenschaft zu ermöglichen; eben diesen Sprung besorgt die Ideation.

Ferner benötigen wissenschaftliche Theorien Messresultate, die logische und mathematische Eigenschaften haben, welche den Rechenoperationen mit den Maßzahlen genügen. Messungen stellen Handlungen dar, welche diese Maßzahlen erzeugen. Die wesentlichen Eigenschaften der Messoperation übertragen sich auf Eigenschaften der Maßzahlen. Die erwünschten logisch-mathematischen Eigenschaften der Messresultate sind darum technisch herbeizuführen durch bestimmte bei der Messung aufrechtzuerhaltende Messgeräteeigenschaften. Eine Theorie der Messgeräte hat diese gewünschten Eigenschaften der Messresultate sicherzustellen. Zu den erwünschten Eigenschaften zählt insbesondere die Transsubjektivität oder Allgemeingültigkeit der Messresultate, denn erst dann ist es sinnvoll, sie als „Daten“ für die Bildung und Prüfung von Theorien zu verwenden.⁶ Auf diese Weise interpretiert die Protophysik das Kantische Apriori der „Bedingungen der Möglichkeit der Erfahrung“ in ein Relativ-Apriorium: Die vom Experimentator absichtsvoll-künstlich herbeigeführten Messgeräteeigenschaften, durch die naturwissenschaftliche Erfahrung überhaupt möglich wird, entsprechen den Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung Kants. Ohne apriorische Zwecksetzungen komme, so die Protophysik, keine naturwissenschaftliche Erfahrung zustande, denn man müsse vor Beginn einer Messung wissen, ob ein Gerät funktioniere oder nicht. Nur aufgrund dieses Wissens könnten Störungen des Gerätes behoben werden. Die Störungsbeseitigung könne aber keine empirische Frage sein, da Erfahrung ja erst durch störungsfreie Messgeräte ermöglicht werde.

⁵[Janich 1996], S. 77.

⁶[Janich 1996], S. 78.

Die Protophysik formuliert also ein handlungstheoretisches Apriori für Naturwissenschaften und Physik. Sie tritt damit dem verbreiteten holistischen Standpunkt entgegen, wonach eine physikalische Theorie nur als Ganzes eine Wissenschaft von Naturgegenständen sei. Eine holistische Interpretation gestaltet das Aufdecken methodischer Fehler im Vokabular einer wissenschaftlichen Theorie schwierig oder sogar undurchführbar, weil im Holismus sozusagen „alles durch alles“ gestützt ist. Die vorliegende Arbeit geht aber in diesem Punkt mit dem methodischen Kulturalismus konform: Eine physikalische Theorie, die in willkürlicher Reihenfolge den Aufbau ihrer Begriffsstruktur vollzieht, kann den Erfolg des Unternehmens Physik als Wissenschaft nicht erklären. Der Methodische Kulturalismus lehnt den Holismus auch deswegen ab, weil dieser eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen naturwissenschaftlichen Wissens unmöglich macht, nämlich die Unterscheidung zwischen einem Handlungsfolgewissen apriorischen Charakters und einem - in Naturgesetzen zusammengefassten - Widerfahrniswissen. Wird dieser Unterschied verwässert, dann wird nicht nur der methodologische Wegweiser für die Analyse der physikalische Begrifflichkeit zerstört, sondern es wird auch das handwerklich- technische Fundament der Physik marginalisiert. Dies käme aus der Sicht des Methodischen Kulturalismus auf ein Leugnen des Fundaments hinaus, auf dem die Physik steht.

5.4 Kritik der Unbestimmtheitsrelation

Die Gefahr, unter der Heisenbergs und Einsteins Rede vom Begründen einer physikalischen Theorie schwebt, besteht darin, nicht nur außertheoretische, sondern möglicherweise auch Resultate der erst zu entwickelnden Theorie für die Begründung heranzuziehen. Dann freilich wären die Begründungsbemühungen gescheitert, da eine *petitio principii* vorläge. Ein wichtiges Problem, auf das die im Methodischen Kulturalismus entwickelte Protophysik in diesem Zusammenhang aufmerksam macht, besteht darin, weshalb man die von der Relativitätstheorie, aber auch von der Quantenmechanik vorhergesagten Abweichungen bisheriger Messgeräteeigenschaften vom „Normalverhalten“ als prinzipiell ansieht und nicht mehr als durch Störungsrechnung beseitigbar. Zu Recht verweist die Protophysik auf das Messgeräte-Apriori. Der experimentierende Physiker muss das Funktionieren seiner Messgeräte kontrollieren können, um überhaupt zu zuverlässigen empirischen Daten, mithin zu Erfahrung kommen zu können. Diese Kontrolle kann der Experimentator nicht durch irgendwelche Teile derjenigen Theorie durchführen, die erst durch diesen Bereich von Messdaten in Gültigkeit

gesetzt werden soll. Es muss daher eine eigenständige Theorie der Messgeräteeigenschaften entwickelt werden. Um der Zirkularität zu entgehen, begründet die Protophysik jene Theorie der Messgeräteeigenschaften im Rekurs auf vorwissenschaftliche, handwerklich-technische Intentionen des Messgerätebaus. Die Gefahr eines Zirkels könnte mit Günther Ludwig zwar auch vermieden werden, wenn die Theorie der Messgeräte zwar Anleihen bei physikalischen Theorien macht, jedoch nur bei solchen, die von der zu prüfenden Theorie unabhängig sind. Dies steht allerdings in Kontrast zur Auffassung der meisten heutigen Physiker, dass die Quantenmechanik eine Theorie *von allem* sei.⁷ Ein solches Reden der Physiker über ihr angebliches eigenes Tun ist zurückzuweisen, um das Odium der Zirkularität von der Quantenphysik abzuwenden. Wenn Heisenbergs Lösungsvorschlag für das Verhältnis von Theorie und Beobachtung dargestellt wurde, so muss nun auf die Gefahr aufmerksam gemacht werden, die Bekämpfung des in der Tat unhaltbaren positivistischen Standpunktes möglicherweise zu übertreiben und Behauptungen an den Anfang einer physikalischen Theorie zu stellen, die sinnvollerweise, nämlich unter Beachtung einer methodischen Reihenfolge, erst als Folgerungen aus der zu begründenden Theorie gewonnen werden können.⁸

In der Physik, in den Wissenschaften überhaupt und in vielen Lernsituationen des alltäglichen Lebens kommt es oftmals vor, dass ein Eleve zu hören bekommt: „Das kannst du jetzt, mit dem dir zur Verfügung stehenden Wissen, noch nicht verstehen; später aber, wenn du im Besitz eines erweiterten Wissensbestandes, einer höheren Erkenntnis bist, wirst du es begreifen.“ Diese Situation ist uns derart vertraut, dass es meist an Sensibilität fehlt, die in dieser Aussage lauende Gefahr eines methodischen Fehlers zu bemerken: Es ist nämlich nicht ohne Einschränkung erlaubt, den Ausspruch folgendermaßen fortzusetzen: „Selbst das, was du zu wissen glaubtest, kann man in Wahrheit nur verstehen, wenn du den Schritt auf die höhere Erkenntnisstufe gemacht haben wirst.“ Wenn man so redet, zumindest in den empirischen Wissenschaften, läuft man Gefahr, ein Prinzip der methodischen Ordnung zu verletzen: Die höhere Erkenntnis können wir nämlich unter Umständen erst auf der Grundlage einer schon zuverlässig beherrschten bisherigen Erkenntnisstufe tätigen. Dies ist jedenfalls immer dann der Fall, wenn es sich bei den Erkenntnissen um Handlungen handelt, die nur erfolgreich ausgeführt werden können, wenn zuvor eine Gruppe von anderen Basishandlungen als beherrscht

⁷Siehe z. B. [Ludwig 1964], S. 235.

⁸Vgl. [Ludwig 1964], S. 235: Es „tritt die merkwürdige Situation auf, daß die Quantentheorie in einem Zirkel auch Aussagen über solche Strukturen der Wirklichkeit macht, deren begriffliche Erfassung der Quantenmechanik vorausgehen muß, damit diese überhaupt mit der Erfahrung verglichen werden kann“. Vgl. [Falkenburg 2007], S. 325: „Quantum physics presupposes the language of classical physics. Without the familiar scales of physical quantities, any quantum theory remains an abstract, uninterpreted formalism.“

unterstellt werden kann. Um ein drastisches Beispiel zu wählen, stelle man sich einmal vor, ein Künstler wollte eine Statue herstellen. Die methodische Ordnung der erforderlichen Herstellungshandlungen erzwingt es dann, dass er das Holzstück zuerst schnitzen und dann bemalen muss. Eine Vertauschung dieser Reihenfolge wäre nur bei Strafe des Misserfolgs möglich. Ganz ähnlich hängt das Messen im Experiment pragmatisch ab von der Herstellung ungestörter Messgeräte.⁹ Empirische Wissenschaften müssen in ihren Experimentierhandlungen in einer bestimmten Reihenfolge vorgehen, um zu Erfahrung oder zu Naturgesetzen, protophysikalisch gesprochen zu reproduzierbaren und transsubjektiv gültigen Widerfahrnissen gelangen zu können.

Als Gegenargument könnte man an die gestalterische Freiheit der empirischen und theoretischen Frontarbeit denken. Diese Freiheit soll allerdings zugestanden werden, war doch schon zu Beginn der vorliegenden Arbeit dafür argumentiert worden, dass die Physik mit dem unmittelbar Wahrnehmbaren allein nicht hinkommt. Aber wenn auf diese Weise eine neue empirische oder theoretische „Wahrheit“ in den bisherigen Bestand dieser Wissenschaft eingefügt werden soll (und darauf muss bestanden werden, wenn Wissenschaft in einer argumentativen Nachvollziehbarkeit von Aussagen bestehen soll), kann es sich nur um eine Hinzunahme des Neuen unter Aufrechterhaltung wenigstens desjenigen Teils des alten Besitzstandes handeln, der für eine methodisch gestützte Begründung des Neuen unabdingbar ist. Um einem Missverständnis vorzubeugen: Es soll hier keineswegs behauptet werden, dass es keine über die Grenzen der klassischen Mechanik hinausgehende Erfahrungserweiterung geben könne. Schon die Elektrodynamik sprengt den Rahmen der Mechanik, und es war weder Maxwell, noch Lorentz oder Boltzmann gelungen, eine vollständige Rückübersetzung der Maxwellschen Theorie in die Kinematik der klassischen Mechanik zu leisten. Die Übersetzung elektrischer und magnetischer Phänomene in mechanische gelang immer nur punktuell.¹⁰ Hieran jedoch wird festgehalten: Dass eine neue Erfahrung keine nachträgliche Negation desjenigen Erfahrungsbereichs zulässt, der als Grundlage für den neuen herangezogen werden muss. Freilich muss das Neue rückblickend auf das Bisherige eine bessere Einsicht in das Bisherige bieten, wenn sich das Neue als Fortschritt in dieser Wissenschaft etablieren will. Um noch ein Beispiel aus dem Bereich der Quantenphysik zu bringen, werde das Quantenmechanik-Lehrbuch von Born und Jordan ([Born/Jordan 1930]) aufgeschlagen. Darin liest man auf Seite Zwei der Einleitung:

⁹Siehe etwa [Tetens 1987], S. 149 Anm. 2.

¹⁰Für jedes Detailproblem ließen sich zwar mechanische Analogien herstellen, diese wurden jedoch um so gekünstelter, je mehr Fälle man in den Einzelheiten umfassen wollte. Siehe [Lorentz 1928], S. 76.

„Die Fortentwicklung der Quantentheorie ... brauchte ... eine ganze Reihe neuer Gedanken. Aber ehe wir diese darstellen, wollen wir betonen, daß die grundlegenden Annahmen, welche die Quantentheorie von der klassischen Theorie unterscheiden, nicht nur ihre Geltung bewahrt haben, sondern erst recht fest begründet worden sind: Wir meinen das Auftreten von Diskontinuitäten (Quanten- Zuständen und Quanten- Sprüngen), die Existenz von Energiequanten, bestimmt durch die Plancksche Konstante h .“¹¹

Selbstverständlich muss die Quantenmechanik in der Lage sein, all diese Dinge zu reproduzieren, sonst wäre sie keine Verbesserung der alten Bohr- Sommerfeld-Theorie. Aber sie ist und bleibt auf die Plancksche Konstante \hbar von außen angewiesen, da sie keinerlei Rechtfertigung für diese Konstante zu geben vermag. Das Postulat der Vertauschungsbeziehung zwischen Ort und Impuls erst bringt das Plancksche \hbar in die neue Theorie hinein. Damit ruht die Quantenmechanik auf dem korrespondenzmäßig umgedeuteten Thomas-Kuhnschen Summensatz und, darüber mittelbar, auf den virtuellen Oszillatoren. Es hat sich in der Physik zwar die Redeweise eingebürgert: „Die Quantenmechanik ist sehr wohl auch die Grundlage der klassischen Mechanik; die Tatsache, dass wir im gewöhnlichen Maßstab die Plancksche Konstante nicht bemerken, liegt nur an ihrer Kleinheit.“ Aber hierbei wird ein neues Problem erzeugt, nämlich: Welches ist der objektive, argumentativ einholbare Maßstab für die „Kleinheit“ der Planckschen Konstante? Da in dieser Vorgehensweise die klassische Mechanik in die Quantenmechanik nicht als Fundament genommen, sondern in die Quantenmechanik hineingenommen wird, fehlt dieser Maßstab dann, denn die Quantenmechanik kann unmöglich ein Kriterium dafür angeben, unter welchen Bedingungen eine in ihr enthaltene Konstante „klein“ sein soll. Es gibt somit in einer Quantenmechanik, die eine umfassende Theorie von allen physikalischen Vorgängen darstellen soll, kein wissenschaftliches Kriterium mehr für die Kleinheit des Planckschen \hbar ; es bleibt allein der praktische Erfolg als Beurteilungsinstanz, in welchen Fällen der messende Physiker diese Konstante vernachlässigen darf. Die klassische Physik *muss* also vorausgesetzt werden, um den Aussagen der Quantenmechanik argumentativ einen Sinn geben zu können. Nun sind weder die klassische Mechanik noch die Elektrodynamik Beschreibungen alltäglich begegnender Vorgänge, sondern selbst schon Theorien von sprachlich konstruierten Gegenständen. Die Quantenmechanik, als auf die klassischen Theorien aufbauend, kann daher unmöglich mit Begriffen beginnen, „die als unmittelbar gegebene Tatsachen keiner weiteren Erklärung bedürften. (...) Elektronen, Wasserstoffatome, Wasser-

¹¹Es gilt der Zusammenhang $h = 2\pi \cdot \hbar$.

moleküle, Atomkerne - alles dies sind Begriffe, deren Bedeutung erst einer Analyse vieler Experimente entspringt.“¹²

Auch Theorie-intern lässt sich der Anspruch, die Quantenmechanik müsse eine Theorie von allem sein, problematisieren. Die Wellenmechanik operiert mit einer partiellen Differentialgleichung, der Schrödingergleichung, die als wesentlichen Input den Hamiltonschen Differentialoperator benötigt. Dieser Operator entspricht in der klassischen analytischen Mechanik der Systemenergie. Für den Hamiltonoperator gibt die Wellenmechanik selbst keine Handhabe zu seiner Konstruktion; er muss durch Analogiebildung aus dem klassischen Bild des quantenmechanischen Systems gewonnen und kann sogar, wenn die Analogiebildung schwierig ist, nur durch systematisches Raten gefunden werden.¹³ Dasselbe gilt für die Heisenbergsche Quantenmechanik: Um die Energiezustände eines atomaren Systems berechnen zu können, muss eine Gleichung in den Übergangsamplituden aufgestellt werden, welche der klassischen Energie- oder Hamiltonfunktion entspricht. Es ist dies die Hamiltonmatrix der Matrizenmechanik, die auf Diagonalform gebracht werden muss, um dann auf der Hauptdiagonalen die Bohrschen Energiezustände ablesen zu können. Jene Hamiltonmatrix kann ebenfalls nur unter Zuhilfenahme mechanischer und elektrodynamischer Bilder konstruiert werden:

„Das Coulombsche Kraftgesetz und das Bohr- Rutherfordsche Atommodell sind ... in der Quantenmechanik nur unter der Tarnkappe des Matrizenformalismus verborgen. Im Wesen stecken sie noch immer hinter den ganzen Rechnungen, da ja die Hamiltonsche Funktion $H(p, q)$ nur auf Grund bestimmter Vorstellungen über dieses Modell aufgebaut werden kann.“¹⁴

Wenn die Quantenmechanik eine Theorie von allem sein wollte, so müsste sie über eine quantenmechanische Regel zur Konstruktion der Hamiltonfunktion H verfügen. Die Quantenmechanik ist aber auf die klassisch konstruierte Hamiltonfunktion angewiesen; es kann eine quantenmechanische Regel überhaupt nicht existieren, da diese Konstruktion zu einem quantenmechanischen Gesetz, nämlich zur Unbestimmtheitsrelation, in Widerspruch stünde. Denn - abgesehen vom Fall eines freien Teilchens - enthält die Hamiltonfunktion, als Summe der kinetischen und potentiellen Energie, sowohl Impuls- als auch Ortskoordinaten, die aber gemäß der Unbestimmtheitsrelation nie zugleich gemessen werden können. Die hier vorgetragene Kritik kollidiert nicht mit der quantenmechanischen Rechenpraxis, die darin besteht, den

¹²[Ludwig 1964], S. 236.

¹³Siehe z. B. [Pauli 1958], S. 24.

¹⁴[Thirring 1928], S. 411.

Ausdruck für die Hamiltonfunktion $H(p, q)$ neben die Vertauschungsrelation zu stellen und mathematische Folgerungen aus dem Kombinieren beider Ausdrücke zu ziehen. Die Anwendung der Vertauschungsrelation auf das quantenmechanische Bewegungsproblem läuft darauf hinaus, die Energie- oder Hamiltonmatrix H auf Hauptachsen zu transformieren.¹⁵ Die Mathematik der Quantenmechanik ändert aber nichts daran, dass der Energieausdruck $H(p, q)$ des jeweiligen Problems nur aus einem gleichsam auf makroskopische Größe gezoomten Bild von den energetischen Verhältnissen abgelesen werden kann.

Die Unbestimmtheitsrelation als mathematische Konsequenz der Wellenmechanik und ihrer statistischen Interpretation aufzufassen, unterliegt keiner Zirkelgefahr. Da die Grundlage der Wellenmechanik eine empirische ist, hat eine derart begründete Unbestimmtheitsrelation, als mathematisch-logische Konsequenz gewisser experimenteller Fakten, wesentlich empirischen Charakter. Freilich wäre dann die Unbestimmtheitsrelation nur so lange haltbar, wie es keiner Korrekturen ihrer empirischen Grundlagen bedarf. Die Einschränkung der klassischen Begriffe von Ort und Impuls könnte später einmal wieder, bei Erweiterung unseres Wissens über die Zusammenhänge in der Quantenphysik, revidiert oder modifiziert werden. Dies war auch die Hoffnung Einsteins. Von John Neumann, Bell und anderen sind Untersuchungen angestellt worden, inwieweit der wellenmechanische Formalismus einer Ergänzung fähig ist, die eine Rückkehr zu klassischen Vorstellungen erlauben würde. Dann wäre die Wellenmechanik vielleicht in ähnlicher Weise auf die klassische Physik zurückführbar, wie die Thermodynamik am Ende des neunzehnten Jahrhunderts auf die statistische Mechanik zurückgeführt werden konnte. Es war also zu klären, ob die Wellenmechanik als eine Art statistische Mechanik für zur Zeit noch unbekannte verborgene Parameter interpretiert werden könnte. Es wäre ja möglich, dass die Mittelwertsaussagen der Wellenmechanik gar nicht von prinzipiellem Charakter sind, sondern lediglich ein Ausfluss unserer Unkenntnis über die den Quantenzustand in Wirklichkeit determinierenden Parameter. Das in diesem Zusammenhang letzte Resultat sind die so genannten Bell'schen Ungleichungen.¹⁶ Das Resultat von Bell lautet: Jede kausale (deterministische) Theorie der Quantenmechanik *muss* eine nicht- lokale Theorie sein, das heißt in ihr müssen instantane Auswirkungen eines Vorgangs auf einen anderen, von jenem räumlich getrennten Vorgang möglich sein.¹⁷

¹⁵Siehe z. B. [Born/Jordan 1930].

¹⁶[Bell 1966].

¹⁷Der Kollaps der Wellenfunktion beim Registrieren eines Elektronenaufschlags auf den Schirmen Reichenbachs ist ein Beispiel für einen solchen nicht- lokalen Vorgang. Einen gut verständlichen Nachvollzug von Bells Argumentation bietet [Büchel 1967]. Büchel macht ein Gedankenexperiment zum Durchgang von Elektron-Positron- Paaren durch eine Polarisationsmessapparatur und leitet zur Annahme, dass die dabei auftretenden

Im Gedankengang Weizsäckers kam es auf die Einsicht an, dass sein Gedankenexperimentes nicht erst als eine Konsequenz der Quantenmechanik, sondern bereits ohne Bezugnahme auf die Quantenmechanik zu verstehen ist. *Dass* der Experimentator über einen Mindestvorrat an Setzungen verfügen muss, um das Mikroskop zu bedienen, um vor allem aber das korrekte Funktionieren desselben kontrollieren zu können, kann nicht bezweifelt werden. Weizsäcker wollte zeigen, dass die quantenphysikalischen Konzepte der Unbestimmtheit und der Nichtobjektivierbarkeit als eine organische Weiterentwicklung der Klassik betrachtet werden dürfen. Die Nichtobjektivierbarkeit selbst der Wellenfunktion schob den Schwarzen Peter vom wellenmechanischen Formalismus weg und den bildhaften Vorstellungen über die stattfindenden Vorgänge zu: An unserer Bildlichkeit, an unserer anschaulichen Erfassung der quantenphysikalischen Wirklichkeit ist etwas ungenügend, während der Formalismus sicher und unbeirrt seinen Gang geht, sobald man, auf welche Weise auch immer, der Wellenfunktion habhaft geworden ist. Es wäre wieder einmal die Mathematik, die in Sachen Naturbeschreibung das letzte Wort behielte, und die Anschauung wäre nicht nur als entbehrlich, sondern neuerdings sogar als in sich widersprüchlich entlarvt. Auch bei Reichenbach sind es die Bilder, die an den besonderen Eigenschaften der quantenphysikalischen Interphänomene zu zerschellen drohen. Nur die Unbestimmtheitsrelation verhindert diese Katastrophe. Die friedliche Koexistenz von Wellen- und Teilchenbild bei der Beschreibung der Interphänomene wird bei Reichenbach durch die Unbestimmtheitsrelation sichergestellt. Der Haltung Weizsäckers und Reichenbachs steht allerdings das historische Faktum der virtuellen Oszillatoren gegenüber. Das durch sie ermöglichte klassische Ersatzbild für die quantenhafte Emission von Licht ließ nicht vermuten, dass eine modellhafte Erfassung spektroskopischer Eigenschaften der Elemente mit einem Versagen der klassischen Bilder endigen würde.

Die vorstehende Analyse hat ergeben, dass eine Rechtfertigung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation auf dreierlei Weise versucht wurde: Erkenntnistheoretisch harmlos ist der Begründungsversuch Paulis, die Beschreibbarkeit von Mikrophenomenen durch statistisch zu interpretierende Wellenfunktionen axiomatisch zu fordern und die Unbestimmtheitsrelation daraus mathematisch abzuleiten, denn jeder derartige Versuch kann nur so stark sein wie das den Axiomen zu Grunde liegende Erfahrungsmaterial. Heisenberg argumentierte im Anschluss an Einstein, die Setzung der Unbestimmtheitsbeziehung sei für die gedankliche Erfassung des Erfahrungsmaterials notwendig. Auf diese Weise verließ Heisenberg die als Grund-

Häufigkeitsverteilungen klassisch- statistische Wahrscheinlichkeitsverteilungen seien, einen Widerspruch zur Quantenelektrodynamik her.

anliegen seiner Umdeutungsarbeit von 1925 angelegte positivistische Spur, da er eingesehen hatte, dass Erfahrung als bloßes Wahrnehmen von einfachen Sinnesempfindungen (Schwärzungen einer Photoplatte usw.) nicht möglich ist. Heisenbergs antipositivistische Erleuchtung muss grundsätzlich begrüßt werden. Jedoch ist sein Ausweg aus der sensualistischen Falle nicht gangbar, denn es wurden methodische Fehler in seinem Lösungsvorschlag aufgedeckt. Das Auffinden dieses Fehlers wurde erleichtert durch eine Methodenlehre der Physik, wie sie der Methodische Kulturalismus zur Verfügung stellt. Der Methodische Kulturalismus, der eine gegen die Sprachzentriertheit der Wissenschaftstheorie gewendete „kulturalistische Wende“¹⁸ reklamiert, schlägt vor, eine Begründung der Naturwissenschaften mit vorsprachlichen Mitteln zu versuchen und eine Erkenntnistheorie derjenigen Handlungen zu entwickeln, durch die zum Beispiel die Physik als Wissenschaft in Gang kommen kann. Dies führte zu Prototheorien des Messens von Raum, Zeit und Materie.¹⁹ Alle Prototheorien betonen das bereits erwähnte Prinzip der methodischen Ordnung, das ist die Aufforderung, die zielführende Reihenfolge nichtsprachlicher Handlungen als Reihenfolge ihrer Darstellung in sprachlicher Form beizubehalten. Der Leitgedanke jenes Prinzips lässt bei Heisenbergs Versuch, die Unbestimmtheitsrelation zu begründen, mehrere Kritikpunkte zutage treten, solange die Quantenmechanik bei ihrer Behauptung bleibt, eine umfassende, auch die klassische Mechanik und Elektrodynamik enthaltende Theorie der Physik zu sein. Denn einerseits setzt die Quantenmechanik eine umfangreiche Klasse bereits klassisch beherrschbarer und verstandener Experimente voraus. Zweitens ist Plancks Konstante nur als eine Zutat zur Klassik begreifbar. Und drittens ist die Konstruktion der quantenmechanischen Hamiltonfunktion auf anschauliche Bilder, sprich auf ein Atommodell angewiesen.

Das Argument Reichenbachs für die Unbestimmtheitsrelation ist im Grunde ein ikonisches: Die Feststellung einer prinzipiellen Bilder-Dualität führte dazu, die Unbestimmtheitsrelation zu postulieren, um zu verhindern, dass sich Wellenbild und Teilchenbild bei ihrer Anwendung auf Mikrophenomene gegenseitig auslöschen. Es ist keine Dualität von Handlungen, die hier vorliegt, so dass der methodische Kulturalismus nicht als fähig erscheint, auf die Dualität von Bildern zu antworten. Dass dieselbe aber einer Reaktion bedarf, wird durch den Erfolg der virtuellen Oszillatoren angedeutet und gewinnt durch das erfolgreiche Einfangen des Zeeman-Effektes in ein anschauliches kinematisches Bild zusätzliche Virulenz. Die durch Lorentz modifizierte Elektrodynamik und die in dieser Theorie vollzogene Synthese von Feld- und Teil-

¹⁸[Janich 1998].

¹⁹Siehe [Janich 1997]. Für eine handlungstheoretische Grundlegung der Quantenmechanik wäre daher noch eine Protophysik der Quantenphänomene zu entwickeln.

chenvorstellungen erregte keine Krise der Anschauung. Modelle *per se* sind demnach keine Ursache von Anschauungs-Dichotomien. Das steigert das Bedürfnis nach dem Ingangsetzen einer Ikonologie der physikalischen Bilder noch zusätzlich. Da eingangs die Rede von Modellen „von etwas“ stark gemacht worden war, verbietet sich der Vorschlag, dem Bild- Dilemma durch den Hinweis zu entkommen, dass „die Natur“ den Bilder-Dualismus erzeuge und wir uns deshalb mit dieser Dualität abzufinden hätten. Die Bildwissenschaft wäre hier mit auf den Plan zu rufen.

5.5 Das Apriori der Erhaltung der Lichtmenge

Die Photometrie vermag das protophysikalische Handlungs- Apriori gut zu illustrieren. Die Photometrie (übersetzt: „Lichtmesskunst“) ist die Lehre von den die Helligkeit der sichtbaren Lichts betreffenden Gesetzen. Die Photometrie beurteilt Helligkeiten oder Lichtintensitäten nicht nach dem Energiegehalt des Lichtes, sondern nach seiner Wirkung auf das menschliche Auge. Die energetische Betrachtungsweise wird auch als „objektiv“ bezeichnet, weil für die objektive Photometrie Messgeräte zur Verfügung stehen, welche die vielen mit dem Gebrauch des Auges als eines menschlichen Sinnesorgans verbundenen Nachteile vermeidet. Sie hat sich heute in der Physik als Radiometrie durchgesetzt, während die subjektive Photometrie eine Ingenieurwissenschaft geworden ist, die sich mit der Konstruktion von künstlichen Lichtquellen sowie mit der physiologischen Wirkung des Lichtes befasst. Die physikalische Photometrie hatte den Nachteil, dass sie bis Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts prototypenabhängig war; die materialisierte Lichtstärke- Einheit war die Hefner-Kerze. Um die physikalische Photometrie auf eine sicherere Grundlage zu stellen, war man auf der Suche nach einer Lichtstärkeeinheit, die auf ein universelles, das heißt stoffunabhängiges Naturgesetz gegründet werden konnte. Als Grundlage hierfür wurde die Leuchtdichte, das ist die vom Lichtsinn des Auges bewertete Strahlungsdichte („Lichtstärke-Dichte“) eines schwarzen Körpers bestimmter Temperatur in Betracht gezogen.²⁰ Dieses Bedürfnis hat schließlich zur Planckschen Strahlungsformel und damit überhaupt erst zur Quantentheorie geführt. Die visuelle, auf dem Lichtsinn des Auges basierende Photometrie als Wissenschaft ist bereits im achtzehnten Jahrhundert durch Lambert begründet worden.²¹ Lambert erkannte deutlich ein Zirkelproblem bei

²⁰Als Normallichtquelle dient heute ein schwarzer Körper mit einer Öffnung von $1/60 \text{ cm}^2$ und von der Erstarungstemperatur des Platins.

²¹[Lambert 1760].

der Objektivierung der visuellen Photometrie: Um die Störungen der Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges aus den Messdaten herausrechnen zu können, bedürfe es, so Lambert, einer genaueren Kenntnis der Eigenschaften des Auges. Gerade die Untersuchung der physiologischen Grundlagen bedürfe ihrerseits jedoch einer objektiven, das heißt einer auf wissenschaftlichem Fundament ruhenden Photometrie.²²

Die Feststellung von Helligkeiten oder Lichtstärken erfolgt in der subjektiven Photometrie durch Abgleich zweier Helligkeiten: Es wird eine Helligkeit mit der Helligkeit einer Normallampe verglichen. Dazu stellt man die zu vergleichenden Lichtquellen zu beiden Seiten eines Schirms, des Photometerschirms, auf und wählt die Entfernung so, dass die Beleuchtungsstärken auf beiden Seiten des Schirms gleich groß sind. Die Behauptung ist dann, dass die Lichtstärken sich verhalten wie die Quadrate der Entfernungen der Lichtquellen vom Photometerschirm. Auf diese Weise wird die Bestimmung der Lichtstärke geometrisiert, das heißt es wird durch jene Fundamentalannahme der $1/r^2$ -Abhängigkeit der Lichtstärken eine geometrische Skala erzeugt. Die Frage ist nun, woher das $1/r^2$ -Gesetz seine Rechtfertigung erfährt. In Lehrbüchern der Photometrie findet man eine Begründung mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes. Es wird argumentiert: „Von einer punktförmigen Strahlungsquelle wird die Energie E nach allen Richtungen des Raumes gleichmäßig ausgestrahlt. Durch zwei konzentrische Kugelflächen, mit dem Radius r_1 und r_2 , in deren Zentrum die Strahlungsquelle liegt, tritt der gesamte, also auch durch beide Flächen der gleiche Energiestrom hindurch.“²³ Das $1/r^2$ -Gesetz der Helligkeiten folgt dann sofort. Das Problem ist, dass man ein energetisches Argument benutzt hat, um eine Aussage der subjektiven Photometrie zu rechtfertigen. Mach hat in seiner Analyse dieses Problems darauf hingewiesen, dass es historisch das Ziel gewesen sei, eine photometrische Skala herzustellen, die dem $1/r^2$ -Gesetz gehorcht. Und Mach sagt weiter, dass die $1/r^2$ -Abhängigkeit ein Herstellungsziel beim Bau der Photometer sei, indem das Gesetz nichts anderes ausdrücke als die Konstanz einer Lichtmenge beim Durchgang durch die konzentrischen Kugelschalen:

„Dem Instrument sei eine zunächst willkürliche Skala beigegeben. Dann würde das Streben auftreten, die instinktive Vorstellung (gemeint ist die Konstanz der

²²[Lambert 1760], S. 7: „Wollte man die Urtheilsfähigkeit des Auges schärfer untersuchen, so müsste man auf diese Täuschungen Rücksicht nehmen und dieselben in Rechnung ziehen, um dadurch die übrigen Principien der Photometrie auf festeren Boden stellen zu können. Aber bei einer näheren Betrachtung leuchtet ein, dass man gerade diese Principien schon braucht, wenn man den Fehler, welcher im Urtheil des Auges liegt, bestimmen will.“

²³[Gerthsen/Pollermann 1971], S. 139.

Lichtmenge, R. H.) begrifflich quantitativ zu verschärfen ... Stimmt die willkürliche photometrische Skala hierzu, so haben wir einen wichtigen Begriff gefunden. Wir nennen (ihn) ... *Lichtmenge*. Stimmt die Skala *nicht* zu dieser Auffassung, so werden wir den Begriff entweder fallen lassen, oder wenn uns derselbe zu wertvoll, um nicht zu sagen zu sympathisch ist, werden wir die Skala so modifizieren, *daß* sie stimmt, d. h. wir werden die Beleuchtungsstärke oder Intensität zweckentsprechend definieren.“²⁴

Sehr instruktiv in diesem Zusammenhang ist, dass es eine Invarianz der Lichtmengenerhaltung gegen Theorienwechsel gegeben hat, indem auch die Quantentheorie, die von einer Strömung von Energiepartikeln spricht (dies ist der Inhalt der Einsteinschen Lichtquantenhypothese), an der Erhaltung der Energie- oder Lichtmenge festgehalten hat, nur in anderer Nuancierung als Erhaltung von portionierter anstelle von kontinuierlich strömender Energie. Unter dem Wechsel der Theorieform von der klassischen zur quantenphysikalischen Lichttheorie ist das Prinzip der Erhaltung der Lichtmenge invariant geblieben. Das photometrische $1/r^2$ -Gesetz ist Baustein einer erst noch zu schaffenden Prototheorie der Quantenphysik. Der Zweck eines solchen Unternehmens bestünde in der Auffindung derjenigen Elemente der Quantenphysik, die für eine handlungstheoretisch fundierte, das Prinzip der methodischen Ordnung befriedigende Quantentheorie erforderlich sind.

²⁴[Mach 1921], S. 26- 27.

6 Der Beitrag von Leibniz

6.1 Einleitung

Die bisherigen Erörterungen haben den Bruch der Quantenmechanik mit den Vorstellungen der klassischen Physik dargelegt. Man kann versuchen, für diese Bruchstellen die Ursachen entweder auf quantenmechanischer Seite suchen, oder aber die Grundlagen der klassischen Physik und dabei vor allem der klassischen Mechanik kritisch zu beleuchten. Die klassische Mechanik ruht in ihrem kinematischen Teil weitgehend auf den von Newton geschaffenen Grundlagen, insbesondere auf den Newtonschen Anschauungen über Raum und Zeit. Newtons Zeitgenossen Leibniz und Huygens waren Gegner der Newtonschen Raum-Zeit-Lehre. Es soll im folgenden untersucht werden, ob sich aus den Beiträgen Leibnizens zur Philosophie von Raum, Zeit und Bewegung eine Alternative zur Newtonschen Kinematik entwickeln ließe, die womöglich die durch die Quantenmechanik erzeugte Krise der Anschauung in ein anderes Licht rückt.

6.2 Leibniz' reiner Ordnungsraum

Die wichtigsten Schriften zu Leibniz' Raum-Zeit-Lehre sind die „*Initia rerum mathematicarum metaphysica*“¹ sowie der zu derselben Zeit (um 1715) entstandene Briefwechsel mit dem Sekretär Newtons, Samuel Clarke², insbesondere der fünfte Brief von Leibniz an Clarke. In seinen metaphysischen Anfangsgründen der Mathematik³ erklärt Leibniz die Zeit als

¹Siehe [Leibniz 1904], S. 53- 68.

²Siehe [Leibniz 1904], S.120- 241.

³Man beachte die diametrale Umstellung der Titelworte im Vergleich zu Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, den mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie. Hierin wird der ganze Unterschied zwischen dem Philosophen Leibniz und dem mathematischen Naturforscher Newton fokussiert.

die Ordnung des nicht zugleich Existierenden.⁴ Die Erklärung des Raumes gewinnt Leibniz im Anschluss an die Erklärung der Gleichzeitigkeit. Diese Reihenfolge des Definierens ist zwingend, wenn man bedenkt, dass die Definition des Raumes die Feststellbarkeit der Gleichzeitigkeit (die Leibniz im übrigen nicht weiter problematisiert) bereits voraussetzt, denn der Raum sei die Ordnung des Koexistierenden, das heißt die Ordnung für alles, was zugleich ist.⁵ Raum und Zeit sind keine für sich bestehende Wesenheiten, sondern Ordnungsschemata der zunächst allein gegebenen Dinge oder Zustände. Zuerst sind die Dinge da. Raum und Zeit konstruieren wir erst aufgrund gewisser Beziehungen zwischen den Dingen. Das ist der Leibnizsche Relationalismus. Das Ordnungsschema „Raum“ setzt, da die Definition des Raumes eine Erklärung von Gleichzeitigkeit verlangt, irgendeine Definition von Gleichzeitigkeit voraus. Man hat nach Leibniz diejenigen Dinge oder Zustände als gleichzeitig anzusehen, die in keinem kontradiktorischen Verhältnis zueinander stehen. In den *Initia rerum mathematicarum* heißt es dazu: „Gesetzt, es existiert eine Mehrheit dinglicher Zustände, die einander nicht ausschließen, so werden sie als *zugleich existierend* bezeichnet.“⁶ Man wird demnach zwei Zustände als gleichzeitig definieren dürfen, wenn sie sich logisch nicht widersprechen. Leibniz erläutert dies an folgendem Beispiel: Wir sagten nicht, dass die Ereignisse des vergangenen und dieses Jahres gleichzeitig sind, weil sie entgegengesetzte Zustände eines und desselben Dinges bedingen.⁷ Die Zeitfolgebeziehung gilt Leibniz als die Beziehung von Ursache und Wirkung. Ständen zwei dingliche Zustände in dem Verhältnis von Ursache und Wirkung, so werde der eine als zeitlich vorangehend, der andere als zeitlich nachfolgend definiert. Die Zeitfolge ist in dieser Interpretation die Ordnung der kausalen Abläufe, so dass die Zeitordnung bei Leibniz etwas ist, was aus einer anderen, ausschließlich begrifflichen Ordnung deduziert wird, während die Gleichzeitigkeit sogar rein logisch als die Negation eines kontradiktorischen Zustandes erklärt wird. Der Gegensatz von Leibniz zu Kants Raum-Zeit-Lehre ist offensichtlich: Während Kant behaupten wird, dass Raum und Zeit Vermögen der Anschauung sind, die als eigenständige Erkenntnisvermögen gleichberechtigt neben den Urteilsfunktionen des Verstandes, den Kategorien, stehen, gibt es bei Leibniz noch keine Dualität von Anschauung und Verstand. Darf daraus gefolgert werden, dass es aus Leibnizscher Sicht keine Krise der Anschauung geben kann, es sei denn, sie wäre schon eine Krise des Verstandes oder der Vernunft? Und wodurch wird die Objektivität der Verknüpfungen verbürgt? Cassirer merkt

⁴[Leibniz 1904], S. 54.

⁵[Leibniz 1904], S. 54.

⁶[Leibniz 1904], S. 53.

⁷[Leibniz 1904], S. 53.

hierzu in seiner Leibniz-Interpretation von 1902 („Leibniz’ System in seinen wissenschaftlichen Grundlagen“) an, es sei Sache der Erfahrung, darüber zu entscheiden, ob und wieweit die gedankliche Forderung der durchgängigen Verknüpfung in gegebenen Naturverhältnissen realisierbar sei.⁸ Wie aber sollte dies zirkelfrei möglich sein, da es Erfahrung im Sinne einer empirischen Wissenschaft ja nur aufgrund bereits abgesicherter Messmethoden für räumliche und zeitliche Größen geben kann?⁹ Es ist jedenfalls auch eine Frage der vorweggenommenen gedanklichen Setzungen, der eingenommenen Perspektive, wie die Verknüpfungen der Dinge oder Zustände gedacht werden. Der Physiker wird nur solche Verknüpfungen zulassen, die in der Sprache seiner Wissenschaft formulierbar sind. Ein Magier oder ein Priester legt gewiss eine andere Verknüpfung der Dinge zu Grunde. Ein anderes Problem ist der Verdacht, dass Leibniz bei seiner Definition der Zeitfolgebeziehung zirkulär vorgeht: Ließe sich denn überhaupt wissen, ob ein Zustand die Ursache eines anderen ist, wenn man noch gar nicht darüber sprechen darf, dass einer der beiden früher als der andere ist? Leibniz versucht diese Schwierigkeit dadurch zu umgehen, dass er das Prinzip der Ordnung der Dinge zusammenfallen lässt mit dem Satz vom zureichenden Grund, dem *principium rationis sufficientis*, dem zufolge nichts in der Welt geschieht, wenn es keinen hinreichenden Grund für die mit dem Geschehen verbundene Veränderung gibt. Der Satz vom zureichenden Grund ist eine allgemeine Aussage über die prinzipielle Denkbare der Welt: „Die Welt ist immer und überall unserem Denken adäquat“.¹⁰ Dies muss der Rationalismus fordern, „denn man kann es nur dann unternehmen, eine Naturwissenschaft zu entwickeln, wenn man voraussetzt, dass die Welt der natürlichen Dinge überhaupt irgendwie dem Zugriff des menschlichen Denkens zugänglich ist“.¹¹ Der Verdacht, dass mit dem Grundsatz der Ratio allein die Ursachen der Veränderungen nicht erklärbar sind, bleibt aber bestehen, denn es scheint sich um ein Prinzip zu handeln, welches lediglich eine Aufforderung an die aktuelle Forschung ist, auch das noch Unerklärbare seiner Erklärbarkeit zuzuführen; mit welchen Mitteln dies jedoch geschieht, muss unbestimmt gelassen werden, so dass der Satz vom zureichenden Grund höchstens ein regulatives Prinzip jeder Naturforschung abgeben könnte, aber als *causa efficiens* ausscheidet.

Im fünften Schreiben an Clarke fasst Leibniz seine Raumtheorie sowie seinen Begriff von

⁸[Cassirer 1902], S. 280

⁹Vgl. [Tetens 1987], S. 99: „Jedes physikalische Ereignis findet *per definitionem* ‚in Raum und Zeit‘ statt, und erst über seine räumlichen und zeitlichen ‚Koordinaten‘ kann es überhaupt als *dasselbe* physikalische Ereignis identifiziert werden.“

¹⁰[von Engelhardt 1947], S. 99.

¹¹Ebd.

Bewegung zusammen:¹²

„Zur Bildung der Raumvorstellung gelangt man etwa in folgender Weise. Man beobachtet, daß verschiedene Dinge gleichzeitig existieren und findet in ihnen eine bestimmte Ordnung des Beisammens ... Es ist dies ihre wechselseitige Lage oder Entfernung. Ändert nun eines der Elemente seine Beziehung zu einer Mehrheit anderer Glieder, ohne daß unter diesen selbst eine Veränderung vor sich geht, und nimmt ein neu hinzukommendes eben die Beziehung zu den anderen ein, die das erste hatte, so sagt man, es sei an seine *Stelle* getreten und nennt diese Veränderung eine *Bewegung*, die man demjenigen Element zuschreibt, in dem die unmittelbare Ursache der Veränderung liegt. Der Inbegriff aller ... Stellen wird *Raum* genannt. Es zeigt dies, daß es, um den Begriff der Stelle und folglich des Raumes zu bilden, genügt, diese *Beziehungen* und die *Regeln ihrer Veränderung* zu betrachten, ohne daß man nötig hätte, sich hier eine absolute Realität außer den Dingen, deren Lage man betrachtet, vorzustellen.“

Leibniz wendet sich damit gegen Newton, der in dem Scholium zu den Definitionen in der Einleitung der Principia erklärt hatte, der wahre, absolute Raum bestehe ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand, und seine Teile könnten sinnlich nicht erfasst werden. Leibniz' Raumlehre gründet dagegen im Materialismus. Er lässt als räumliche nur Beziehungen zwischen sinnlich wahrnehmbaren Dingen gelten, während Newton an dieser Stelle ironischerweise einmal der Metaphysiker ist. Trotzdem hat Newton gute Gründe für seine Auffassung vom Raum, der unabhängig von den Dingen und ihren Zuständen existieren soll. Er kann ein dynamisches Mittel angeben, um eine Bewegung gegen den absoluten Raum festzulegen. Es ist nicht so, dass Newton nicht über die Relativität von Bewegungen und über den relationalen Charakter des Raumes nachgedacht hätte. Zu Beginn des Scholiums schreibt er nämlich: „Zeit, Raum und Bewegung sind allen wohlbekannt. Dennoch ist anzumerken, dass man gewöhnlich diese Größen nicht anders als in der Beziehung auf sinnlich Wahrnehmbares auffasst.“ Newton wusste, dass die wissenschaftliche Debatte zu Raum, Zeit und Bewegung am Ende des siebzehnten Jahrhunderts dazu neigte, diese Schemata nur in Bezug auf sinnlich wahrnehmbare Dinge gelten zu lassen. Trotzdem hielt er den Relationalismus in der Raumtheorie und das Relativitätsprinzip in der Bewegungslehre für falsch. Seiner Meinung nach beweist die Existenz der Fliehkräfte den absoluten Raum und den absoluten Charakter beschleunigter Bewegungen. Newton bevorzugt die Demonstration der Verhältnisse bei der Kreisbewegung.

¹²Es handelt sich um den 47. Abschnitt des 5. Briefes an Clarke; siehe [Leibniz 1904], S. 182 ff.

Denken wir uns eine Scheibe allein im Raum in Rotation versetzt, so werden auf der Scheibe Zentrifugalkräfte wirksam. Diese Kräfte können, so Newton, nur verstanden werden, wenn man annimmt, dass die Kreisbewegung eine absolute Bewegung gegen den unsichtbaren absoluten Raum darstellt. Der Newton- Anhänger Clarke führt gegen Leibniz ins Feld, dass hier der Relationalismus Schiffbruch erleide, denn im relationalen Raum müssten mit der Kreisbewegung auch alle Fliehkräfte augenblicklich verschwinden, sobald alle umgebenden Dinge vernichtet würden. In Clarkes fünfter Entgegnung heißt es:

„Man versichert, die Bewegung schlosse notwendig einen relativen Wechsel der Lage eines Körpers mit Bezug auf andere Körper ein - und zeigt dennoch kein Mittel an, die widersinnige Folgerung zu vermeiden, dass die Beweglichkeit eines Körpers alsdann von der Existenz anderer Körper abhängt, dass ein einzelner für sich bestehender Körper also der Bewegung unfähig wäre, und die Teile einer rotierenden Masse, z. B. der Sonne, die Zentrifugalkraft, die aus ihrer Kreisbewegung entsteht, verlieren würden, wenn alle äußere Materie um sie herum vernichtet würde.“¹³

Für Clarke gibt es ein Kriterium für die Realität des absoluten Raumes und der absoluten Bewegung, nämlich die Fliehkräfte, die bei absoluter Rotation auftreten, bei relativer Rotation gemäß dem Raum-Schema von Leibniz dagegen fehlen müssten. Hier haben Newton und Clarke ein Argument zugunsten des absoluten Raumes parat, gegen das Leibniz nichts auszurichten versteht. Er muss gegenüber Clarke zugeben, dass die Auszeichnung einer absoluten Bewegung dynamisch möglich ist, wodurch aber sein ganzer Relationalismus ins Wanken gerät. Hier fehlt Leibniz eben das Machsche Argument, welches allein die Relativität aller Bewegung auch dynamisch verteidigen kann, der Umstand nämlich, dass die Entstehung der Fliehkräfte nicht notwendig einer absoluten Kreisbewegung zugeschrieben werden muss, sondern sich ebenso gut aus der relativen Drehung der Kreisscheibe gegen den Rest der kosmischen Massen (Fixsterne) ergeben kann. Der Relationalismus lässt sich dank des Machschen Arguments gegen die Absoluttheorie von Newton verteidigen, wie die Allgemeine Relativitätstheorie demonstriert.

Newtons Vorstellungen von Raum und Bewegung fußen in seiner Kräftelehre. Die Registrierung einer Trägheitskraft ist Newton ein untrügliches Zeichen dafür, dass eine Bewegung

¹³[Leibniz 1904], S. 219.

gegen den absoluten Raum stattgefunden hat. Und umgekehrt ist ihm eine Kraft die Ursache für eine jenseits des Galileischen Relativitätsprinzips erfolgte absolute Bewegung. In den Definitionen seiner Principia beschreibt Newton die „absolute, wirkliche und mathematische Zeit“ als eine solche, die „ohne Beziehung zu irgendetwas außerhalb ihrer Liegenden“ existiert, während nur die relative Zeit aus der Bewegung gewonnen wird, so wie die Zeitmaße Jahr, Monat, Tag und Stunde aus der Bewegung der Erde hergenommen sind. Es kann kaum zweifelhaft sein, dass der Zeitparameter, den Newton im ersten Axiom der Bewegung zur Formulierung der gleichförmigen Bewegung vor Augen hat, mit dieser absoluten Zeit identisch ist. Denn die eingepprägten Kräfte, die nach dem ersten Newtonschen Axiom den Bewegungszustand des Körpers ändern, scheiden ja auch alle relativen Raum- und Zeitmaße von den wahren oder absoluten, denn Newton beschließt die einleitenden Definitionen der Principia mit den Worten: „Wie man ... die wahren Bewegungen aus ihren Ursachen (das heißt aus den eingepprägten Kräften, R. H.) ... und umgekehrt, wie man aus den wahren oder scheinbaren Bewegungen deren Ursachen und Wirkungen ermitteln kann (wo die Ursachen der wahren Bewegungen Kräfte, die der scheinbaren Bewegung nur relative Ortsveränderungen sind, R. H.), wird im folgenden ausführlicher gezeigt werden. Denn zu diesem Zweck habe ich die folgende Abhandlung verfasst.“¹⁴ Offensichtlich verbaut sich Newton mit dieser Festsetzung der „wahren“ Zeit den Weg zu einer operationalen Definition des Zeitmaßes zur Begründung der Dynamik. Er ist hier Metaphysiker, Leibniz gerade nicht, denn letzterem gelingt es methodisch sauber, „Zeit“ aus dem Begriff der erfahrungsmäßig gegebenen, beobachtbaren Veränderung oder Bewegung abzuleiten.

Während für Newton die Zeit unabhängig und neben dem Raum und den Kräften existiert, ist sie bei Leibniz eine aus den Veränderungen, speziell aus Bewegungen abstrahierte Ordnungsrelation. Und während bei Newton die Kräfte außerhalb von den Dingen sind und als den Dingen „eingepprägte“ Kräfte auf diese wirken, so wie etwa eine Form ein Stück weichen Wachses prägt, so tragen die Dinge bei Leibniz die Ursachen ihrer eigenen Veränderung, insbesondere ihrer Bewegung, mit den Ursachen aber auch die Kräfte in sich. Den Raum als rein begriffliches Ordnungsschema aufzufassen, erfordert einen rein begrifflichen Charakter von Kraft, und das hinter der Kraft stehende begriffliche Prinzip kann wohl nur der Satz vom zureichenden Grund sein. Es ist diese Nuance im Kraftbegriff, welche die Raum- und Zeitlehre dieser beiden Forscher am Ende so unterschiedlich gestaltet. Für Newton ist die Kraft etwas selbst im Raume Befindliches, sie setzt mithin das Vorhandensein des Raumes schon

¹⁴[Newton 1988], S. 52.

voraus; für Leibniz' Kraft genügt die Existenz von etwas Materiellem überhaupt, und sowohl die räumliche als auch die zeitliche Ordnung der Dinge ergeben dann sich aus den Relationen, die mit den Gegenständen gegeben sind.¹⁵

Dass es in der Tat das *principium rationis sufficientis* ist, welches sich im Begriff der Kraft zugleich als ein *in* den Dingen liegendes Prinzip kristallisiert, geht aus dem 1697 entstandenen Text *De rerum originatione radicali* hervor. Leibniz erörtert dort das Problem, nach welcher Regel ein Dasein, ein Zustand oder eine Veränderung als alleinige aus unendlich vielen weiteren Möglichkeiten schließlich zur Realisation gelangt. Auf den ersten Blick trügen sämtliche Möglichkeiten dieselbe Potentialität in sich, aber es müsse notwendig ein Kriterium geben, welches eine Potentialität vor allen anderen bevorzuge und diese zur Verwirklichung bringe. Es ist klar, dass dieses Kriterium mit dem Prinzip des hinreichenden Grundes zusammenfallen muss: Wenn nämlich ein Ding, ein dinglicher Zustand oder eine Veränderung Realität wird, so muss es einen hinreichenden Grund dafür geben. Für Leibniz wird ein hinreichender Grund geliefert vom Extremalprinzip: Dieses der Mathematik entnommene Prinzip räumt eben die Möglichkeit ein, unter unendlich vielen Argumenten unter Beachtung der Nebenbedingungen dasjenige auf eindeutige Weise auszusondern, dessen Funktionswert ein Extremum (das heißt, ein Maximum oder ein Minimum) liefert. Physik im eigentlichen Sinne kommt erst dann ins Spiel, wenn die zu maximierende oder zu minimierende Funktion näher spezifiziert wird denn diese Spezifikation muss durch die Erfahrung geleistet werden. Das Verhalten gekoppelter Massen im Schwerfeld zum Beispiel wird einem Extremalprinzip unterworfen, indem die Schwere als physikalische, erfahrungsmäßig gegebene Größe in die funktionale Beschreibung des Massensystems eingeht. Nur in der reinen Mathematik, speziell in der Geometrie, setzt sich das *principium rationis sufficientis* als empiriefreies, apriorisches Extremalprinzip um; für die konkrete Naturforschung gibt das Prinzip nur die allgemeine und notwendige Form ab, unter der seine inhaltliche Konkretisierung als Extremalprinzip zu geschehen hat.

„Wie wenn es bestimmt ist, ein Dreieck solle erscheinen und kein anderer Grund zur Bestimmtheit beigefügt wird, sich mit Notwendigkeit ein gleichseitiges ergeben wird; oder wie wenn man von einem Punkte zu einem andern hinstreben soll und nichts bestimmt weiter den Weg, der leichteste und kürzeste Weg aus-

¹⁵Vgl. zu dieser Analyse auch die Feststellung Cassirers, dass es sich im Streit zwischen Leibniz und Newton/Clarke um einen grundsätzlichen Konflikt zwischen Denkrichtungen handle: „Newton, der das System und die Methode der Experimentalphysik vertritt, hält zugleich am Begriff des Absoluten fest, während auf der anderen Seite Leibniz das absolute *Sein des Gegenstandes* der Mechanik verwirft, um die notwendige und allgemeine Geltung ihrer *Begriffe* zu sichern.“ ([Cassirer 1902], S. 112)

gesucht wird. So auch, wenn einmal das Dasein dem Nichtsein vorgezogen wird, oder es ist ein Grund vorhanden, weshalb eher etwas existiert als nichts, ... so folgt hieraus, wenn nichts weiter bestimmt ist, mit Notwendigkeit so viel existiert wie nur möglich (...) wie unter allen Winkeln der Rechte ein bestimmter ist in der Geometrie, ... vor allem aber, wie in der gewöhnlichen Mechanik bei mehreren miteinander auf- und absteigenden schweren Körpern schließlich eine solche Bewegung zustande kommt, bei der im ganzen der größte Abstieg zum Vorschein kommt. Wie nämlich alles mögliche mit gleichem Recht zum Dasein strebt im Verhältnis seiner Wirklichkeit, so streben alle Gewichte mit gleichem Recht zum Abstieg nach dem Verhältnis ihrer Schwere, und wie hier die Bewegung herauskommt, in welcher der größte Abstieg des Schweren, so geht dort die Welt hervor, durch welche die größte Erzeugung des Möglichen erwirkt wird. “¹⁶

Interessant ist, dass beim Fehlen jeglicher Nebenbedingungen sich das Extremalprinzip zur Forderung desjenigen Zustandes oder derjenigen Veränderung ausformt, wodurch ein Maximum an weiteren Zustands- oder Entwicklungsmöglichkeiten sichergestellt wird. Das Motiv der maximalen Vielfalt der Welt taucht dann in der Argumentation für die „beste aller möglichen Welten“ in Leibniz’ Theodizee (1710) wieder auf: Die tatsächliche, insbesondere die moralische und vom Menschen zu lebende und gelebte Welt zeichnet sich durch ein Maximum an Buntheit, durch ein Maximum an weiteren Entfaltungsmöglichkeiten aus. Es ist dies der Gedanke, dass mit der Steigerung der Möglichkeiten auch die Freiheit, auf einem Spielbrett den nächsten Zug zu tun, vergrößert wird. Das Extremalprinzip lässt sich noch weiter spezifizieren zu einem Prinzip der maximalen Wirkung bei gegebenem Aufwand:

„Immer nämlich gibt es in den Dingen ein Prinzip der Bestimmung, welches vom Maximum oder Minimum hergenommen ist, daß nämlich die größte Wirkung hervorgebracht werde mit dem kleinsten Aufwande so zu sagen. (...) die Verschiedenheit der Formen ... entspricht der Bequemlichkeit des Geländes und der Vielheit der Zimmer. Und die Sache verhält sich wie in gewissen Spielen, wenn alle Plätze auf einer Tafel auszufüllen sind nach gewissen Regeln, aber wenn man nicht einen gewissen Kunstgriff gebraucht, man ausgeschlossen von den ungünstig gelegenen Plätzen schließlich gezwungen ist, mehr Plätze frei zu lassen, als man wollte und konnte ... “¹⁷

¹⁶Aus der Übersetzung von *De rerum originatione radicali* in [Kneser 1927], S. 8- 9.

¹⁷[Kneser 1927], S. 7- 8. Der Vergleich der Möglichkeitenvarianz mit der „Vielheit der Zimmer“ ist eine Meta-

Letztlich bleibt es aber dabei: Es ist schwierig, Leibnizens Bewegungslehre vom Vorwurf der Zirkularität zu verschonen. Wie nämlich können die für jedes Externalprinzip festzulegenden Randbedingungen ohne räumliche und zeitliche Termini beschrieben werden? Wie soll das „in den Dingen“ liegende Bestimmungsprinzip der Bewegung erkannt werden, wenn nicht durch Naturbeobachtung, die doch erst unter Verwendung eines existierenden Raum- und Zeit- Vokabulars erfolgen kann? Leibniz' Auffassung vom Wesen der räumlichen und zeitlichen Bestimmungen hat aber den Vorzug gegenüber der Newtonschen, dass diese Beziehungen bei Leibniz nicht etwas vom erkennenden Subjekt Unabhängiges sind, sondern dass es im Leibnizschen Sinne ebenso viele Räume und Zeiten (im Sinne von Ordnungsschemata) geben muss, wie es verschiedene Möglichkeiten gibt, ein Beziehungsgeflecht zwischen Gegenständen oder dinglichen Zuständen überhaupt zu konstruieren.

6.3 Die geometrische Charakteristik

Das Fundament von Leibnizens Relationalismus in seiner Naturphilosophie ist seine geometrische Charakteristik. In den schon besprochenen *Initia rerum Mathematicarum metaphysica* formuliert Leibniz als das von ihm schon seit Jahrzehnten verfolgte Ziel dieser nach 1714 entstandenen Abhandlung, den Nachweis zu erbringen, „daß es eine Kunst der Analysis gibt, die umfassender ist, als die Mathematik, und aus der diese gerade ihre ... Methoden entlehnt“.¹⁸ So sei die Algebra eine Anwendung der Kombinatorik auf Quantitäten.¹⁹ Leibniz möchte neben der in der Mathematik bis dahin üblichen Behandlung der Quantitäten - auch die Euklidische Geometrie ist weitgehend eine solche - eine neue Wissenschaft der Qualitäten etablieren, die sich beispielsweise innerhalb der Geometrie als eine Analysis der Lage artikuliert, indem sie die Kombinatorik auf eben jene Qualitäten anwendet. Die Anwendung der Kombinatorik auf reine Qualitäten trägt den Namen „geometrische Charakteristik“. Die Analysis der Lage

pher, die Leibniz als Hauptmotiv in der Kristallpalast- Parabel am Schluss seiner Theodizee verwendet. Die Göttin Pallas- Athene führt dort einen Theodorus durch den Palast der Schicksalsbestimmungen, in dem jedes einzelne Zimmer eine Möglichkeit im Leben des letzten römischen Tyrannen, Sextus, repräsentiert, der sich beim Göttervater Jupiter über das ihm auferlegte Schicksal beklagt, aus Rom in die Verbannung vertrieben zu werden. Die Metapher soll deutlich machen, dass die Welt als Ganze die beste aller möglichen ist, dies jedoch nicht ausschließt, dass das Leben Einzelner unter Umständen schlecht ist, wenn dadurch die Gesamtheit der Welt an Schönheit gewinnt.

¹⁸[Leibniz 1904], S. 53.

¹⁹Ebd., S. 62.

soll eine von allen Größenverhältnissen abstrahierte Wissenschaft der reinen Formen und Beziehungen sein und zugleich neben dem Satz des zureichenden Grundes sowie dem Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren zur dritten Säule der Metaphysik ausgebaut werden.²⁰

Leibniz bemängelt an der analytischen Geometrie des Descartes, dass diese geometrische Konstruktionen und Beweise zwar dem symbolischen Kalkül unterworfen habe, jedoch auch bei bloß qualitativen Aussagen über geometrische Figuren jene Figuren zunächst - mehr oder minder umständlich - in quantitative Größen, nämlich Zahlenverhältnisse, übersetzen müsse, um jene der Rechnung unterwerfen zu können, um sie schließlich wieder in qualitative Beziehungen rückzuübersetzen.²¹ Leibniz möchte die qualitativen Beziehungen sofort dem Kalkül unterwerfen, ohne wie Descartes den Umweg über die Quantitäten zu gehen. Er intendiert eine symbolische Behandlung der Qualitäten, wie sie beispielsweise die geometrischen Lagebeziehungen darstellen. Eine solche Symbolik zu erfinden hält Leibniz für so überaus wichtig, weil der größte Teil der menschlichen Gedanken sich um solche Dinge bewege, die auf keine Weise durch quantitative Größen repräsentierbar seien. Leibniz entpuppt sich auch hier als der große Generalist, der möglichst alle Wissenszweige und alle Gedankenoperationen auf eine einheitliche Methode zu bringen versucht. Er ist zuversichtlich, dass jene „neue, von der Vietaschen himmelweit verschiedene Art der mathematischen Analysis ... nicht nur für geometrische Entdeckungen, sondern vor allem für die Anwendung der Geometrie in der Physik den größten Erfolg verspricht“.²²

Im „Entwurf der geometrischen Charakteristik (1679)“²³ wird die Aufgabe einer zukünftigen geometrischen Charakteristik so umrissen: In ihr könnte man in Zeichen die Beschreibung von beliebig komplizierten Figuren und Maschinen geben. Die Bezeichnungen seien so zweckmäßig gewählt, dass der Geist die Maschinen und Figuren in allen ihren Teilen überblickt, ohne der sinnlichen Anschauung durch Modelle, Skizzen und Figuren zu bedürfen. Wenn eine geometrisch-anschauliche Deutung der Zeichen gewünscht würde, könnte die Übersetzung der Zeichen dennoch jederzeit leicht vorgenommen werden. Eine geometrische Charakteristik ermöglichte es, via Operierens mit den Zeichen Schlüsse zu ziehen, die sonst nur durch umständliche Betrachtungen an den Figuren oder Modellen selbst erzeugt werden könnten.

²⁰Vgl. Cassirers Anmerkung 85) auf S. 133 in [Leibniz 1904].

²¹Leibniz, „Die Elemente der Vernunft“ (1686), in [Leibniz 1951], S. 183- 204; hier S. 195.

²²[Leibniz 1951], ebd. S. 195. Vieta gilt als Begründer der neuzeitlichen, vom geometrischen Gewand der griechischen Größenlehre befreite Algebra, indem er das Rechnen mit Buchstaben einführte und systematisch Symbole für Rechenoperationen benutzte. Gegenstand der Vietaschen Algebra sind Zahlen als quantitative Größen, während Leibniz hier darauf aus ist, auch Nicht-Quantitatives der Rechnung zugänglich zu machen.

²³Übersetzt in [Leibniz 1904], S. 77- 83.

Auf diese Weise würde eine geometrische Charakteristik die Einbildungskraft (*imagination*) entlasten, indem sie mit „selbständig denkenden“ Symbolen arbeitet. Somit ordnet sich die geometrische Charakteristik dem noch allgemeineren Leibnizschen Plan einer allgemeinen Charakteristik unter, einer „genormten“ Vernunftsprache, die es, basierend auf „einer Art Alphabet der menschlichen Gedanken“, erlaubte, „durch die Verknüpfung seiner Buchstaben und die Analysis der Worte, die sich aus ihnen zusammensetzen, alles andere (zu) entdecken und beurteilen (zu) lassen“.²⁴ In einer solcherweise konstruierten allgemeinsten „Stenographie der denkbaren Wahrheiten“ müssten sich alle logischen und erfahrungsmäßigen Urteile allein durch regelkonformen Umgang mit den Buchstaben jenes reinen „Vernunftalphabets“ deduzieren lassen.²⁵

Die Lehre von den reinen Formen konzipiert Leibniz als Verallgemeinerung der geometrisch-anschaulichen Formen. Ähnlichkeit und Gleichheit sind für ihn neben Koinzidenz und Kongruenz die vier fundamentalen Relationen zunächst der Geometrie, dann aber auch der Mathematik als Ganzer. In dem „Quadrivium der Grundrelationen“ nimmt Leibniz eine Hierarchisierung vor; diese geht aus von der Vorstellung, dass die grundsätzliche Unterscheidbarkeit der Dinge „*per se spectata*“ auf dem Begriff der Qualität oder Form beruhe: Geometrische Gegenstände lassen sich für sich allein betrachtet nur unterscheiden hinsichtlich ihrer Form bzw. Figur oder Gestalt; für unanschauliche Gegenstände ist „Form“ auszutauschen mit dem allgemeineren Begriff „Qualität“. Dinge, die sich in diesem voraussetzungslosesten Sinne voneinander unterscheiden, heißen bei Leibniz „*dissimilia*“. Die Form oder Gestalt führt somit auf das grösste Unterscheidungskriterium, das der Ähnlichkeit. Ähnliche geometrische Gegenstände sind zum Beispiel alle gleichseitigen Dreiecke, oder alle Kreise. „Wenn man Dinge nur deshalb für ununterscheidbar hält, weil sie - für sich betrachtet - keinen Qualitäts- oder Formunterschied zeigen, das heißt weil sie für sich, einzeln genommen, nicht unterschieden werden können, so gelangt man zu Klassen von ähnlichen Dingen.“²⁶ Ähnliche Dinge können jetzt zwar nicht mehr für sich, aber durch Nebeneinanderlegen miteinander verglichen werden; dieser Vergleich führt auf den neuen Begriff der Kongruenz, welcher die Gegenstände in nächsthöhere, also feiner strukturierende Klassen einteilt. Aufgrund des Begriffs der

²⁴G.W: Leibniz, „Zur allgemeinen Charakteristik“, in [Leibniz 1904], S. 30- 38; hier S. 32.

²⁵Bemerkenswert ist, dass sich Leibniz in dem Entwurf von 1679 die Option offen hält, auch nicht- sinnliche Gegenstände der geometrischen Charakteristik zu unterwerfen: „Bemerken möchte ich noch, daß ich für möglich halte, die Charakteristik auf Objekte auszudehnen, die nicht der sinnlichen Anschauung unterworfen sind: doch ist dies eine zu wichtige und folgenschwere Frage, als daß ich sie in wenigen Worten erörtern könnte.“ ([Leibniz 1904], S. 83)

²⁶[Schneider 1988], S. 172- 173.

Kongruenz können zwei Kreise nunmehr in ihrer Größe unterschieden werden. Kongruente Dinge, die sich auch nicht mehr durch Vergleich untereinander, also unter Bezugnahme auf ihre Quantität, unterscheiden lassen, können nur noch durch ihre verschiedene Beziehung zu Dingen außerhalb ihrer selbst auseinandergelassen werden. Jene „*referentia ad externa*“ sind das Surrogat des Leibnizschen Raumbegriffs: Die Beziehungen zu anderen Gegenständen machen kongruente Dinge noch voneinander unterscheidbar, und gäbe es keine Unterscheidbarkeit in den Relationen zu etwas außerhalb Liegendem, so wäre überhaupt kein Unterschied mehr konstatierbar. Jede Behauptung eines Unterschiedes wäre nämlich ein Verstoß gegen das Leibnizsche *principium identitatis indiscernibilium*. Die Möglichkeit, kongruente Dinge unter Einhaltung des Prinzips der Identität des Ununterscheidbaren noch als voneinander unterschieden betrachten zu können, ist für Leibniz die Quelle seiner relationalen Raumauffassung, die er später gegen Newtons absolutes Raum vertreten wird. Räumliche Lage ist das, was durch Bezugnahme auf ein *beobachtbares* Drittes als Bezugspunkt erkannt werden kann. Die Beobachtbarkeit des Bezugsgegenstandes ist dabei zwingend erforderlich, wegen des Prinzips der Beobachtbarkeit, welches in diesem Fall mit dem Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren zusammenfällt.²⁷

Scheidet auch das Kriterium der Lageverschiedenheit aus, so liegt der höchste Grad an Übereinstimmung vor, die Koinzidenz. Koinzidente Dinge sind ununterscheidbar: „Im Hinblick auf den Grad der Übereinstimmung sind also *similia* formgleiche, ... *congrua* größen- und formgleiche, *coincidentia* identische mathematische Gegenstände.“²⁸

Zusammengefasst lässt sich sagen: Leibniz hatte den Plan einer Universalsymbolik für sämtliche Bereiche des Vernunftgebrauchs, für Logik, Mathematik, Sprache, für die Naturwissenschaften, ja sogar für Ethik und Morallehre. Die einfachsten Symbole dieses allgemeinsten aller nur denkbaren Kalküle sollten durch Zusammensetzung und Kombination alle durch Vernunftschluss daraus ableitbaren Aussagen ergeben. Speziell für die Geometrie sollte eine geometrische Charakteristik, als eine Anwendung der allgemeinen Charakteristik, die Geometrie auf ein universelles Fundament stellen. Die Leibnizsche geometrische Charakteristik führt als

²⁷Leibniz erläutert das Prinzip der Beobachtbarkeit in seiner fünften Erwiderung auf Clarke anhand des Beispiels der Bewegung: Während Clarke von der Existenz absoluter Bewegungen überzeugt ist und argumentiert, ein gleichmäßig dahinfahrendes Schiff habe eine Bewegung, ohne dass man dies im Innern des Schiffs zu bemerken brauche, entgegnet Leibniz, „daß die Bewegung zwar von der *Beobachtung*, aber keineswegs von der *Möglichkeit der Beobachtung überhaupt* unabhängig ist“. Und weiter: „Bewegung gibt es nur dort, wo eine der Beobachtung zugängliche Änderung stattfindet; ist diese Veränderung durch keine Beobachtung feststellbar, so ist sie auch nicht vorhanden.“ ([Leibniz 1904], S. 188)

²⁸[Schneider 1988], S. 174.

Novum eine eigene Lehre der reinen Qualitäten ein, die aus allen reinen Lagebeziehungen der geometrischen Gegenstände besteht und von der sonst so bevorzugten geometrischen Analyse der Quantitäten absieht. Auf diese Weise formuliert Leibniz als Erster explizit das Konzept der Ähnlichkeit von Figuren und Formen. Euler hat später Leibniz im Sinne der heutigen Graphentheorie, eines Teilgebiets der diskreten Topologie, interpretiert und in der Erkenntnis des rein qualitativ-topologischen Charakters des „Königsberger Brückenproblem“ dasselbe einer Lösung zugeführt.²⁹ H. Graßmann hat noch später Leibnizens geometrische Charakteristik als einen Kalkül interpretiert, in welchem die Lage von Punkten, ohne die Größe von Linien und Winkel, das heißt ohne quantitative geometrische Eigenschaften zu benutzen, unmittelbar durch Symbole bezeichnbar und durch Rechnung mit jenen Symbolen zu bestimmen sind. Graßmann hat den Leibnizschen Vorschlag als Idee einer Rechenbarmachung von Strecken, Flächen und dergleichen, unter Verwendung einer bestimmten Symbolik und einer Algebra dieser Symbole, verstanden und auf diesem Wege die Vektorrechnung erfunden, die sich seitdem zu einem mächtigen Kalkül in den affinen und projektiven Geometrien entwickelt hat.³⁰ Die Hierarchisierung der geometrischen Relationen führt Leibniz zu einem Stufenaufbau der geometrischen Ununterscheidbarkeit von der Ähnlichkeit über die Kongruenz zur Koinzidenz. Auf diese Weise nimmt Leibniz den Stufenaufbau der Geometrie des Erlanger Programms von Felix Klein (1872) vorweg. Da die Kombinatorik das unhintergehbare Schema aller Distinktion abgeben soll, geschieht die Unterscheidung von Kongruenz und Koinzidenz durch eine Bezugnahme auf ein Drittes: Kongruente Gegenstände sind koinzident, wenn sie in Bezug auf ein Äußeres als in verschiedener Lage erkannt werden können. Hieraus resultiert Leibnizens relationale Raumauffassung.

Es wurde oben festgestellt, dass Leibniz das Konzept der Ähnlichkeit in die Geometrie eingeführt hat. Ähnlich (*similis*) sind bei ihm zwei geometrische Figuren, wenn sie, für sich betrachtet (*per se spectata*), nicht unterschieden werden können. Demnach wären im Leibnizschen Sinne auch zwei spiegelverkehrte Gegenstände, etwa eine linke und eine rechte Hand, *similia*, denn eine Unterscheidung ist erst dann möglich, wenn das Händepaar auf ein links- oder rechtsorientiertes Achsenkreuz bezogen wird. Insbesondere formgleiche Dinge sind in dieser Definition ähnlich; dieser Spezialfall des Leibnizschen *similis* ist der heute in der Geometrie gemeinte Sinn des Begriffs „Ähnlichkeit“. Ähnliche Figuren sind bei Leibniz die im größten Unterscheidungskriterium zusammenfallenden Dinge. Weitere Verfeinerungen der

²⁹Vgl. [Sachs 1989].

³⁰Siehe [Graßmann 1847].

Unterscheidbarkeit ergeben sich in der schon von Euklid eifrig benutzten Kongruenz, und schließlich in der Koinzidenz, also in der Lageidentität („Gleichstelligkeit“ oder „Gleichörtlichkeit“). Die durch die verschiedenen Grade der Unterscheidbarkeit gegebene Abstufung der Identitäts-Relation hatte einen bestimmten ihr zugewiesenen Platz in Leibnizens Philosophie einer allgemeinen Kombinatorik der rational begreifbaren Eigenschaften der Welt. Insbesondere plante Leibniz eine Anwendung jener Kombinatorik auf Naturwissenschaften und Physik. Leibnizens relationale Raum-Zeit-Lehre entsprang einem kombinatorischen Grundansatz. Nunmehr lässt sich der Leibnizsche Relationalismus in einem wichtigen Punkt verschärfen und zugleich Leibnizens Raumtheorie von einer Inkonsistenz befreien. Leibniz hatte im fünften Schreiben an Clarke die Entstehung der Raumvorstellung analysiert und bemerkt, dass wir von einer Ordnung des Beisammes, genauer von einer Ordnung der wechselseitigen Lage oder Entfernung ausgehend zur Vorstellung des Räumlichen gelangen würden. Die Beschränkung der Ordnung des Beisammes auf eine solche der wechselseitigen Lage oder Entfernung ist aber ganz unnötig. Denn erstens erfordert der Begriff der Ordnung keinen Rekurs auf den geometrischen, genauer den bewegungsgeometrischen Terminus „Entfernung“: Die allgemeine Charakteristik soll ja ausdrücklich eine Anwendung der Kombinatorik auch auf nicht-geometrische Gegenstände möglich machen. Verwandtschaftsverhältnisse ergeben eine andere Ordnung zwischen Menschen als ihr momentaner Aufenthaltsort. Auch die Heisenbergsche Matrizenalgebra ist eine andere Art des Kombinierens von Übergangsamplituden als die korrespondenzmäßige Approximation von Spektrallinienintensitäten im Bohr-Sommerfeldschen Rechenverfahren, welches noch mit Elektronenbahnen und Elektronengeschwindigkeiten operierte. In letzterer Theorie wurden Quantenbedingungen für gewisse dynamische, mithin raumzeitliche Variablen aufgestellt und „kombiniert“, während in Heisenbergs Theorie der umgedeutete Summensatz die Rolle der Quantenbedingung übernimmt, wobei der Summensatz ursprünglich keine dynamische Gesetzmäßigkeit, sondern eine raum- und zeitfreie Korrelation zwischen den spektralen Übergangsamplituden darstellte. Erst unter den Händen von Born und Jordan wurde der Thomas-Kuhnsche Summensatz zu einer matrizenalgebraischen Beziehung zwischen den nunmehr als Matrizengrößen erscheinenden dynamischen Variablen Ort und Impuls.

Vermutlich ohne von seinem philosophischen Vorgänger zu wissen, stellte Felix Klein in seinem Erlanger Programm von 1872 eine Systematik der verschiedenen Geometrien nach den ihnen zu Grunde liegenden Transformationsgruppen auf. Das neunzehnte Jahrhundert war durch eine Explosion des geometrischen Wissens gekennzeichnet, und je umfangreicher dieser

Wissensbestand war, umso dringlicher erwuchs daraus die Notwendigkeit einer Systematisierung. Der Franzose Poncelet hatte im ersten Drittel des Jahrhunderts die projektive Geometrie begründet, die dann bis zur Jahrhundertmitte stürmisch ausgebaut worden war, bis schließlich der irische Mathematiker A. Cayley bis zu dem Standpunkt vorstieß, dass die projektive Geometrie alle anderen Geometrien umfasst: Beziehe man die Figuren und Beziehungen der projektiven Geometrie auf einen als „Absolutes“ ausgezeichneten projektiven Kegelschnitt, im Falle der metrischen Geometrie auf den sogenannten imaginären Kugelkreis, so erhalte man die Aussagen der gewöhnlichen Euklidischen Geometrie. In diesem Sinne fasste Cayley sein Resultat so zusammen (was Cayley als „descriptive“ Geometrie bezeichnete, meint die projektive Geometrie):

„... the metrical properties of a figure are not the properties of the figure considered *per se* apart from everything else, but its properties when considered in connexion with another figure, viz. the conic termed the Absolute. (...) Metrical geometry is thus a part of descriptive geometry, and descriptive geometry is *all* geometry.“³¹

Die Aussage, dass die metrische Geometrie Teil der projektiven Geometrie sei, bedeutet nicht, dass jede Aussage der metrischen Geometrie auch ein Satz der projektiven Geometrie sein müsse, sondern genau umgekehrt: Jede Aussage der projektiven Geometrie (sofern sie nicht auch die so genannten „unendlich fernen“ Punkte betrifft) ist zugleich eine wahre Aussage im System der metrisch-euklidischen Geometrie. Das Enthaltensein-In betrifft die geometrischen Transformationsgruppen: Jede euklidische Transformation ist gleichzeitig eine projektive Transformation, so dass jede Projektiv-Invariante auch eine metrische Invariante ist. Und dies ist kurz gesagt der Inhalt des Erlanger Programms: Jede Geometrie ist die Invariantentheorie bezüglich einer vorgegebenen Transformationsgruppe. Dieses ist zugleich der Sinn des Leibnizschen Ähnlichkeitsbegriffs: Zwei Dinge sind ununterscheidbar immer relativ zu einem vorgegebenen Ähnlichkeitsbegriff; ob man nun von der Ähnlichkeit als Äquivalenzrelation, oder von der ihr entsprechenden Gruppe von Ähnlichkeitsabbildungen ausgeht, kommt auf dasselbe hinaus.

Die feineren Unterscheidungsmöglichkeiten, welche die euklidische Geometrie bietet (in ihr kann neben der Inzidenz und der Parallelität auch von Abständen und von Winkeln gesprochen werden), werden im System der projektiven Geometrie, die sich lediglich mit der Inzidenz von

³¹[Cayley 1859], S. 592.

Geraden und Punkten beschäftigt, dadurch ermöglicht, dass die Figuren auf einen Kegelschnitt außerhalb bezogen werden. Wie deutlich erblickt man hinter den Ausführungen Cayleys die Leibnizsche Idee, dass geometrische Dinge erst dann auf feinere Weise unterscheidbar sind, wenn sie auf ein Anderes außerhalb ihrer selbst bezogen werden!

6.4 Perspektivismus und Wissen

Horst Bredekamp hat in einem 2004 erschienenen Buch über die Rolle des Visuellen in der Erkenntnistheorie von G. W. Leibniz die nicht selbstverständliche These aufgestellt, Leibniz habe zeitlebens die Intuition gegen eine ihre Befugnisse überschreitende Kalkülisierung verteidigt. Er versucht in [Bredekamp 2004] zu widerlegen, dass die Philosophie von Leibniz ausschließlich „einer inneren Logik gehorcht, die sich gegenüber der Außenwelt und ihren haptischen und visuellen Ereignissen abschirmt“.³² Leibniz habe gewusst, „das zum Denken Verkörperlichungen gehören“³³, und „Leibniz zufolge gibt es keinen noch so abstrakten Gedanken, der ‚nicht von materiellen Bildern oder Spuren‘ begleitet worden wäre.“³⁴ Bredekamp knüpft seine Betrachtungen an die Zeichnung eines Strumpfbandknotens, den Leibniz 1685 am Rande eines Textes skizziert hatte. Bredekamp zufolge wirke die Skizze „zunächst wie ein Scherz, aber die Erläuterung dieses Gebindes, die in atemberaubender Geschwindigkeit zu fundamentalen Fragen der Erkenntnistheorie gelangt“, zeige, „daß Leibniz den Knoten im Sinne einer Tradition anführt, die von der Antike bis zu jener theoretischen Kosmologie der Gegenwart reicht, die das Universum als geknotete und in sich eingefaltete Räume begreift.“³⁵ Leibniz gehe es hier um die Unterscheidung von undeutlicher und deutlicher Erkenntnis. Eine *deutliche* Erkenntnis werde laut Leibniz erreicht, indem die Formen und Eigenschaften einer Sache gekennzeichnet würden. Indem etwa der Münzmeister das Gold durch Zahl, Größe und Bezeichnung von anderen Edelmetallen unterscheidet, erzeuge er einen *deutlichen Begriff* seines Gegenstandes.³⁶ Da Leibniz geglaubt habe, dass an der Fähigkeit zum Wissen und Handeln alle Sinne beteiligt seien, sei - so interpretiert Bredekamp einen 1675 von Leibniz angefertigten Plan zum Bau eines Theaters der Kunst und der Natur - Leibniz zu einem

³²[Bredekamp 2004], S. 11.

³³[Bredekamp 2004], S. 194.

³⁴Ebd., S. 21.

³⁵Ebd., S. 12.

³⁶Ebd., S. 13.

Verfechter einer Pädagogik des Intuitiven geworden, und damit konterkarriere Leibniz die einseitige Interpretation seiner Philosophie als eine rein rationalistische.

Wenn Bredekamp feststellt, dass sich der schöpferische Prozess des Denkens gestalteter Zeichen bedienen müsse³⁷, so scheint dadurch eine Front aufgebaut zu werden nicht nur gegen die übliche Lesart der Leibnizschen Erkenntnistheorie, sondern gegen eine seit langem geübte Praktik der Präsentation mathematischer Theorien. Das Problem wird auf den Punkt gebracht durch das von Gauß verfochtene Vorgehen, alle Hinweise, die zur Genese der Theorie geführt haben, zu tilgen, und die fertige Theorie gleichsam wie ein Bauwerk zu publizieren, bei dem man nach Beendigung der Bauarbeiten das Gerüst weggerissen hat. Dieser oft beklagte pädagogische Mangel bei mathematischen Aufsätzen liegt begründet in dem Misstrauen der Mathematiker gegenüber einem nur heuristisch Anschaulichen, vor dem Unfertigen, noch nicht systemisch Ausgegorenen. Aus dieser Praktik der Mathematiker könnte der Schluss gezogen werden, dass es einem rationalisierbaren Wissen nicht darauf ankommt, auf welchem Wege man die formal-logischen Beziehungen aufgedeckt hat. Es würde eben nur auf die Absicherung der hergestellten Beziehungen durch formale Mittel ankommen. Ein charakteristisches Beispiel ist Gauß' Entdeckung der Invarianz des Krümmungsmaßes: Zu der Zeit, als er seine Abhandlung zur Flächentheorie („Disquisitiones generales circa superficies curvas“)³⁸ ausarbeitete, war er gleichzeitig betraut mit der Vermessung des Königreichs Hannover. Da die Menschheit zu dieser Zeit noch keine Möglichkeiten hatte, die Gestalt der Erde aus der Perspektive eines Flugzeugs oder Satelliten zu erfassen, war es ein Gebot der Praxis, eine Krümmungsformel zu finden, in welcher nur intrinsische, das heißt auf der Erdoberfläche durchführbare Messungen verwertet werden. Gauß konnte 1827 tatsächlich eine derartige Formel für das seitdem nach ihm benannte Krümmungsmaß einer zweidimensionalen gekrümmten Fläche anzugeben. In der zitierten Flächenabhandlung verliert Gauß allerdings kein Wort über seine geodätischen Arbeiten, die er zur selben Zeit durchführte. Und auch der weitere Ausbau der Gaußschen Krümmungstheorie durch Bernhard Riemann, der ein Analogon zur zweidimensionalen Gauß-Krümmung für beliebig-dimensionale Räume fand, ja, die ganze Riemannsche höherdimensionale Betrachtungsweise schien eine konsequente Negierung der zweidimensionalen Heuristik zu betreiben. Überdeutlich wird hier, dass die Mathematik ihre Gegenstände aus einer Ebene des anschaulich Gegebenen herausnimmt und in ein Gefüge logisch-formaler Beziehungen hineinstellt. Die mathematische Methode nimmt hier gleich-

³⁷[Bredekamp 2004], S. 86.

³⁸[Gauß 1827].

sam eine *metababasis eis allo genos* vor. Man kommt hier in den Bereich von E. Cassirers Philosophie der symbolischen Formen. Die „symbolischen Formen“ oder Schemata, die der Geist zur Ergreifung des Wirklichen einsetzt, sind nach Cassirer disparat und nicht ineinander transformierbar. Mythos, Sprache, Religion, Kunst und Wissenschaft bauen von unterschiedlichen Richtungen des menschlichen Geistes aus die Kultur auf. Die Hierarchie der Kulturstufen sei rein chronologisch zu verstehen, niemals wertend, da etwa die Kunst ganz andere Zwecke verfolge als die exakten Wissenschaften, wenn sie in ihrer Methode die Welt formten. Was bei Bredekamps Analyse der Leibnizschen Unterscheidung zwischen undeutlicher und deutlicher Erkenntnis noch wesentlicher ist als Cassirers Unterscheidung der verschiedenen kulturellen Vermögen ist die vorkulturelle Stufe. Wenn es richtig ist, dass die Kultur die Demarkationslinie zwischen Mensch und Tier bildet, und wenn die Kulturformen Ausdrucksweisen des menschlichen Geistes sind, sich der Natur oder der Welt zu bemächtigen, so kann dem Menschen als Kulturwesen kein ungebrochener Weltzugang mehr unterstellt werden. Das Tier, vielleicht noch das Kleinkind, haben keine symbolische Erkenntnis; ihre Wirklichkeit ist eine unreflektiert-direkte, die Dinge sind einfach das, als was sie erscheinen. Erst der menschliche Geist hat die Fähigkeit, Wahrgenommenes gedanklich zu brechen und zu vervielfältigen. Tiere und kleine Kinder können weder hinter eine Wand blicken noch etwas über die Rückseite des Mondes wissen. Wenn ein Vater hinter einer Tür hervorspringt, ist es dem Kinde, als wäre der Vater vom Nichtsein ins Sein übergegangen. Dem Kind fehlt eben ein Bewusstsein für ein Permanenzgesetz, das die Existenz des Vaters auch im Zustand des Nicht-Gesehenwerdens sichert. Das Sein des Vaters ist eine geistige Konstruktion, die das Kind erst erlernt. Ohne die Möglichkeit von Permanenzgesetzen wäre die Naturwissenschaft undenkbar, beruht sie doch zu einem guten Teil auf Erhaltungsprinzipien, von denen die Substanzerhaltung ein wichtiges Beispiel abgibt. Es stimmt zwar, wenn Kant die Substanz als das Beharrliche im Wechsel der Erscheinungen definiert, aber noch präziser scheint die Formulierung zu sein: Die Substanz gibt dem Wechsel der Erscheinungen ein System dadurch, dass sie eine Überblickung aller wechselnden Perspektiven ermöglicht. Tier und Kind verfügen zwar über das Unmittelbare, aber nicht über das Identische. Der Begriff der Identität benötigt zu seiner Formulierung die Erfahrung des Wechsels und seine geistige Verarbeitung. Andernfalls wäre jede Identitätsbestimmung bedeutungslos.

Tier und Kleinkind haben eine deutliche Erkenntnis insofern, als ihnen die Dinge noch genau das sind, als was sie erscheinen. Jetzt tritt aber der kulturell erwachsen werdende Mensch als ein *homo faber*, als ein weltveränderndes und in die Welt eingreifendes Wesen, auf. Im Han-

deln schafft und festigt sich die Mittelbarkeit der Welt.³⁹ Die Eindeutigkeit der Dinge ist zum ersten Mal aus dem Gleichgewicht gebracht, da die Gegenstände eine Spaltung und Vervielfältigung erfahren: Ein Stein ist nicht mehr allein nur ein Stein, sondern einerseits ein Kiesel in einem Bach, andererseits potentieller Rohstoff zur Herstellung einer Axt. Auf der handwerklichen Kulturstufe kann die Eindeutigkeit der Dinge wiedergewonnen werden durch die Bindung an einen Zweck, den sie erfüllen sollen: Eine Axt ist genau das, was die Möglichkeit gibt, Holz zu spalten. Oder wenn der Münzmeister das Gold als Zahlungsmittel einsetzt, gibt er eine deutliche Erkenntnis des Goldes als Münze, indem die Münze von ihrem Zweck als Zahlungsmittel her definiert wird. Freilich ist die Ursprünglichkeit des Goldes, wenn es vorher auf dem Grund eines Flusses lag, verloren gegangen, und keine Kulturstufe, weder die handwerkliche noch die technische oder wissenschaftliche, ist in der Lage, diesen Verlust wett zu machen. Denn der Mensch entwickelt immer verfeinerte Methoden zur Ergreifung der Wirklichkeit. Wissenschaft hat die Tendenz, die Gegenstände ins Unendliche zu vervielfältigen, indem sie einen Gegenstand dadurch immer näher zu bestimmen sucht, dass immer weitere Beziehungen zu anderen Gegenständen herzustellen versucht werden. Ein Elektron wird nicht mehr dadurch erkannt, dass es zum Mittel für bestimmte Zwecke erklärt wird. Es hat prinzipiell unendlich viele Bestimmungen, denen der Physiker, der Chemiker, vielleicht auch der Biologe auf die Spur kommen kann. In der Mathematik ist es genauso: Jeder mathematische Begriff hat im Prinzip Verknüpfungsmöglichkeiten mit unbegrenzt vielen anderen mathematischen Begriffen. Die Vervielfältigung ist aber nur möglich geworden dadurch, dass der Gegenstand aus seinem ursprünglichen Wirkzusammenhang herausgenommen und mit Hilfe der mathematischen Symbolik in diejenige geistige Ebene hineingestellt wurde, die erst das Ausgreifen des Gedankens möglich macht. Nur für die vorkulturelle Stufe darf gesagt werden, dass die Gegenstände des Bewusstseins *res ipsas* sind, das heißt Dinge, die „es nicht ‚nötig‘ haben, in Zeichen repräsentiert zu werden“⁴⁰.

Die Mathematik ist ein sehr instruktives Anwendungsfeld für die Mittelbarkeit der Erkenntnis und zugleich für die Überwindung jener Mittelbarkeit im Perspektivismus: Sie versucht nämlich, durch die Einnahme eines übergeordneten Standpunktes alle Einzelsichten auf ihre Gegenstände zu systematisieren und dadurch zusammenzufassen. Eine solche Systematik der einzelnen Betrachtungsweisen in der Geometrie bietet das Erlanger Programm von Felix

³⁹E. Cassirer, „Form und Technik“ (1930); in: [Cassirer 1985], S. 39- 91; hier S. 61.

⁴⁰Vgl. [Bredenkamp 2004], S. 107. Bredenkamp macht sich für eine Lesart des weiter unten zu besprechenden Pariser Gedankenscherzes stark, wonach der spielerische Umgang mit den Dingen auch einen unmittelbaren Zugang zu ihnen eröffne.

Klein.⁴¹ Klein gelang es 1872, mit Hilfe der Invariantentheorie eine Scheidung und Systematisierung aller bis dahin bekannten Geometrien durchzuführen. Vor dem Erlanger Programm war man oft unsicher, welchen Charakter ein bestimmter geometrischer Satz hatte. Das neunzehnte Jahrhundert hatte eine Vielzahl von neuen Geometrien hervorgebracht, als wichtigste davon die projektive Geometrie, die nichteuklidischen Geometrien und die Topologie. Man erkannte allmählich, dass es Aussagen gab, die sowohl in der euklidischen als auch in den nicht-euklidischen Geometrien ihre Gültigkeit behielten, während andererseits das Parallelenaxiom nur für die euklidische Geometrie weiter Gültigkeit behaupten konnte. Oder es gab Aussagen über Lagebestimmungen, die zugleich topologisch als auch projektiv galten, während es in der projektiven Geometrie weiterhin der Begriff der Geraden gab, nicht jedoch in der noch allgemeineren Topologie. Klein entwickelte ein Abhängigkeitsverhältnis zwischen den verschiedenen Arten von Geometrien. Damit ging eine Hierarchisierung einher, indem die euklidische Geometrie als ein Teilgebiet der projektiven Geometrie und letztere als ein Teil der Topologie erkannt wurde: Jede topologische Aussage ist auch projektiv wahr, und jeder projektive Satz behält seine Gültigkeit in der euklidischen Geometrie. Um dies zu erkennen, bediente sich Klein des Begriffs der geometrischen Transformation: Projektiv sind alle (in Koordinaten hingeschriebenen) Aussagen, die gegenüber projektiven Transformationen invariant bleiben. Umfassender sind die topologischen Abbildungen, bei denen es sich um die allgemeinsten stetigen und eineindeutigen Abbildungen einer Punktmenge auf sich handelt, da stetige Abbildungen nicht notwendig Geraden in Geraden abbilden, so dass die projektiven Zusammenhangsverhältnisse durch topologische Transformationen in Mitleidenschaft gezogen werden können. Das Erlanger Programm definiert eine Geometrie als Gesamtheit aller Invarianten gegenüber einer vorgegebenen Transformationsgruppe. Invariantentheoretisch lässt sich Kleins Ergebnis dann so ausdrücken, dass jede topologische Invariante zugleich eine projektive Invariante ist, aber nicht umgekehrt. Oder: Jede Aussage über einen Kegelschnitt, der bei projektiver Transformation ungeändert bleibt, ist eine projektive Invariante, also eine projektive Eigenschaft des Kegelschnitts, nicht zugleich aber eine euklidische. Da es zum Beispiel in der projektiven Geometrie noch nicht den Begriff des Abstandes gibt, kann auch nicht vom Durchmesser eines Kegelschnitts gesprochen werden; daher gibt es in der projektiven Geometrie nur einen einzigen Kegelschnitt: Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel sind projektiv nicht unterscheidbar. Metaphorisch gesprochen leistet die projektive Geometrie die Zusammenfassung der Kegelschnitte dadurch, dass es ihr gelingt, einen gemeinsamen Kegel

⁴¹[Klein 1872].

durch alle euklidisch unterscheidbaren Kegelschnitte zu legen.

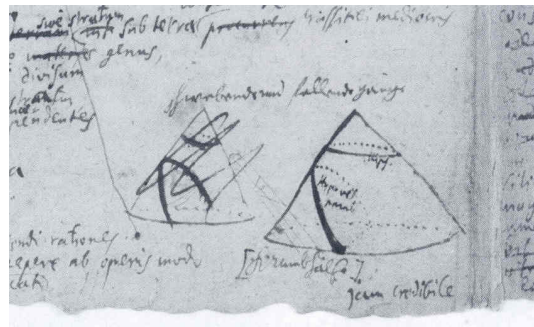


Abbildung 6.1: Kegelschnittsskizze von Leibniz ([Bredekamp 2004], S. 126, Abb. 58)

Die Invariantentheorie versucht offenbar, eine Einheitlichkeit vormals disparater geometrischer Blickwinkel herbeizuführen. Die Eindeutigkeit in Form der kindlichen Unmittelbarkeit kann nicht wiedergewonnen werden, aber immerhin eine symbolisch vermittelte Eindeutigkeit, die durch Zuhilfenahme eines abstrakten mathematischen Kalküls, der Gruppen- und Invariantentheorie erzeugt wird. Das ist der Sinn der Leibnizschen *ars charakteristica*: Auf symbolischer Ebene eine zunächst verloren gegangene Eindeutigkeit der Dinge wiederherzustellen. Der in der allgemeinen Charakteristik ausgearbeitete Ähnlichkeitsbegriff ist ein Vorläufer der Idee des Erlanger Programms, da Leibniz die Ähnlichkeit zweier Gegenstände abhängig macht von den zur Verfügung stehenden Unterscheidungsmitteln. In moderner mathematischer Terminologie macht Leibniz nichts anderes, als mit seinem Ähnlichkeitsbegriff eine Isomorphie nach unterschiedlichen Transformationsgruppen zu definieren. Bredekamp sagt über die *ars charakteristica*, sie verfehle „die Richtung, in der die intuitive Klarheit des auf einen Blick begreifenden Gottes zu finden“ sei. Die invariantentheoretische Lesart der Leibnizschen Charakteristik führt dagegen auf keinen Gegensatz zwischen Kalkül und Intuition, insofern es um ihr gemeinsames Ziel, die Erzeugung einer Eindeutigkeit der Dinge, geht. Der Perspektivismus in Leibnizens Kegelschnittstudien kann, wenn auch möglicherweise nicht historisch streng belegbar, so doch vom systematischen Standpunkt aus angemessen als eine Anwendung des Ähnlichkeitsbegriffs der *ars charakteristica* auf die Gegenstände der euklidischen Geometrie interpretiert werden. Der Perspektivismus wäre für Leibniz dann in letzter Instanz ein Werkzeug der Ratio, kein außerhalb von ihr stehendes, separates Vermögen des Visus.

Dem widerspräche auch nicht der von Bredekamp als Hauptargument für seine These des „sehenden Leibniz“ ins Feld geführte Leibniz-Text „*Drôle de Pensée, touchant une nouvel-*

le sorte de represenatations“ von 1675. Leibniz verfolgte mit jenem Aufsatz „eine Reform der Wissenschaften, die auf das Spiel und das Vergnügen setzte“⁴², indem er ein Theater der Kunst und der Natur anregen wollte, in dem es allerlei Schauspiele und Darbietungen, Kartenspiele und Taschenspielertricks, Ausstellungen und Vorträge hätte geben sollen.⁴³ Leibniz imaginierte beispielsweise ein Schattentheater, um durch spielerischen Umgang mit Licht und Schatten neue Einsichten in die Gesetze der Perspektive zu ermöglichen. Desweiteren sah Leibniz’ Plan vor, die menschlichen Leidenschaften nicht als Hindernis, sondern als Vorbedingung allen Agierens und Lehrens in Rechnung zu stellen.⁴⁴ Das Spiel mit den Dingen lässt neue Beziehungen zwischen diesen erkennbar werden, oder es organisiert das neue Material für den ordnenden Denkprozess, welches die Ratio aus sich selbst nicht erzeugen kann.⁴⁵ Wissenschaftlich wird eine neue Einsicht jedoch nur dadurch, dass sie in das bestehende Beziehungsgefüge integriert wird, was stets an methodologische Bedingungen gebunden ist.⁴⁶ Andernfalls verwandeln sich wissenschaftliche Weltbilder. Neue Beziehungen und zusätzliche Dinge, die zu den vorhandenen hinzukommen, bilden die Vervielfältigung der Dinge, die ein Bedürfnis des Kulturwesens Mensch ist. Die intuitive Klarheit, die kindliche oder tierische Unmittelbarkeit, kann von dem Menschen als Kulturwesen jedoch nicht wiedererlangt werden, aber der Ähnlichkeitsbegriff der allgemeinen Charakteristik kann immerhin eine Eindeutigkeit auf der Ebene der *Ratio* in Angriff nehmen.

Der mathematische Geist schafft sich ein Werkzeug, um die von ihm zunächst vollzogene

⁴²[Bredenkamp 2004], S. 48.

⁴³Eine Übersetzung des *Drôle de Pensée* findet sich am Schluss von [Bredenkamp 2004], S. 237- 246.

⁴⁴[Bredenkamp 2004], S. 62.

⁴⁵Vgl. B. Russell in „Mysticism and Logic“: „Reason is a harmonizing, controlling force rather than a creative one. Even in the most purely logical realm, it is insight that first arrives at what is new.“ (The collected papers of B. Russell (Ed. John G. Slater), Vol. 8 (The philosophy of logical atomism and other essays 1914- 1919), S. 37).

⁴⁶Felix Klein war zwar ein Gegner der von G. Peano vertretenen Tendenz, die Mathematik zu logifizieren und von allen Anschauungselementen zu befreien. Dazu hatte die Peanoschule eine besondere Formelsprache entwickelt, um das Hineinspielen nicht logischer Elemente, die sich „infolge der zahlreichen Assoziationen, die sich unwillkürlich an die uns geläufigen Worte knüpfen“, zu verhindern ([Klein 1925], S. 248). Klein vermutete - wohl zu Recht -, dass die Elimination jeglicher Anschauung überhaupt nicht möglich sei, „denn auch die Peanoschen Symbole bringen als solche noch einen Rest anschaulicher Elemente in sein System“ ([Klein 1925], S. 249). Auf der anderen Seite kritisierte Klein Schopenhauers Ablehnung des in der Mathematik üblichen logisch- deduktiven Beweisverfahrens, der nie zur *inneren Erkenntnis* der Wahrheit führe. Schopenhauer wollte die Intuition an die Stelle der Logik setzen. Dazu schrieb Klein: „Kein Mathematiker wird Schopenhauer ... beistimmen können, denn mag man der Anschauung in der Mathematik auch eine noch so große Rolle als heuristisches, die Wissenschaft förderndes Prinzip zuschreiben, schließlich wird doch als letzte allein entscheidende Instanz immer wieder der von den Voraussetzungen ausgehende logische Beweis eintreten müssen.“ ([Klein 1925], S. 257)

Spaltung seiner Gegenstände zu überwinden. Freilich sind die Geschütze, die aufgefahren werden müssen, um eine beinahe bodenlose Vervielfältigung aufzufangen, entsprechend komplex. Das spiegelt sich in der Physiker- Suche nach „Weltformeln“ wieder: Der mathematische Begriffsapparat muss umso komplizierter sein, je mehr Phänomene mit einer einzigen Formel erfasst werden sollen. Die Eindeutigkeit ist keine intuitive mehr, sondern das Ziel einer gedanklichen Arbeit. Der Kalkül, sei es der Leibnizsche Ähnlichkeitsbegriff der *ars characteristica*, sei es die Gleichheit im Sinne einer Transformationsgruppe, erzeugt - metaphorisch gesprochen - den Kegelschnitt, welcher der übergeordneten intuitiven göttlichen Schau entspricht. Vor jeder Invariantentheorie steht jedoch das mathematische Verfahren der Begriffsspezifikation und der fortgesetzten Verfeinerung, weil die Geistesarbeit beherrscht wird von der Überzeugung, dass die Verfügungsgewalt über einen Gegenstand umso größer ist, je mehr Eigenschaften desselben aufgedeckt werden können. Der Kalkül ist kein Widerspruch zur göttlich- kindlichen intuitiven Schau, sondern das einzige Mittel, das dem *homo mathematicus* zur Verfügung steht, um die Eindeutigkeit durch Unmittelbarkeit in eine Eindeutigkeit durch Symbolik zu verwandeln.⁴⁷ Die Ratio hat letztlich nicht Zerstörung der Unmittelbarkeit im Sinn, sondern Kompensation der ihr eigenen Mittelbarkeit.

Im Handwerk sind Axt, Hammer, Sichel als Gegenstände bestimmt, insofern sie *zu* etwas bestimmt sind. Der Schritt vom Anfertigen eines Dinges als Werkzeuges zu einer Lehre oder gar Theorie dieses Dinges kann nur durch einen Sprung erfolgen. Wissen, als ein System argumentativ verteidigbarer Aussagen, kann durch alleinigen Rückgriff auf „das Reale“ nicht mehr kontrolliert werden. Wenn Handwerk und Technik bestimmte Zwecke verfolgen, die von der Wissenschaft nachweislich nicht zur Disposition gestellt werden können (dass es solche Zwecke gibt, ist eine zentrale These des methodischen Kulturalismus), dann wäre sprachliches Wissen zumindest teilweise noch durch ein Handlungsfolgenwissen einholbar. Es ist eine Schwierigkeit der Cassirerschen Kulturphilosophie, dass sie die verschiedenen Ausprägungen der Kultur recht disparat nebeneinander stellt, so dass man sich nicht leicht vorstellen kann, wie Cassirer antworten würde, wenn er gefragt würde, wie es kommt, dass die Sätze der Mathematik und der theoretischen Physik auf der Ebene der Technik und sogar des Handwerks Anwendung finden. Das Anwendungsproblem kommt in Cassirers Kulturtheorie zu

⁴⁷Leibniz sähe es wohl ähnlich wie der Ich- Erzähler in Heinrich von Kleists „Marionettentheater“ : Wir müssten ein zweites Mal vom Baum der Erkenntnis essen, um in den Stand der Unschuld, das heißt in die Unmittelbarkeit, zurückzufallen. Das Paradies der Unmittelbarkeit bleibt uns jedoch verschlossen. Denn, so argumentiert der Freund des Ich- Erzählers, der Tänzer Herr C., die einzige Möglichkeit, die Unschuld wiederzuerlangen, wäre, die Erkenntnis gleichsam durch ein Unendliches gehen zu lassen, was aber nur dem Gott vergönnt sei. (H. von Kleist, Über das Marionettentheater, Internetausgabe. Kleist-Archiv Heilbronn 2007, Version 12.07)

kurz. Der methodische Kulturalismus hat es hierauf leicht zu antworten: Da das wissenschaftliche Wissen sich in dieser Erkenntnistheorie einfach als Handlungsfolgenwissen darstellt, ist die Anwendung auf die Wirklichkeit unmittelbar gegeben, da es sich bei dieser Wirklichkeit auch immer um eine nach handwerklich-technischen Zwecksetzungen bearbeitete Wirklichkeit handelt.

Jedoch hat Sprache eine Tendenz zur Emanzipation nicht nur vom Unmittelbaren, sondern auch vom Zweckgesetzten. Das ist ja der Sinn der Dichtung, und allem Anschein nach auch derjenige großer Teile der reinen Mathematik. Können Sprache und sprachliches Wissen sich vollständig von den symbolischen Formen des Mythos und der Kunst lösen? Weiter: Auch Zwecke sind zwar nicht beweis-, wohl aber rechtfertigungspflichtig.⁴⁸ Was rechtfertigt beispielsweise das Herstellungsziel, ein Photometer so zu bauen und zu skalieren, dass die $1/r^2$ -Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke erfüllt ist? Jenem Herstellungsziel ist, wie schon Ernst Mach erkannte, die Vorstellung einer konstanten Lichtmenge vorgelagert. Die Konstanz der Lichtmenge übt nicht nur auf die visuelle Photometrie, sondern auch auf die auf der Lichtquantentheorie fußenden physikalischen Photometrie einen entscheidenden Einfluss auf: Es ist dieses Permanenzgesetz, welches überhaupt eine Interpretation der klassisch-optischen Vorgänge aus der Quantenperspektive möglich macht. Es klingt ziemlich verwegen, zu behaupten, dass mythische Vorstellungen hier eine Rolle spielen. Nun hat aber Cassirer darauf hingewiesen, dass gerade das Licht eine große Rolle für den Aufbau des mythischen Raumes spielt. Insofern könnte selbst für die Lichtquantenvorstellung mit Cassirer behauptet werden, dass eine mythische Vorstellung sich vermittels der Lichtquantenhypothese in die Quantenphysik hinübergerettet hat.⁴⁹

Es wäre die Aufgabe, die Physik und Naturwissenschaften nach Permanenzgesetzen und kulturellen Setzungen zu durchforschen. Allein so hätte man eine Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen vorsprachlichem und sprachlichem Wissen in der Physik einzugrenzen und zu charakterisieren. Einerseits muss es dieses vor- oder außersprachliche Wissen geben, weil Sprache nur funktionieren kann in der Anwendung auf etwas Nichtsprachliches. Andererseits hülfe dies, den Härten der Quantenmechanik, insbesondere der Bild-Dualität, auf die Spur zu kommen, da dieselbe - mit Reichenbach argumentiert - mit dem quantenmechanischen Formalismus selbst nicht mehr viel zu tun hat. Es sei denn, es gelänge die Gewinnung einer „Zen-

⁴⁸Siehe z. B. [Janich 2001], S. 38.

⁴⁹Vgl. [Cassirer 2002], S. XI sowie E. Cassirer, „Mythischer, ästhetischer und theoretischer Raum“ (1931); in [Cassirer 1985], S. 93- 119; hier S. 103: „Die Form (der mythischen) räumlichen Bindung ... (ist) unverbrüchlich; vor (ihr) gibt es kein Entrinnen.“

trelperspektive“ mit Hilfe eines Kalküls, um den Dualismus von Wellenbild und Teilchenbild aufzuheben.

6.5 Die Matrizenmechanik als Leibnizscher Relationalismus

Die Heisenbergsche Form der Quantenmechanik, die Matrizenmechanik, ist eine Anwendung des Leibnizschen Relationalismus auf die direkt beobachtbaren Spektallinien der Elemente. In dieser Interpretation von Heisenbergs Methode ist es nicht das Entscheidende, dass Heisenberg vorgibt, sich einen Kalkül zurechtlegen zu wollen, in dem nur Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen vorkommen sollen (diese Vorgabe hält Heisenberg auch gar nicht konsequent durch). Vielmehr macht er durch Beobachtung gestützte *Beziehungen zwischen den Spektallinien* mittels eines symbolischen Gebrauchs klassischer Vorstellungen *rechenbar*. In dieser Lesart des Heisenberg- Programms resultiert das Anschauungsproblem, das bis heute an die Quantenmechanik geknüpft wird, aus dem - obgleich nicht unmotivierten - Rückfall von der Leibnizschen relationalen Raumauffassung und Kinematik zurück in eine Euklidisch-Newtonsche Geometrie und Kinematik. Die letzteren sind charakterisiert durch quantitative raumzeitliche Beschreibungen, während die Beziehungen zwischen den Spektallinien, obzwar durch die Übergangsamplituden auch mit quantitativen „Marken“ operierend, doch wesentlich kombinatorischen Charakter haben. Wenn Leibniz daher in den *Initia rerum mathematicarum metaphysica* die Algebra als eine Anwendung der *Ars combinatoria* auf Quantitäten definiert hatte, so ist die Heisenberg-Born-Jordansche quantenmechanische Matrizenalgebra eine Umsetzung des Relations- Konzeptes auf die Gegenstände der Quantenphysik.

Es gibt experimentelle Anordnungen, in denen es andererseits einen wohldefinierten Sinn hat, vom Ort eines Elektrons zu reden, beispielsweise dann, wenn die räumliche Homogenität des Kraftfeldes, dessen Wirkung ein Strahl von Elektronen ausgesetzt wird, als hinreichend ausgedehnt gelten kann: In diesem Fall lassen sich die Flugbahnen der Elektronen rein klassisch, mit klassischer Mechanik und Elektrodynamik, berechnen. Ein anderer Fall ist die Bahn von Elektronen oder anderen atomaren Bruchstücken wie Helium-Kernen in der Wilsonschen Nebelkammer. Kondensierende Nebeltröpfchen hinterlassen eine Spur der Bahnen, so wie ein fluoreszierender Schirm die Bahn des aus Elektronen gebildeten Kathodenstrahls anzeigt. Diese beiden Situationen markieren Grenzfälle, in denen die Teilchen sozusagen auf einer

Euklidischen Zeichenebene Spuren auftragen wie ein Kreidestück auf einer Tafel im Geometrieunterricht. Dazu passt die Bemerkung, die Leibniz zum Konzept der „Spur“ macht. Eine Spur verweist, das ist ihre größte Gefahr, auf ein scheinbar absolutes Koordinatensystem als Hintergrund des Bewegungsvorgangs und weicht daher einer relational-relativen Auffassung von Bewegung aus:

„Ich bemerke ..., daß die Spuren beweglicher Dinge, die sie zuweilen in dem unbeweglichen Hintergrund, vor dem sich die Bewegung vollzieht, zurücklassen, zu der Vorstellung geführt haben, als ob selbst nach Aufhebung der unbeweglichen Dinge noch eine derartige ‚Spur‘ zurückbliebe. Doch ist dies rein ideal zu verstehen und kann nur bedeuten, daß, wenn es etwas Unbewegliches gäbe, man in ihm die Spur bezeichnen könnte. So bildet man sich vermittels dieser Analogie Stellen, Spuren, Räume ein, während doch all diese Dinge nur in der Wahrheit der Beziehungen, keineswegs aber in einer absoluten Realität ihren Bestand haben.“⁵⁰

Aber im Falle der Atomspektren gibt es gerade keine sichtbaren Spuren der Elektronen mehr, und der relationale Standpunkt wird, während er in der Euklidisch-Newtonischen Spur-Situation noch als Attitüde hätte erscheinen können, nunmehr zu einer Notwendigkeit. Freilich sind die Träger der Relationen nicht mehr die Elektronen, sondern ihre Lebensäußerungen, die Spektrallinien. Und die Relationen sind zunächst nicht verräumlichbar oder verzeitlichbar, da es sich wesentlich um Relationen von Übergängen zwischen Energiezuständen des Atoms handelt. Erst das Bedürfnis Heisenbergs und anderer Physiker, sich jene Relationen nachträglich im Schematismus der klassischen Physik zu veranschaulichen, führte zu einer rückwirkenden Verräumlichungs- und Verzeitlichungs-Tendenz. Die Übergangsamplituden Heisenbergs erfüllen zwar tatsächlich eine Art von Bewegungsgleichungen, die formal eine ähnliche Gestalt haben wie die Bewegungsgleichungen der klassischen Physik. Jedoch erfordert das Lösen des quantenmechanischen Bewegungsgesetzes eine von der Klassik so sehr unterschiedene zeitparameterfreie, nämlich rein algebraische Behandlung, dass die Rückkehr zu den gewohnten Vorstellungen der klassischen Mechanik illusorisch wird. Die Lösung des quantenmechanischen Bewegungsgesetzes wird erreicht durch eine aus der Linearen Algebra bekannten Hauptachsentransformation der Energie- oder Hamiltonmatrix H des betrachteten Atomsystems. Die Newtonschen oder Lagrangeschen Bewegungsgleichungen sind dagegen zeitliche

⁵⁰5. Schreiben an Clarke; [Leibniz 1904], S. 185- 186.

Differentialgleichungen in den Lagekoordinaten und müssen durch Infinitesimalmethoden gelöst werden. Umso mehr wird man zum Newtonschen verabsolutierenden Standpunkt tendieren, wenn man den relationalen Charakter der Heisenbergschen Entwicklungen nicht ernst nimmt. Dann wird von vorn herein eine analogische Interpretation der quantenmechanischen Bewegungsgleichungen im Vordergrund stehen, die der Leibnizschen Kritik offen steht: „So bildet man sich vermittels dieser Analogie Stellen, Spuren, Räume ein, während doch all diese Dinge nur in der Wahrheit der Beziehungen, keineswegs aber in einer absoluten Realität ihren Bestand haben“.

Eine strikt relationale Perspektive auf Heisenbergs Konstruktion vermeidet die mit der Spurbildung verbundenen Schwierigkeiten: Von Elektronenbahnen ist in der Heisenbergschen Quantenmechanik jedenfalls nicht zu reden, sondern nur von der Kombinatorik der Übergangsamplituden. Diese Auflösung der Krise der Anschauung betrifft nicht die Wellenmechanik als ganzer, sondern nur ihre - wenn auch bei weitem wichtigste - Spezialisierung auf den stationären Fall. Nur im stationären Fall, welcher anschaulich mit den Eigenschwingungszuständen einer eingespannten Saite vergleichbar ist, enthält die Schrödingersche Differentialgleichung die Zeit nicht, sondern nur Differentialquotienten der (generalisierten) Koordinaten. Die Lösung der stationären Schrödingergleichung ist ein Eigenwertproblem für den Energieparameter E ; diese Aufgabe kann mathematisch in eine Hauptachsentransformation überführt werden.⁵¹ Dies ist die Bedeutung der Redeweise von der Äquivalenz von Wellen- und Matrizenmechanik. Im allgemeinen, zeitabhängigen Fall dagegen lässt die Schrödinger-Methode keine einfach erkennbare relationale Deutung zu.

⁵¹Siehe [Born/Jordan 1930], S. 101- 102.

7 Ausblick

7.1 Background independent theories

Die Theorie der Loop-Quantengravitation¹ will die Festlegung der Raumgeometrie durch die Dynamik von Materie und Energie in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie imitieren, weil sie sich in dieser Methode der Auffassung von Leibniz verpflichtet sieht, Raum und Zeit erst in Abhängigkeit von den Dingen zu konstruieren, um nicht wie Newton einen Containerraum für die materiellen Gegenstände der Physik annehmen zu müssen. Die Ablehnung des Containerraum-Gedankens manifestiert sich im Anspruch der Hintergrundunabhängigkeit. Da die Kinematik der Wellenmechanik nicht über die Eigenschaft der Beschleunigungsinvarianz verfügt, wird versucht, diesem Ziel (und damit der Hintergrundunabhängigkeit) näher zu kommen, indem quantenmechanische Analoga zu den Einsteinschen Feldgleichungen erforscht werden. Grundlegend für die Loop-Quantengravitation ist der Befund Hilberts und Einsteins, dass sich jene Feldgleichungen aus einem Variationsprinzip für eine geeignet definierte Wirkungsfunktion S gewinnen lassen. Die Einstein-Hilbertsche Wirkungsfunktion wird sodann in Beziehung gesetzt mit der wellenmechanischen Wirkungsfunktion, die Schrödinger 1925 den Weg von der analytischen Mechanik von Hamilton und Jacobi zur Wellenmechanik gewiesen hatte, indem er zwischen der Jacobischen Wirkungsfunktion S und der Wellenfunktion ψ versuchsweise die Identität $\psi = e^{\frac{i}{\hbar} \cdot S}$ annahm. In der Allgemeinen Relativitätstheorie führt die Variation des Ausdrucks $S = \int R dV$ zu den Vakuumfeldgleichungen der Gravitation; es bedeuten R die Riemannsche Skalarkrümmung, eine vierdimensionale Verallgemeinerung des Gaußschen Krümmungsmaßes K , und dV das vierdimensionale Volumenelement der Einsteinschen Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit. Im Unterschied zur Riemannschen Geometrie, welche die mathematische Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie ist, greift die Quantengravitation auf die Idee einer Zerlegung des Raumes in Polyeder zurück. Historisch geht

¹Als erste Einführung in die Theorie kann der Artikel [Smolin 2004] dienen.

dieser Ansatz mindestens bis auf den Kontext der Gaußschen fundamentalen Abhandlung über krumme Flächen von 1827 zurück; es darf sogar vermutet werden, dass Gauß durch Betrachtungen an Polyedern eine Idee gewonnen hat für das Hauptresultat dieser Arbeit, nämlich die Invarianz des von ihm eingeführten Krümmungsmaßes K gegen Flächenverbiegungen. Diese Invarianz ist der mathematische Ausdruck dafür, dass die Gaußsche Krümmung eine innere Eigenschaft der Fläche ist, die ohne ein Hinausgehen in den umliegenden Raum berechnet und veranschaulicht werden kann, und zwar durch Dreiecksbetrachtungen, genauer, durch Betrachtung der Winkel-Defekte von Flächendreiecken, die bei einer Triangulierung der Fläche erzeugt werden. Jener Invarianz verdankt die Gauß-Krümmung K ihre Verallgemeinerungsfähigkeit auf höhere Raumdimensionen, wie in der Riemannschen Geometrie gezeigt wird. Kurz nach der Gaußschen Flächenabhandlung (1827) machte Ferdinand Minding die Biegungsinvarianz der Gaußschen Krümmung dadurch plausibel, dass er von der stetig deformierbaren Fläche zu unstetigen Flächendeformationen überging, indem er die Fläche in starre Dreiecke zerlegte, die an ihren Berandungen gegeneinander klappbar sein sollten. Die Invarianz von K fällt dann zusammen mit einer relativ einfachen Aussage der Polyedergeometrie und der sphärischen Trigonometrie (ein Hauptbestandteil der Beweisführung wird getragen von dem Satz, dass der Flächeninhalt sphärischer Polygone nur von ihrer Winkelsumme abhängig ist).² Eine moderne Weiterentwicklung der Ideen Mindings ist der Regge-Kalkül, in dem auch höherdimensionale Räume polyedermäßig zerlegt werden und ein Analogon zur Gaußschen oder Riemannschen Skalarkrümmung konstruiert wird.³ Der Zusammenhang mit der Quantenmechanik wird dadurch hergestellt, dass man aufgrund der Unbestimmtheitsrelation von einer minimalen Planck-Länge, einer kleinsten Planck-Fläche usw. ausgeht (da es auch eine Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation gibt, wird dasselbe Argument auch auf eine minimale Planck-Zeit ausgeweitet). Sodann wird der Regge-Kalkül auf die solcherweise polyedrisch zerlegte Raum-Zeit angewendet, insbesondere wird eine Wirkungsgröße eingeführt, mit deren Hilfe man Feldgleichungen der Quantengravitation herleiten möchte. Jene „Quanten-Feldgleichungen“ sollen gewährleisten, dass auf mikrokosmischer Ebene die Zusammenhangsverhältnisse von Raum und Zeit nicht als a priori festgelegt gedacht werden müssen, wie es in der Newtonschen Mechanik und in der Wellenmechanik der Fall ist, sondern aus der Verteilung der Elementarteilchen und der Energie erst erzeugt werden sollen.

Der Regge-Kalkül hat den Vorteil, dass in ihm keine Koordinaten der Raum-Zeit mehr einge-

²Siehe [Minding 1839], S. 370- 371.

³Z. B. in [Sorkin 1975].

führt werden müssen, um die wichtigen Größen wie Wirkung, Krümmung usw. der Rechnung zugänglich zu machen, im Unterschied zu den Analoga in der Riemannschen Geometrie: Der in der Allgemeinen Relativitätstheorie benutzte Ricci-Kalkül ist ja eine Theorie der Invariantenbildung, die einer zuverigen Koordinatisierung bedarf. Die mathematische Situation ist die, dass die Rechnung selbst der Koordinaten nicht entbehren kann, obwohl der Kalkül zu Invarianten gegenüber beliebigen Koordiantentransformationen führen soll.⁴ Im Regge-Kalkül werden dagegen Krümmungsgrößen und andere Invarianten koordinatenfrei berechnet und fügen sich demnach eher dem erkenntnistheoretischen Ideal, eine Theorie möglichst von unnötigen oder sogar unbeobachtbaren Rechenhilfsgrößen freizuhalten. Er zerschneidet die vierdimensionale Raum-Zeit in stückweise „euklidische“ Polyeder, deren Zusammenfügung die Krümmung der Mannigfaltigkeit generiert. Der Ansatz hat den Nachteil, dass er die Zeit den drei Raumdimensionen gleichberechtigt nebeneinander stellt und somit eine Aufwertung der Zeit in die Quantentheorie hineinträgt, welche von der Quantenmechanik zunächst nicht gedeckt ist. Denn die Quantenmechanik erzielte ihren bisher größten Erfolg bei der Berechnung der stationären und demnach zeitfreien Energiezustände von Quantensystemen.

Die Befürworter der background independent theories berufen sich gern auf Leibniz, welcher ihnen als Erfinder der Hintergrund-Unabhängigkeit gilt. Die Bedingung, welche die Forderung der background independence an eine physikalische Theorie stellt, bedeutet, dass die Gestalt der Raum-Zeit nicht a priori festgelegt sein und dass es keine bevorzugten Koordinatensysteme oder Metriken geben darf. Die verschiedenen Konfigurierungsmöglichkeiten sollen als Lösungen von Feldgleichungen gewonnen werden. Es wird argumentiert, dass das Leibnizsche Prinzip des zureichenden Grundes eine Theorie, die sich von vornherein auf eine Hintergrund-Geometrie festlegt, verbiete, da es a priori für die Wahl keine hinreichende Begründung geben könne.⁵ Dass zur Gewinnung irgendwelcher Informationen über das Verhalten natürlicher Gegenstände Messungen vorgenommen werden müssen, die selbstverständlich ein Minimum an räumlicher und zeitlicher Beherrschung von Laborgegenständen in ihrer Anwendung auf Naturgegenstände erforderlich machen, offenbart ein methodisches Problem, welches die background independent theories zu berücksichtigen hätten. Leibniz sah das Problem deutlich und stellte sich ihm, indem er die Ursache der zeitlichen Veränderung einer räumlichen Konfiguration aus einem in den Dingen selbst liegenden Extremalprinzip zu gewinnen suchte. Die methodischen Schwierigkeiten, die wiederum mit dieser Behauptung verknüpft waren, sind oben

⁴Vgl. [Einstein 1918], S. 698.

⁵Siehe [Smolin 2005], S. 7.

erörtert worden. Die methodische Philosophie stellt den hintergrundunabhängigen Theorien die Warntafel auf: Man vermeide methodische Zirkel!

7.2 Der Grundsatz der Beschleunigungsrelativität

7.2.1 Das Machsche Prinzip

Nach Leibniz bedürfen wissenschaftliche Annahmen zwar nicht der unmittelbaren Darstellung in wirklicher Erfahrung, aber die Beziehung auf *mögliche* Erfahrung muss in ihnen gewährleistet bleiben. Das ist der Inhalt des Leibnizschen Prinzips der Beobachtbarkeit. Eine wissenschaftliche Hypothese erlangt dadurch ihr Recht, dass sie sich, wenigstens mittelbar, in ihren Folgen im System des Erfahrbaren bewährt. Aber mit Newton einen absoluten Raum, das heißt einen Raum, der unabhängig von allem Dinglichen bestehen soll, anzunehmen, hieße, etwas, was weder direkt, noch in seinen Folgen wahrgenommen werden kann, annehmen. Zwar war Newton der Überzeugung, dass der absolute Raum eben doch in seinen Folgen wahrgenommen werden könnte, nämlich im Auftreten von Flieh- oder Trägheitskräften. Ernst Mach konnte aber am Ende des 19. Jahrhunderts zeigen, dass Newtons Schluss nicht bindend ist, dass vielmehr Leibniz' Relationalismus aufrecht erhalten werden kann, wenn man die Trägheitskräfte nicht durch eine beschleunigte Bewegung gegen den absoluten Raum, sondern durch die Relativbewegung des Körpers gegen die umgebenden kosmischen Massen verursacht denkt. Das Machsche Prinzip bedeutete in seiner ursprünglichen, von Mach selbst gegebenen Erklärung, dass die Trägheit auf eine Wechselwirkung zwischen den Körpern zurückgeführt werden muss. Damit wollte Mach erreichen, dass für die Erklärung der Trägheits- oder Fliehkräfte nur *Beobachtbares* als Ursache herangezogen wird, im Gegensatz zu Newtons Erklärung der Trägheitskräfte durch einen - sonst nicht beobachtbaren - absoluten Raum.

Newton konnte durchaus Gründe für seine Auffassung vom Raum, der unabhängig von den Dingen und ihren Zuständen existieren soll, vorbringen. Denn seine Raumanschauung fußt in seiner Kräftelehre. Er kann ein dynamisches Mittel angeben, um eine Bewegung gegen den absoluten Raum festzulegen. Es ist nicht so, dass Newton nicht über die Relativität von Bewegungen und über den relationalen Charakter des Raumes nachgedacht hätte, denn zu Beginn des Scholiums schreibt er: „Zeit, Raum und Bewegung sind allen wohlbekannt. Dennoch ist

anzumerken, dass man gewöhnlich diese Größen nicht anders als in der Beziehung auf sinnlich Wahrnehmbares auffasst.“ Newton weiß sehr wohl, dass die wissenschaftliche Debatte zu Raum, Zeit und Bewegung am Ende des siebzehnten Jahrhunderts dazu neigte, diese Größen nur noch in Bezug auf sinnlich wahrnehmbare Dinge gelten zu lassen. Trotzdem hielt er den Relationalismus in der Raumtheorie und das Relativitätsprinzip in der Bewegungslehre für ein Vorurteil. Seiner Meinung nach beweist die Existenz der Fliehkräfte unmittelbar den absoluten Raum und den absoluten Charakter beschleunigter Bewegungen. Newton bevorzugt die Demonstration der Verhältnisse bei der Kreisbewegung. Wird eine Scheibe in Rotation versetzt, so werden auf der Scheibe Zentrifugalkräfte wirksam. Diese Kräfte können, so Newton, nur verstanden werden, wenn man annimmt, dass die Kreisbewegung eine absolute Bewegung gegen den absoluten Raum darstellt. Clarke, Newtons Mittelsmann im Streit mit Leibniz, führt gegen Leibniz ins Feld, dass hier der Relationalismus Schiffbruch erleide, denn im relationalen Raum müssten mit der Kreisbewegung auch alle Fliehkräfte augenblicklich verschwinden, sobald alle umgebenden Dinge vernichtet würden. Für den Newtonianer Clarke gibt es ein Kriterium für die Realität des absoluten Raumes und der absoluten Bewegung, nämlich die Fliehkräfte, die bei absoluter Rotation auftreten, bei relativer Rotation gemäß dem Raum-Schema von Leibniz dagegen fehlen müssten. Hier haben Newton und Clarke ein Argument zugunsten des absoluten Raumes zur Verfügung, auf das Leibniz nicht erwidern kann. Er muss seinen Kontrahenten gegenüber eingestehen, dass die Auszeichnung einer absoluten Bewegung zwar nicht kinematisch, jedoch dynamisch möglich ist, wodurch freilich sein ganzer Relationalismus ins Wanken gerät. Hier fehlt Leibniz das Machsche Argument, welches die Relativität aller Bewegung - zumindest in der Mechanik - dynamisch verteidigen kann, die Tatsache, dass die Entstehung der Fliehkräfte sich auch auf eine Relativbewegung, nämlich einer Drehung der Kreisscheibe gegen den Rest der kosmischen Fixsterne, zurückführen lässt. Der Relationalismus lässt sich dank des Machschen Arguments aufrecht erhalten.

Das Leibniz-Machsche Prinzip, die Relativität nicht nur gleichförmiger, sondern auch beschleunigter Bewegungsvorgänge, müsste auch für die Quantentheorie fruchtbar gemacht werden können. Zur Erklärung von Flieh- oder Trägheitskräften dürfte man nicht auf den absoluten Raum Newtons angewiesen sein. Es sollte vielmehr stets möglich sein, Trägheitswirkungen auch als, seien es gravitative, seien es elektromagnetische, Wirkungen jedenfalls *beobachtbarer* Massen oder Ladungsträger aufzufassen. Damit wäre eine Relativierung der Beschleunigung geleistet, und es wären zugleich physikalische Theorien installiert, welche nur von prinzipiell beobachtbaren Dingen handeln. Die tatsächlich vorhandene, in der New-

tonschen Mechanik als Folge einer absoluten Erdrotation aufgefasste Abplattung des Geoids beispielsweise kann mit der Argumentation von Mach auch dadurch erklärt werden, dass die Erde sich relativ zu den umgebenden kosmischen Massen, den Fixsternen, bewegt. Die Erdabplattung wäre damit als eine dynamische Gravitationswirkung entlarvt. Ein absoluter Raum wäre nicht mehr nötig, um die auftretenden Fliehkräfte und damit die Abplattung der Erde zu erklären. Die Fliehkräfte ließen sich ebenso gut als Gravitationswirkungen der relativ zur Erde in Rotation befindlichen kosmischen Massen auffassen. Entsprechend müsste in der Maxwell- Lorentzschen Theorie die Lichtemission durch Beschleunigung eines Ladungsträgers umgedeutet werden können als Folge einer reinen Relativbewegung zwischen Ladungen. Jede Form elektromagnetischer Strahlung, die durch beschleunigte Ladungen erzeugt wird, heißt Bremsstrahlung. Beschleunigungen (gegen den absoluten Raum) sollten aus relationaler Sicht als Ursachen physikalischer Vorgänge aus dem Gebäude der Physik eliminiert werden. Daher sollte es nur noch erlaubt sein, die Bremsstrahlung mit Hilfe einer Bewegung der Ladung relativ zu etwas „Realem“ zu erklären. Die atomare Lichtemission müsste - im klassischen Bilde - erklärt werden als eine dynamische Wirkung des Feldes des Atomkernes auf das Leuchtelektron. Dass das klassische Bild hinkt und sich nur im Falle hoher Quantenzahlen an die tatsächliche, nämlich quantenphysikalische Lichtausstrahlung annähert, ist der Inhalt des Korrespondenzprinzips. Aber eben gerade für hohe Quantenzahlen ist das klassische Bild berechtigt, und damit auch die Idee der Beschleunigungsrelativität, damit aber auch der Leibnizsche Relationalismus. Man sieht: Der Relationalismus der Beschleunigungsrelativität verzahnt sich bei den spektroskopischen Eigenschaften des Atoms mit dem Relationalismus der Heisenbergschen Intensitätsamplituden, und die Schnittstelle zwischen beiden Ausprägungen des Relationalismus ist das Korrespondenzprinzip.

7.2.2 Das Einsteinsche Äquivalenzprinzip

Einstein präziserte das Leibniz-Machsche Programm der Beschleunigungsrelativität für die Mechanik, indem er die mechanischen Trägheitswirkungen auf Gravitationswirkungen zurückführte. Da er die kinematischen Effekte in einem relativ gegen ein Inertialsystem im Beschleunigungszustand befindlichen Bezugssystems formelmäßig leicht überblickte, suchte und fand er einen Zusammenhang zwischen einem beschleunigten Bezugssystem und einem Bezugssystem mit Gravitationsfeld, um jene Effekte als Gravitationseffekte der Rechnung zu-

gänglich machen zu können.⁶ Der Zusammenhang wurde geliefert durch die experimentell bereits von Galilei sichergestellte Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung von der Größe und stofflichen Zusammensetzung der fallenden Körper. Einstein erhielt so nämlich die Möglichkeit, Trägheitsfelder durch Gravitationsfelder zu simulieren. Er erläuterte diesen Sachverhalt anhand eines berühmt gewordenen Gedankenexperimentes:

„Zwei Physiker, A und B, erwachen aus narkotischem Schlafe und bemerken, dass sie sich in einem geschlossenen Kasten mit undurchlässigen Wänden befinden, versehen mit ihren Apparaten. Sie haben keine Kenntnis davon, wo der Kasten angeordnet bzw. ob und wie er bewegt ist. Sie konstatieren nun, dass Körper, die sie in die Mitte des Kastens bringen und loslassen, alle nach derselben Richtung - sagen wir nach unten - mit der allen gemeinsamen Beschleunigung γ fallen. Was können die Physiker daraus schließen? - A schließt daraus, dass der Kasten ruhig auf einem Himmelskörper liege, und dass die Richtung nach unten diejenige nach dem Zentrum des Himmelskörpers sei, falls dieser kugelförmig sein sollte. B aber vertritt den Standpunkt, dass der Kasten durch eine außen an ihm angreifende Kraft in gleichförmig beschleunigter Bewegung nach ‚oben‘ von der Beschleunigung? erhalten sein könne; ein Himmelskörper brauche nicht in der Nähe zu sein. Gibt es für die beiden Physiker ein Kriterium, nach dem sie entscheiden könnten, wer Recht hat? Wir kennen kein derartiges Kriterium (...) Falls es für die beiden Physiker wirklich prinzipiell nicht unterscheidbar ist, welche der beiden Auffassungen die zutreffende ist, kommt der *Beschleunigung* ebensowenig eine absolute physikalische Bedeutung zu wie der *Geschwindigkeit*. Das gleiche Bezugssystem ist mit gleichem Rechte als beschleunigt oder als nicht beschleunigt zu bezeichnen; je nach der gewählten Auffassung hat man dann aber ein Gravitationsfeld als vorhanden anzusetzen ...“⁷

Man erkennt in Einsteins Gedankenexperiment und dem darin enthaltenen Äquivalenzprinzip die fundamentale Rolle, welche der Gleichheit der Fallbeschleunigung für alle schweren

⁶Die bekannten Definitionsschwierigkeiten für eine zirkelfreie Festlegung von Inertialsystemen seien hier und im folgenden ausgeklammert. Der Zirkel sei nur angedeutet: Einerseits soll man ein Inertialsystem an dem Fehlen der Trägheitskräfte erkennen. Jedoch wird dabei der Begriff der Kraft bereits investiert, obwohl gemäß der Newtonschen Axiomatik die Inertialsysteme erst die Möglichkeit bieten sollen, Kraftgesetze empirisch zu gewinnen. Indem sich die Allgemeine Relativitätstheorie auf „frei fallende“ Bezugssysteme als lokale Inertialsysteme beschränkt, scheint sie dem Definitionszirkel zu entkommen.

⁷[Einstein 1913], S. 1254- 1255.

Körper bei gegebenem Gravitationsfeld zukommt. Erst diese Gleichheit macht das Leibniz-Machsche Programm der Relativität aller Bewegungen und aller Beschleunigungen zu einer durchführbaren physikalischen Theorie. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es einer analogen Tatsache bedarf, um auch in der Atomphysik die Leibniz-Machsche Relativität von einem bloßen Programm zu einer durchführbaren physikalischen Theorie zu machen. Es gibt nun auch für die Atomphysik ein Indiz für die Durchführbarkeit der Beschleunigungs- oder allgemeinen Relativität, welches darin besteht, dass alle Elektronen eine gleich große spezifische Ladung besitzen. Protophysikalisch betrachtet ist jene Konstanz keineswegs als ein empirisches Faktum anzusehen, wie von der Physik gerne dargestellt. Es liegt hier vielmehr dieselbe Schwierigkeit vor wie bei Einsteins Rechtfertigung der gleichen Fallbeschleunigung aller Körper im Schwerfeld. Einstein fasst diese Eigenschaft der Schwere als Ausfluss einer durch die Versuche von Eötvös empirisch sichergestellten Gleichheit von träger und schwerer Masse auf. Einsteins Argument hält dem Prinzip der methodischen Ordnung nicht Stand, weil eine methodisch saubere Implementierung des Massenbegriffs von ebendieser Gleichheit schon Gebrauch machen muss.⁸ Analog sind die Verhältnisse in der Atomphysik. Die Lehrbuchliteratur betrachtet die Konstanz der spezifischen Ladung e/m , des Quotienten aus der Elementarladung e und der Masse m des Elektrons, als eine Angelegenheit messender Erfahrung. Bei näherem Hinsehen stellt sich aber heraus, dass für die Messung einer Ladungsmenge schon vorausgesetzt werden muss, dass Masse und Ladung in einem Proportionalverhältnis stehen. Man erkennt dies an Faradays erstem Bau eines Ladungsmessgerätes, welches Ladungen mittels bei der Elektrolyse abgeschiedener Stoffmengen maß. Die Konstanzforderung beinhaltet die Erhaltung der Ladungsmenge bei Verzweigung des Stromkreises, welches also kein empirischer Satz ist, sondern als eine „Homogenitätsnorm“ im Sinne der Protophysik überhaupt erst das korrekte Funktionieren sowie Störungen des Ladungsmessers definierbar macht. So wie Einstein auf die Fehldeutung der Experimente von Eötvös gar nicht zurückgreifen brauchte, sondern einzig auf das von Galilei gefundene kinematische Faktum des gleichschnellen Fallens aller Körper im Scherfeld, welches protophysikalisch beanstandungslos ist, so braucht es im Falle der Elektronen keinen Rückgang auf eine methodisch zweifelhafte Erfahrungsbehauptung einer Konstanz. Die Sachlage ist vielmehr diese: Um Elektronen im elektrischen Feld gleich schnell fallen zu lassen, bedarf es nur der Atomhypothese (genauer: der Annahme einer korpuskularen Natur der Elektrizität) und der Faradayschen Definition der Ladungsmessung (die kein Physiker bestreiten dürfte, da die Einheit der elektrischen Stromstärke, das Ampere,

⁸Vgl. [Janich 1982a].

über eine abgeschiedene Menge von Silber bei der Elektrolyse definiert werden kann).

Die Konstanz der spezifischen Ladung des Elektrons, welche also im protophysikalischen Sinne eine Homogenitätsforderung für die Herstellung von Ladungsmessgeräten darstellt, sorgt dafür, dass alle Elektronen im elektrischen Feld gleich schnell, das heißt mit derselben Beschleunigung, fallen. Damit ist man genau in der Situation des Einsteinschen Gedankenexperimentes. Es sind nur statt der materiellen Körpern von den Physikern A und B lauter Elektronen mit in den Kasten zu nehmen, und der Himmelskörper, der für Physiker A das Schwerfeld erzeugt, ist durch ein elektrisches Feld zu ersetzen. Denn wenn sich die beiden Physiker A und B beim Experimentieren auf Elektronen beschränken, wird auch ihnen jedes Mittel fehlen, festzustellen, ob die Elektronen einem äußeren elektrischen Feld ausgesetzt sind, oder ob der Kasten sich im äquivalentem Beschleunigungszustand in entgegengesetzter Richtung befindet. Zwar funktioniert die Analogie zwischen Einsteins materiellen Körpern und geladenen Teilchen nur solange, wie man sich auf eine Teilchensorte, hier Elektronen, beschränkt. Dies genügt aber, denn es würde schon viel bedeuten, die allgemeine Relativität in der Quantenmechanik durchzuführen, um zu einem besseren Verständnis selbst nur weniger Spektrallinieneigenschaften zu kommen.

Eine Theorie der allgemeinen Relativität der Elektronenbewegung führte zugleich zu einer neuen Theorie des elektrischen Feldes, denn es ist nach dem oben Gesagten klar, dass man ein elektrisches Feld durch bloße Änderung des Bewegungszustandes des Bezugssystems erzeugen kann.

Bei Einstein ist der im Schwerfeld frei fallende Kasten ein lokales Inertialsystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig-gleichförmig bewegen. Hier soll ein fiktiv mit den Elektronen verbundenes Bezugssystem, das mit den Elektronen in einem elektrischen Feld frei fällt, ein Inertialsystem darstellen. Es tritt nun eine besondere Schwierigkeit auf: Wenn der frei fallende Kasten ein Inertialsystem sein soll, dann müssen die mit ihm frei fallenden Elektronen als ruhend betrachtet werden. Ruhende Elektronen strahlen nach der klassischen elektromagnetischen Lichttheorie nicht. Aber für einen Beobachter, der relativ zum äußeren elektrischen Feld ruht, sind die Elektronen beschleunigt und müssen elektromagnetische Strahlung emittieren. Dieser Sachlage kann eine positive Wendung gegeben werden. In der älteren Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie gab es im Atom ausgezeichnete Bahnen, auf denen die Elektronen, im Widerspruch zu den Gesetzen der Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik, keine Strahlung emittieren. Das sind die stationären Bohrschen Bahnen, deren Einführung

aufgrund des fundamentalen Faktums der Stabilität der Atome geboten schien.

Es wäre nun Aufgabe eines theoretischen Physikers, den Zusammenhang zwischen dem Elektronen-Äquivalenzprinzip und der Stationarität der Bohrschen Bahnen näher auszugestalten. Nur soviel ließe sich zur Beziehung zwischen Elektronen-Äquivalenzprinzip und Stationarität bereits sagen: Einstein bemerkte, dass sich ein zentralsymmetrisches Gravitationsfeld zwar lokal, aber durch keine Wahl des Bezugssystems als Ganzes wegtransformieren lässt. Dies liegt an der Inhomogenität des Zentralfeldes, während das Äquivalenzprinzip ursprünglich nur für homogene Felder aufgestellt worden war. Das Einsteinsche Äquivalenzprinzip kann streng nur für infinitesimale Bezugssysteme gelten, das heißt, nur lokal kann ein Schwerfeld durch eine passende Beschleunigung des Bezugssystems aufgehoben werden, weil das im allgemeinen inhomogen gestaltete Feld nur infinitesimal als homogen betrachtet werden darf. In diesem infinitesimalen dreidimensionalen Koordinatensystem werden alle Körper sich im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translationsbewegung befinden, da es sich eben als lokales Inertialsystem auffassen lässt. Liegt aber zum Beispiel das Gravitationsfeld der Erde vor, so kommen einem frei zum Erdmittelpunkt hin fallenden Kasten die Körper auf der anderen Seite der Erde beschleunigt entgegen. Das *ganze* Gravitationsfeld der Erde lässt sich durch kein Transformations- Kunststück wegtransformieren. Daher bedarf es noch einer zusätzlichen Hypothese, um die Bahn einer bewegten Masse im Gravitationsfeld auch für diejenigen Fälle postulieren zu können, in denen es kein Bezugssystem gibt, bezüglich dessen in endlichen Räumen die kinematischen Verhältnisse der Speziellen Relativitätstheorie oder, noch einfacher, der Galilei- Newtonschen Mechanik gelten. Entsprechendes muss für das Feld des Atomkerns angenommen werden: Es lässt sich wohl lokal (infinitesimal), aber nicht vollständig zum Verschwinden bringen. Dadurch wäre die Möglichkeit gegeben, dass zwar ein im *homogenen* elektrischen Feld frei fallendes Elektron nicht strahlt, weil sich das homogene Feld als Ganzes (durch Wahl eines mit dem Elektron frei fallenden, räumlich ins Unendliche ausdehnbaren Bezugssystems) wegtransformieren lässt, ein um einen Atomkern kreisendes Elektron jedoch strahlen kann, weil sein Inertialsystem nur lokal ist.

7.2.3 Grundlegung eines beschleunigungsrelativen Elektromagnetismus

Es soll wenigstens angedeutet werden, in welche Richtung die physikalische Spekulation weiterzugehen hätte, um die atomare Beschleunigungsrelativität für eine mathematische Beschreibung gewisser Spektrallinieneigenschaften zu verwerten. Es seien noch einmal der Grundgedanke des Einsteinschen Äquivalenzprinzips und das Elektronen-Äquivalenzprinzip nebeneinandergestellt und durch Analogisierung die von der Theorie weiterzuverfolgende Denkarbeit vorgeschlagen.

Galileis Erkenntnis der Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung von der Größe und stofflichen Zusammensetzung der fallenden Körper bewies, dass das Gravitationsfeld nur eine relative Existenz besitzt: Für einen Beobachter, der sich im freien Fall befindet, existiert - zumindest in seiner unmittelbaren Umgebung - kein Gravitationsfeld. Wenn nämlich der fallende Beobachter andere Körper fallen lässt, dann befinden diese sich relativ zu ihm im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung. Der Beobachter hat keine Möglichkeit, seinen Fall in einem Gravitationsfeld nachzuweisen. Vielmehr kann er mit gleichem Recht seinen Zustand als einen der Ruhe betrachten und sagen, dass in seiner Umgebung kein Gravitationsfeld wirksam ist.

Die Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung kann noch auf eine zweite Weise interpretiert und physikalisch ausgewertet werden: Wenn alle Körper unabhängig von ihrer besonderen chemischen oder physikalischen Natur gleich schnell fallen, so kann man sie mit gleichem Recht als außerhalb eines Gravitationsfeldes befindlich betrachten und kann stattdessen das Bezugssystem, in dem sie sich befinden, mit einer entgegengesetzt gerichteten Beschleunigung in Bewegung gesetzt betrachten. Dies ist die Aussage des Äquivalenzprinzips. Man kann also physikalische Vorgänge in Gravitationsfeldern *lokal* mit beschleunigten Bezugssystemen simulieren, wodurch die dynamischen Vorgänge in Gravitationsfeldern einer rechnerischen Behandlung zugänglich gemacht werden. Man kann zum Beispiel versuchen Vorgänge formelmäßig zu beschreiben, die sich unter dem Einfluss bewegter gravitierender Massen abspielen, und erhält so die Möglichkeit, neben der vorhandenen Newtonschen Theorie statischer Gravitationswirkungen eine Gravitationsdynamik zu entwickeln.

Auf ähnliche Weise könnte man nun versuchen, bei Vorhandensein einer Elektrostatik und eines geeigneten Äquivalenzprinzips für die elektrischen Erscheinungen eine von der Maxwell-

schen Theorie verschiedene elektromagnetische Theorie aufzubauen. Aus der Relativierung der Elektrostatik ergäbe sich zwangsläufig eine modifizierte magnetische Theorie mit, weil die der Gravitationsdynamik entsprechende neue Elektrodynamik zugleich eine neue Lehre des Magnetismus mitlieferte. Für die Theorie des Kernfeldes wäre eine geänderte Elektrodynamik sehr wünschenswert, da sich die Abstrahlung von diskreten Spektrallinien und die bestehende Maxwell-Lorentzsche Elektrodynamik widersprechen. Eine Brücke konnte ja nur für hohe Quantenzahlen durch das Korrespondenzprinzip gebaut werden.

Wie bereits skizziert, bietet das Elektronen-Äquivalenzprinzip die Möglichkeit, eine allgemeine Relativitätstheorie der Elektronenbewegung aufzubauen. Nach dem zuerst Gesagten ist es klar, dass man eine neue Theorie des kernelektrischen Feldes, unter alleiniger Voraussetzung der Coulombschen Elektrostatik, entwickeln könnte. Es ist anzunehmen, dass sich dabei eine von der bestehenden Maxwell-Lorentzschen abweichende Elektrodynamik ergibt, die aber, und das wäre ihr großer Vorteil, der Quantentheorie der Lichtemission durch Materie mehr entgegenkommt.

Die Analogie zwischen den im homogenen elektrischen Feld und den im homogenen Gravitationsfeld frei fallenden materiellen Körpern ist allerdings so lange keine vollständige, wie die Physik die Elementarladung e des Elektrons als eine absolute Konstante sowie die träge Masse m des Elektrons gemäß der Speziellen Relativitätstheorie als geschwindigkeitsabhängig annimmt. Einer der ersten experimentellen Tests der Speziellen Relativitätstheorie bestand gerade im Nachweis der Geschwindigkeitsabhängigkeit der spezifischen Ladung e/m , wozu die Kathodenstrahlexperimente von Kaufmann relativistisch interpretiert wurden. Um eine allgemeine Relativitätstheorie der Elektronenbewegung zu entwickeln, ist jedoch nicht zu sehen, wie auf die Konstanz der spezifischen Ladung des Elektrons verzichtet werden könnte. Man kann sich auch nicht mit der Annahme helfen, dass diese Konstanz nur näherungsweise erfüllt sei, denn die Elektronengeschwindigkeiten im Atom erreichen bereits Werte, die gegen die Lichtgeschwindigkeit nicht mehr vernachlässigt werden dürfen.⁹ Da aber oben festgestellt worden ist, dass die Konstanz der spezifischen Ladung eine auf experimentellem Wege schwerlich hintergehbare, da Ladungsmessung erst ermöglichende Homogenitätsforderung beim Bau von Ladungsmessgeräten beinhaltet, muss der hier zu tage tretende offene Konflikt zwischen einer physikalischen Behauptung und einer protophysikalischen Erkenntnis ungelöst bleiben.

⁹Im Gegenteil, die Sommerfeldsche Theorie der Feinstruktur basierte gerade auf der Tatsache der Massenveränderlichkeit der Leuchtelektronen im Atom.

Die Idee der allgemeinen Relativität nach Leibniz-Mach soll nun unter allen Umständen aufrecht erhalten werden. Beschleunigungen gegen den Newtonschen Raum als wirkende Ursachen für physikalische Vorgänge sind aus dem gesamten Gebäude der Physik zu eliminieren und müssen durch Relativbewegungen gegen direkt oder mittelbar *beobachtbare* Dinge erklärt werden, denn physikalische Kausalität erfordert nach Leibnizens Prinzip der Beobachtbarkeit auch eine Gesetzlichkeit *beobachtbarer* Größen. In der Lorentzschen Elektrodynamik gelten, gemäß der Larmorschen Formel, strahlende Ladungen als gegen den Newtonschen Raum beschleunigt, im Bohrschen Atommodell wird die Lichtemission nicht als von einer Beschleunigung herrührend, sondern als das Resultat eines Energiesprungs aufgefasst. Jedoch geht für große Energien, das heißt für große Quantenzahlen, die Lichtemission durch Energiesprung in die Larmorsche Strahlungsemission über. Nur eine Allgemeine Relativitätstheorie für (Leucht-) Elektronen könnte den Newtonschen Raum, der sich hinter der Lichtemission nach Lorentz-Larmor verbirgt, eliminieren. Der einzig erkennbare Weg, eine Beschleunigungsrelativität der Elektronenbewegung rechnerisch durchzuführen, liegt in der Analogiebildung zur Einsteinschen Theorie der Gravitation, mithin im Formulieren eines Äquivalenzprinzips. Dafür braucht man zwingend ein gleich schnelles Fallen aller Elektronen im homogenen elektrischen Feld, was jedenfalls durch eine Konstanz des Quotienten e/m garantiert würde. Um so schöner ist es nun, dass die Formel für die Frequenzverschiebung beim Zeeman-Effekt ein verstecktes e/m -Argument enthält: Die Formel $\Omega_{Larmor} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B$ für die Präzessionsfrequenz lässt sich nämlich auf folgende Weise begründen: Das Leuchtelektron besitzt im homogenen Magnetfeld denselben Bewegungszustand wie in einem feldfreien, dafür aber rotierenden Bezugssystem, wenn letzteres sich gegen das Ruhesystem des Magnetfeldes (welches zugleich das Ruhesystem des Atomkerns darstellt) mit der Frequenz Ω_{Larmor} dreht. Das kommt auf dasselbe hinaus wie die Aussage, dass die Bahn des Elektrons mit der Larmorfrequenz um die Feldlinienrichtung präzediert. Ein Beweis dieser Behauptung lässt sich erbringen, indem man feststellt, dass die im Ruhesystem auf das bewegte Elektron wirkende Lorentzkraft $\vec{F} = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ durch eine Corioliskraft $\vec{C} = 2m \cdot \vec{v} \times \vec{\Omega}$ simuliert werden kann, wenn man gerade $\Omega = \Omega_{Larmor}$ wählt. Diese Corioliskraft von derselben Größe wie die Lorentzkraft wirkt nämlich auf einen mit der Geschwindigkeit v bewegten Körper der Masse m in einem Bezugssystem, welches gegen ein Inertialsystem mit der Drehgeschwindigkeit Ω_{Larmor} rotiert.¹⁰ Kurz, diese von Sommerfeld stammende Argumentation enthält als Kern die Idee, elektrische oder magnetische Felder mit beschleunigten Bezugssystemen zu simulieren. Das entspricht

¹⁰[Sommerfeld 1978], Bd. 1, S. 351.

genau dem Vorgehen Einsteins, Gravitationsfelder durch beschleunigte Bezugssysteme nachzuahmen. Wo dies bei der Gravitation aufgrund der Entdeckung Galileis funktioniert, klappt es bei den elektrischen und magnetischen Feldern dank der Konstanz der spezifischen Ladung des Elektrons.

Die theoretische Physik knüpft ihre aktuellen Ansätze, die Quantenmechanik mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu vereinigen, an eine geeignete Modifizierung der wellenmechanischen Beschreibungsweise. Dies ist schon allein deshalb gerechtfertigt, weil die zeitabhängige Schrödinger-Wellengleichung, im Unterschied zur Matrizenmechanik Heisenbergs, nicht nur periodische, sondern auch aperiodische, also translatorische Bewegungsvorgänge zu erfassen vermag. Heisenbergs Vorgehen stellte ja eine Verschärfung des Korrespondenzprinzips dar und modellierte, da die klassische Physik das Leuchten der Atome nur mit periodisch bewegten Elektronen deuten konnte, die quantenhafte Lichtausstrahlung durch *per definitionem* periodisch wirkende, virtuelle Ersatz-Oszillatoren. Vom methodischen Standpunkt wäre zwar der Heisenbergsche Zugang zur Quantenmechanik dem Schrödingerschen vorzuziehen, da Heisenberg von den empirisch gegebenen Intensitäten und Frequenzen ausging und auf der Grundlage jener direkt beobachtbaren Größen eine Umdeutung der klassischen Kinematik und Mechanik vornahm, während die Wellenmechanik nicht von den direkt beobachtbaren Dingen ausgeht, sondern von einer Spekulation über Welleneigenschaften der Materie. Einer Verschmelzung von Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie im Heisenberg-Formalismus steht der Umstand entgegen, dass das Einsteinsche Bewegungsgesetz für beliebige Bewegungsvorgänge gilt, nicht nur für periodische. Da andererseits die Allgemeine Relativitätstheorie ein Angebot macht, den absoluten Raum als wirkende Ursache aus den Grundlagen der Physik zu eliminieren, jedenfalls solange es sich um Gravitationsvorgänge handelt, so bleibt die Hoffnung bestehen, dass auch in dem Elektronen-Äquivalenzprinzip ein Mittel an die Hand gegeben ist, um die Leibniz-Machsche Eliminierung des absoluten Raumes in den Gesetzen der quantenhaften Emission von Licht nutzbar zu machen, und zwar auf folgendem Wege. Zuerst wäre mit Hilfe des Prinzips der Beschleunigungsrelativität, unter Verwendung jenes Äquivalenzprinzips, eine beschleunigungsrelative Elektrodynamik aus der bekannten Coulombschen Elektrostatik zu gewinnen, so wie Einstein eine Gravitationsdynamik mit Hilfe seines Äquivalenzprinzips aus der bis dahin allein bekannten Gravitationsstatik deduzierte. Die solcherweise gewonnene Elektrodynamik müsste selbstverständlich mit der alten Maxwellschen Elektrodynamik verglichen werden. Mit einiger Wahrscheinlichkeit wäre die neue Elektrodynamik aber nicht identisch mit der alten, da letztere ein Elektronen-

Äquivalenzprinzip nicht kennt. In der Maxwellschen Elektrodynamik ist das Elektron ein Fremdkörper insofern, als jene Kontinuumstheorie keinen Hinweis auf eine atomistische Konstitution der Elektrizität zu geben vermag. Die Lorentzsche Theorie inkorporierte das Elektron zwar, aber nur in einer phänomenologischen Weise. Es müsste sich jedenfalls eine neue Elektrodynamik einstellen, die dem Bohrschen Atommodell und dem Korrespondenzgedanken zu spielt, wie bereits erörtert. Schließlich müsste eine Verschärfung des Korrespondenzprinzips eben so erfolgen, wie bei Heisenberg geschehen, aber eben auf der Basis der beschleunigungsrelativen Elektrodynamik, um so zu einer Matrizenmechanik periodischer Vorgänge zu kommen. Man erkennt jetzt im Nachhinein auch die Ursache für den Erfolg des Elektronen-Äquivalenzprinzips in seiner Anwendung auf den Zeeman-Effekt: Es war dies die *Periodizität* der mit diesem Prinzip zusammenhängenden Präzessionsbewegung, welche einen denkbar einfachen Schluss auf die Größe der Frequenzverschiebung zuließ.

Kenner der Allgemeinen Relativitätstheorie betonen manchmal die Hinfälligkeit des Energiebegriffs in jeder beschleunigungsrelativen Theorie, die nach dem Vorbild von Einsteins Gravitationstheorie aufgebaut ist, da Einstein den Kraftbegriff Newtons geometrisiert und damit im Grunde eliminiert habe, wohingegen die potentielle Energie aber auf den Kraftbegriff angewiesen sei.¹¹ Diese Forscher weisen darauf hin, dass der Energiebegriff jedoch von zentraler Bedeutung für die Quantentheorie sei, denn die diskreten Energiezustände des Atoms seien ein wesentlicher Baustein der Quantenmechanik. Dem ist entgegenzuhalten, dass die Energieterme für die experimentierenden Spektroskopiker nur über einen Umweg, nämlich vermittelt der Bohrschen Frequenzbedingung $\omega = \frac{\Delta E}{\hbar}$, von Bedeutung sind, denn direkt beobachtbar sind in der Spektroskopie nur Frequenzen und Intensitäten. Jetzt ist es aber so, dass zur Deutung des Zeeman-Effektes, das heißt der Aufspaltung bzw. Verschiebung der Spektrallinien durch von außen angelegte Magnetfelder, die in klassischen Vorstellungen berechneten Frequenzverschiebungen identisch sind mit den quantenmechanisch vorhergesagten, weil die Plancksche Konstante als *Proportionalitätsfaktor* in dem Ausdruck für die zugehörigen Energieverschiebungen $\Delta E_{Zeeman} = \pm \hbar \cdot \Omega_{Larmor}$ eingeht. In der Frequenzbedingung von Bohr kürzt sich dann das Plancksche \hbar genau wieder heraus. Kurz, eine allgemein-relativistische Theorie des Zeeman-Effektes hätte mit der erwähnten Energie-Problematik gar nicht zu kämpfen.

¹¹So zum Beispiel H.-H. von Borzeskowsky in seinem Vortrag „Gravitation und Quanten: Vom Hubble- Radius zur Planck- Skala“ im Rahmen der Berliner „Langen Nacht der Wissenschaften“ (Technische Universität Berlin, 9. Juni 2007).

7.3 Ansätze einer diskreten Quantenzahl-Kinematik

Ein methodisch sauberer Aufbau jeder Kinematik hat an bewegten Vorgängen anzusetzen, denn Bewegung ist der methodisch primäre, Zeit der methodisch sekundäre Begriff. Da in der Quantenphysik das Korrespondenzprinzip als einziger Nexus zwischen einem anschaulichen kinematischen Modell und einem quantenhaften, also diskreten Atomverhalten zur Verfügung steht, ist eine Kinematik geschlossener Bewegungsformen erforderlich. Als einfachste Möglichkeit lässt sich eine Kreiskinematik denken. Diese Variante des Aufbaus einer geeigneten Quanten-Kinematik wird durch den Zeeman-Effekt gestützt. Die Kinematik des Zeeman-Effektes hatte sich nämlich als eine im Kern kreiskinematische Angelegenheit entpuppt. Wenn Bewegung der methodisch voraufgehende Begriff ist, sollte man bei dem Begriff „Kreise mit Geschwindigkeit“ beginnen. Denn ein und derselbe Kreis, ausgestattet mit verschiedenen Umlaufgeschwindigkeiten, ist der Prototyp der Fourierentwicklung: Dem Fourier-Grundton ω entspricht die zu Grunde gelegte Geschwindigkeit, den Oberschwingungen („Obertönen“) $2 \cdot \omega$, $3 \cdot \omega$, $4 \cdot \omega$, ... entsprechen doppelte, dreifache, ... Umlaufgeschwindigkeiten.

Offenbar entspricht eine Kreiskinematik sowohl dem Prinzip der methodischen Ordnung, als auch den Erfordernissen des Korrespondenzprinzips. Das Korrespondenzprinzip überträgt nun die τ -te klassische Oberschwingung auf den Quantensprung von der Quantenzahl n in den tieferen Zustand $n - \tau$. Die einfachsten Beispiele für eine matrizenmechanische Behandlung sind der harmonische Oszillator, der Rotator sowie der anharmonische Oszillator. Bei allen diesen quantenphysikalischen Systemen führt der umgedeutete Thomas-Kuhnsche Summensatz auf Rekursionsgleichungen für die Intensitätsamplituden, wobei der Rekursionsparameter die Quantenzahl n ist. Ein Vergleich mit dem klassischen Bewegungsproblem fördert eine verblüffende Vermutung zu Tage: Eine klassische Bewegungsgleichung ist eine Differentialgleichung der Lage in der „äußeren“, das heißt mit einer Uhr gemessenen Zeit t . In der Quantenmechanik stationärer Zustände ist die Zeit marginalisiert; ihre Rolle, zumindest vom mathematischen Standpunkt, hat die Quantenzahl n übernommen! Diese Analogie wird durch die Tatsache erhärtet, dass jede Rekursionsbeziehung in eine Differenzgleichung umgeschrieben werden kann. Es soll das denkbar einfachste Beispiel unter dieser neuen Perspektive betrachtet werden. Zugegebenermaßen ist die Betonung des Summensatzes als Rekursionsgleichung nicht neu; sie findet sich bereits in der Arbeit von Reiche und Thomas.¹² Das Vorgehen von Reiche und Thomas geriet wohl aufgrund der kurz danach einsetzenden stürmischen

¹²Siehe [Reiche/Thomas 1925].

Entwicklung der Quantenmechanik in Vergessenheit, da man sich nun darum bemühte, die Summensätze als quantenkinematische Aussagen den Bewegungsgleichungen der klassischen Mechanik hinzuzufügen, anstatt ihren eigenständigen Charakter zu bewahren. Die beiden Autoren betrachten auf den Seiten 519 und 520 den Summensatz für den harmonischen Oszillator, der sich, unter Vernachlässigung der Proportionalitätsfaktoren, in den Heisenbergschen Intensitätsamplituden schreiben lässt als Rekursionsbeziehung¹³

$$a(n, n+1) - a(n, n-1) = 1. \quad (7.1)$$

Unter Benutzung der Symmetrie von Absorptions- und Emissionsstärke, das heißt von $a(n, n+1) = a(n+1, n)$ wird daraus

$$a(n+1, n) - a(n, n-1) = 1. \quad (7.2)$$

In Abwandlung der weiteren Rechnung von Reiche und Thomas werde eine diskrete Hilfsfunktion $g(n)$ eingeführt durch die Festlegung $g(n) = a(n, n-1)$; dann wird aus dem Summensatz eine Differenzgleichung für die Funktion $g(n)$, und zwar

$$\Delta g(n) (:= g(n+1) - g(n)) = 1. \quad (7.3)$$

Die Differenzenrechnung zeigt, dass sich diese Differenzgleichung für die Funktion $g(n)$, analog zur Integration $\int \dots dt$ in der Differentialrechnung, durch die Summenoperation Σ lösen lässt, und es ergibt sich daher $g(n)$ als lineare Funktion der Quantenzahl n :

$$g(n) = n + n_0. \quad (7.4)$$

Daraus folgt für die Intensitätsamplituden des harmonischen Oszillators schließlich

$$a(n, n-1) \sim n + n_0, \quad (7.5)$$

¹³Aus korrespondenzmäßigen Gründen treten beim harmonischen Oszillator nur solche Emissionen und Absorptionen auf, bei denen sich die Quantenzahl n um 1 ändert; deshalb ist im Summensatz der jeweils einzige Summand derjenige mit dem Summationsindex $\tau = 1$.

welches Ergebnis mit den Resultaten der Quantenmechanik selbstverständlich genau übereinstimmt. Es ist jedoch hier, im Unterschied zu Reiche und Thomas wie im Unterschied zur Quantenmechanik, ein Perspektivwechsel vollzogen: Der Summensatz selbst wird zu einer Differenzgleichung der Quantenkinematik umgedeutet, in der die Differentialquotienten $\frac{d}{dt}$ systematisch ersetzt sind durch die Differenzenoperation Δ , und die Lösung des Newtonschen Bewegungsproblems mittels Integration in die Lösung des Leibnizschen Bewegungsproblems mittels Summation transformiert ist.

Damit wäre folgendes Bild gewonnen: In der Klassik wird der Bewegungsvorgang eines mechanischen Systems beschrieben durch eine Differentialgleichung in der kontinuierlichen „äußeren“ Zeit t . In der Quantenmechanik dagegen ist das - rein relational aufzufassende - „Bewegungsgesetz“ für die Intensitätsamplituden $a(n, m)$, und zwar der quantentheoretisch umgedeutete Summensatz, eine Differenzgleichung in der Quantenzahl n . Die klassische Bewegung ist eine stetige Änderung der Lage während der kontinuierlich vorrückenden Zeit t ; dagegen sind die quantentheoretischen Übergänge und die mit ihnen verbundene „Lichtkinematik“ unstetig in der diskontinuierlich veränderlichen Quantenzahl n .

Die nach der vorgetragenen Idee aufzubauende Quantenzahl-Kinematik könnte in der Metapher eines Schachspiels demonstriert gemacht werden. Während die Newtonsche Raum-Zeit-Lehre sich vorzugsweise für den stetigen raum-zeitlichen Übergang, das heißt für die gezogene Spur einer Schachfigur von einem Feld des Spielbretts zu einem anderen interessiert, kommt es beim „Leibniz-Schach“ lediglich auf die Durchnummerierung der Felder an, auf denen die Figur „nacheinander“ gestanden hat. Das Nacheinander ist zunächst nur im Sinne einer Nummerierungsreihenfolge der vorgenommenen Spielzüge zu verstehen, keineswegs im Sinne einer neben dem Spielbrett stehenden Schachuhr. Eine Modellierung der physikalischen Situation der Emission von diskreten Spektrallinien (unter Berücksichtigung von Helligkeit und Frequenz) wäre in einem dreidimensionalen Spielbrett gegeben, das auf den Feldern zunächst die Farben anordnet, während zu jeder Farbe noch die möglichen Helligkeitsstufen angezeigt werden können. Der Vorgang der Lichtemission würde in diesem Spielbrett als ein Aufleuchten von Farben verschiedener Helligkeit modelliert werden. Die faktische Räumlichkeit dieses Spielbretts wäre eine Redundanz desselben, denn es käme ja nur auf eine Unterscheidbarkeit der Farben und Helligkeiten an, nicht auf die räumliche Lage der entsprechenden Lämpchen, die aufleuchten, während das „Agens“ der Atomkinematik (im Modell: der Spielstein) von Position zu Position springt.

In dieser Beschreibungsweise wäre jede Möglichkeit der Rückkehr zur Newtonschen Dynamik abgeschnitten, was den heilsamen Effekt mit sich führen würde, dass kein Anlass mehr gegeben wäre, die klassischen Raum-Zeit-Konzepte einzuschränken: Der strikte Leibnizsche relationale Standpunkt würde von vornherein vor dieser Gefahr bewahren. Freilich wäre von dem Physiker ein abstrakteres Verständnis von Anschaulichkeit gefordert, oder besser gesagt: Die Rede von einer relationalen Kinematik von „Kreisen mit Geschwindigkeit“ implizierte die Einführung einer graduellen Anschaulichkeit. Denn weder Kreise als Spuren noch auf Kreisen umlaufende Körper wären das Primäre, sondern die Geschwindigkeitsbeziehungen *zwischen* den Kreisen.

Eine zentrale Frage dieses Vorschlags wäre, wie der Begriff der Beschleunigung in das Schema der Quantenzahl-Kinematik eingearbeitet werden könnte. Wenn Geschwindigkeit das Primäre an der Bewegung ist, und wenn die Beschleunigung als „Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit“ definiert ist, dann muss sich ein Konflikt der Quantenzahl-Kinematik, in welcher der Begriff der Zeit marginalisiert ist, mit der gewöhnlichen Kinematik einstellen. Eine Andeutung zur Lösung des Problems könnte dadurch gegeben sein, dass eine Geschwindigkeitsänderung ohne Uhr nur durch Bezugnahme auf einen anderen Bewegungsvorgang erfolgen kann, welcher als gleichförmig angesehen wird. Eine beschleunigte Bewegung wäre dann daran zu erkennen, dass die beiden Geschwindigkeiten kein konstantes Übersetzungsverhältnis haben. Ein nicht-konstantes Geschwindigkeitsverhältnis müsste demzufolge von der Einführung einer weiteren Quantenzahl m begleitet sein, da konstante Geschwindigkeitsverhältnisse in der Kinematik der Kreise mit Geschwindigkeit lediglich auf „Obertöne“ führen. Könnte das Problem der Beschleunigung in der Quantenzahl-Kinematik gelöst werden, so ergäbe sich eine Alternative zu den Ansätzen der Loop-Quantengravitation, denn die Kinematik der Quantenzahlen würde sich von selbst den Erfordernissen des wichtigsten Teils der Quantenmechanik, der Berechnung stationärer Energiezustände, anpassen, und methodischer Kritik offen stehende Spekulationen über eine kleinste „Planck-Zeit“ könnten sich erübrigen.

Es könnte eine den Anforderungen der methodischen Philosophie genügende Prototheorie der Quantenphysik auf der relationalen Kinematik von „Kreisen mit Geschwindigkeit“ errichtet werden. Jene erst noch zu bauende Prototheorie der Quantenphysik erhielte dadurch ein zumindest teilweise anschauliches Fundament, indem sie auf einem Modell mit partieller Anschaulichkeit fußte.

Schluss

Ernst Cassirer hat in seinem Buch „Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik“ die Auffassung vertreten, dass die Quantenmechanik eine Krise der Anschauung erzeugt habe, genauer, dass wir „die Kausalität nicht mehr in derselben Weise wie in der klassischen Physik mit der Raum- Zeitbeschreibung verbinden ... können“, wobei er die Kausalität als die Aufforderung an den Naturforscher fasste, jederzeit die Gesetzlichkeit des Geschehens darzutun.¹⁴ Im Vokabular von Kants Kritik der reinen Vernunft gesprochen, lautete Cassirers These, dass es die Quantentheorie nicht mehr gestatte, den Kausalbegriff in Raum und Zeit zu schematisieren. Oder wieder anders formuliert: Die Quantenphänomene erlaubten keine vollständige naturgesetzliche Darstellung in Raum und Zeit mehr.

Im vorliegenden Versuch sollte die Anschauung in der modernen Physik rehabilitiert werden, indem als erstes nachzuweisen war, dass die Theoriebildung der Quantenmechanik ohne bildhafte Vorstellungen nicht hätte gelingen können. Heisenberg kam bei der Aufstellung der Quantenmechanik nicht ohne ein Bild aus, selbst wenn es sich nur um ein Ersatzbild handelte, das der virtuellen Oszillatoren, die für die quantenhafte Ausstrahlung von Licht, in größtmöglicher Anlehnung an die klassische Strahlungstheorie, verantwortlich sein sollten. Die Analyse von Heisenbergs Lichtmaschine, der Gesamtheit der virtuellen Oszillatoren eines Atomsystems, ergab, dass Heisenberg kein anderes Mittel besaß, um eine Quantenmechanik aufzubauen, als tradierte, bewährte Vorstellungen von der atomaren Lichtentstehung so schonend wie möglich abzuändern. Auch der Physiker kann kulturellen Bedingungen nicht entinnen.

Diese Arbeit war ferner von dem Bestreben geprägt, dem Relationalismus von Leibniz seinen Platz in der modernen Physik zuzuweisen, und die von Cassirer behauptete Krise der Anschauung in der Quantenmechanik auf ihre Gültigkeit hin zu prüfen. Heisenbergs Deutung der

¹⁴[Cassirer 1937], S. 315- 316.

Vertauschungsbeziehung führte zu einer Einschränkung der klassischen geometrischen und kinematischen Größen und dadurch auch zu einer Begrenzung der die klassische physikalische Gesetzlichkeit tragenden Begrifflichkeit. Es stellte sich heraus, dass eine Krise der Anschauung in diesem Sinne zumindest für die Heisenbergsche Quantenmechanik nicht besteht, sofern man zweierlei beachtet.

Erstens, die Kritik von Leibniz an den Newtonschen Konzepten von Raum und Zeit ist ernst zu nehmen. Das heißt bezogen auf die Quantenmechanik, dass von Spuren von Mikroobjekten im allgemeinen nicht zu sprechen ist, sondern von topologisch-kombinatorischen Beziehungen zwischen Elementen des Beobachtbaren, im Falle der Atomspektren von den Beziehungen zwischen Lichtintensitäten und Lichtfrequenzen. Erst der Rückfall in die Newtonsche nicht-relationale Denkweise, welcher dem Erfolg der zeitabhängigen Schrödingerschen Wellenmechanik bei der Beschreibung aperiodisch-translatorischer Vorgänge geschuldet war, erzeugt im Newtonschen Containerraum eine Krise der Anschauung. Daher ist in einem zweiten Schritt die Anschaulichkeit zu befreien von ihrer starren Bindung an traditionell Newtonsche Vorstellungen von Raum und Zeit. Vielmehr wird eine freiere Auffassung von Anschaulichkeit vertreten, bei der, abhängig von der vorausgesetzten Perspektive, von verschiedenen Formen und Graden der Anschaulichkeit gesprochen werden darf, in Reminiszenz an den universellen Relationalismus von Leibniz. Anton Zeilinger stellt bei der Analyse der Lokalitätsannahme in der Quantenphysik ebenfalls das herkömmliche Verständnis von räumlicher Trennung zur Disposition. Um einer instantanen Ausbreitungsgeschwindigkeit sogenannter Quantenkorrelationen zu entgehen, könnte man, so Zeilinger, auf die Idee kommen, „dass irgendetwas an unserer Vorstellung von räumlicher Trennung falsch ist“. Zwei Orte, die im metrischen Sinne getrennt erscheinen, wären für Quantensysteme unter Umständen nicht getrennt.¹⁵

Möchte man den Leibnizschen Relationalismus nicht dermaßen strikt auslegen, dass die Rede von raum-zeitlichen Interphänomenen prinzipiell verboten sein soll, dann flammt allerdings eine Krise der Anschauung für die Interphänomene in Gestalt der Bilder-Dualität von Wellen- und Teilchenbild wieder auf. Das Starkmachen einer Rede von Modellen „für etwas“ implizierte, hinsichtlich der Reichenbachschen Bilder-Dualität die Kultur- und Bildwissenschaften auf den Plan zu rufen, da nachgewiesen werden konnte, dass unter der Prämisse des vorangestellten Modellbegriffs jener Dualismus kein Gegenstand der Fachwissenschaft Physik mehr sein dürfte. Leider musste diese Arbeit sich mit dem Nachweis begnügen, dass diese Form

¹⁵Siehe [Zeilinger 2005].

der Anschauungskrise nicht von der Quantenphysik allein mit physikalischen Methoden gelöst werden kann. Eine Ikonologie wie auch eine Handlungstheorie der Mikrophysik konnte nicht mehr begonnen werden, so dass beide eine Aufgabe für zukünftige Forschungen bleiben. Es konnten nur Bruchstücke einer Prototheorie der Quantenphysik identifiziert werden, und zwar die Forderungen der Lichtmengekonstanz und der Konstanz der spezifischen Ladung des Elektrons. Jene beiden Forderungen sind durch keine Quantentheorie hintergebar, da sie erst die Grundlage abgeben für eine experimentelle Erforschung der Gesetzmäßigkeiten der Quanten.

Der Relationalismus hatte als eine zusätzliche Ausprägung die Forderung der Beschleunigungsrelativität physikalischer Theorien. Es konnte nur angerissen werden, auf welchem Wege man zu einer rechenbaren Umsetzung dieser erkenntnistheoretischen Forderung für die Atomphysik gelangen dürfte. Immerhin lieferte Sommerfelds Deutung des Zeeman-Effektes eine Stütze für die Fruchtbarkeit des eingeschlagenen Weges. Schließlich ergab die relationale Perspektive auf die Quantenmechanik erste Anhaltspunkte für eine diskrete Kinematik. Zur Entfaltung käme die vorgeschlagene Quantenzahl-Kinematik beziehungsweise die Kinematik von „Kreisen mit Geschwindigkeit“ allerdings erst, wenn das Prinzip der Beschleunigungsrelativität in ihr integriert werden könnte. Dann jedoch stellte sie einen vorzüglichen Schlüssel dar, der die Tür zu einer relationalen Quantenmechanik öffnete und eine echte Alternative zu den aktuellen Bemühungen der Quantengravitation böte. Zudem hätte die vorgeschlagene Kinematik den Vorzug, nicht einer prinzipiellen Unanschaulichkeit der Quantenmechanik das Wort reden zu müssen, indem die Kinematik von „Kreisen mit Geschwindigkeit“ eine abgestufte Anschaulichkeit implizierte.

Es gibt keine Wissenschaftlichkeit jenseits des argumentativ Einholbaren, obwohl es Formen außersprachlichen Erkennens gibt. Ein Erkennen als Handeln wird von Peter Janich und dem Methodischen Kulturalismus verteidigt.¹⁶ Das Kriterium zur Beurteilung eines Erkennens durch Tun ist der Erfolg. Horst Bredekamp legt ein Erkennen als Zeichnen in die Waagschale, wenn er über den Erkenntnisprozess in Galileis Mondzeichnungen sagt: „Galileo Galilei hat gemalt und während des Malvorganges das Gesehene erkannt und das Erkannte bestärkt.“¹⁷ Welches Geltungskriterium hat ein Erkennen durch Zeichnen? Dies ist eine schwierige Frage, die der vorliegende Versuch nur tangieren konnte, indem er nachwies, dass es in der Quantenphysik zu einem Widerstreit von Bildern kommt, der nur vom Menschen als erkennendem

¹⁶Vgl. den Titel von [Janich 1992].

¹⁷Interview mit H. Bredekamp in Welt online vom 22. 07. 2007.

Subjekt aufgelöst werden könnte. Da sich beide Erkenntnisformen, das Erkennen als Handeln und das Erkennen als Zeichnen, nicht mehr auf dem Territorium der Sprache bewegen, sind es Erkenntnisformen an den Grenzen des sprachlich Darstellbaren. Dies machte es schwierig, für oder gegen sie Position zu beziehen, dafür umso lohnenswerter, sich mit ihnen auseinanderzusetzen.

8 Literaturverzeichnis

- [Bell 1966] Bell, J. S.: „On the problem of hidden variables in quantum mechanics“, Rev. Mod. Physics 38, 447- 452 (1966)
- [Boehm 1994] Was ist ein Bild? (Hrsg. G. Boehm), München 1994
- [Bohr 1923] Bohr, N.: „Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. I. Die Grundpostulate der Quantentheorie“, Z. Physik 13, 117- 165 (1923)
- [Bohr 1924] Bohr, N.: „Zur Polarisierung des Fluoreszenzlichtes“, Naturwiss. 12, 1115- 1117 (1924)
- [Bohr/Kramers/Slater 1924] Bohr, Kramers und Slater: „Über die Quantentheorie der Strahlung“, Z. Physik 24, 69- 87 (1924)
- [Bohr 1928] Bohr, N.: „Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik“, Naturwiss. 16, 245- 257 (1928)
- [Boltzmann 1891] Boltzmann, L.: Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes, 2 Teile, Leipzig 1891, 1893
- [Born 1926] Born, M.: Probleme der Atomdynamik : dreissig Vorlesungen, gehalten im Wintersemester 1925/26 am Massachusetts Institute of Technology, Berlin 1926
- [Born/Jordan 1925] Born, M. und Jordan, P.: „Zur Quantenmechanik“, Z. Physik 34, 858- 888 (1925)
- [Born/Jordan 1930] Born/ Jordan: Elementare Quantenmechanik, Berlin 1930
- [Bredekamp 2002] Bredekamp, H.: „Die Erkenntniskraft der Linie bei Galilei, Hobbes und Hooke“, in: Re-Visionen. Zur Aktualität von Kunstgeschichte (Hrsg. B. Hüttel, R. Hüttel u. J. Kohl), Berlin 2002, S. 145- 160

- [Bredekamp 2004] Bredekamp, H.: Die Fenster der Monade. Gottfried Wilhelm Leibniz' Theater der Natur und Kunst, Berlin 2004
- [Bredekamp 2005] Bredekamp, H.: Darwins Korallen. Frühe Evolutionsmodelle und die Tradition der Naturgeschichte, Berlin 2005
- [Bredekamp 2006] Bredekamp, H. und P. Schneider (Hrsg.): Visuelle Argumentationen: die Mysterien der Repräsentation und die Berechenbarkeit der Welt, München 2006 (Reihe Kulturtechnik)
- [De Broglie 1927] De Broglie, L.: Untersuchungen zur Quantentheorie (übersetzt von W. Becker), Leipzig 1927
- [Buchwald 1923] Buchwald, E.: Das Korrespondenzprinzip, Braunschweig 1923 (Sammlung Vieweg, Heft 67)
- [Büchel 1965] Büchel, W.: Philosophische Probleme der Physik, Freiburg (usw.) 1965
- [Büchel 1967] Büchel, W.: „Ein quantenphysikalisches Paradoxon“, Physikal. Blätter 23, 162- 165 (1967)
- [Cassirer 1902] Cassirer, E.: Leibniz' System in seinen wissenschaftlichen Grundlagen, Marburg 1902
- [Cassirer 2002] Cassirer, E.: Philosophie der symbolischen Formen. Teil 2. Das mythische Denken, Hamburg 2002 (Ges. Werke Bd. 12, hrsg. v. B. Recki) (Hamburger Ausgabe)
- [Cassirer 1937] Cassirer, E.: Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik (Erstdruck 1937), in: ders., Zur modernen Physik, Darmstadt 1964, S. 127 ff.
- [Cassirer 1985] Cassirer, E.: Symbol, Technik, Sprache. Aufsätze aus den Jahren 1927- 1933 (Hrsg. E. W. Orth und J. M. Krois), Hamburg 1985
- [Cayley 1859] Cayley, A.: „A Sixth Memoir on Quantics“ (1859), Collected math. works, II, S. 561- 592
- [Dorgelo 1925] Dorgelo, H.B.: „Die photographische Spektralphotometrie“, Physikal. Z. 26, 756- 794 (1925)
- [Dorn-Bader 1977] Dorn-Bader: Physik-Oberstufe Band A (Hrsg. F. Dorn und F. Bader), Hannover 1977

- [Einstein 1913] Einstein, A.: „Zum gegenwärtigen Stand des Gravitationsproblems“, Phys. Zeitschr. 14, 1249- 1266 (1913)
- [Einstein 1918] Einstein, A.: „Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie“, Naturwiss. 6, 697- 702 (1918)
- [von Engelhardt 1947] von Engelhardt, W.: „Leibniz als Naturforscher“ Naturwiss. 34, 97-104 (1947)
- [Falkenburg 2007] Falkenburg, B.: Particle metaphysics: a critical account of subatomic reality, Berlin (usw.) 2007
- [Faraday 1891] Faraday, M.: Experimental- Untersuchungen über Elektrizität, dt. von S. Kallischer, Bde. 1 und 3, Berlin 1891
- [Faraday's Diary] Faraday, M.: Faraday's Diary, Vol. I (Sept., 1820- June 11, 1832) und IV (Nov. 12, 1839- June 26, 1847), hrsg. von Th. Martin, London 1932 und 1933
- [Frank 1928] Frank, Philipp: „Über die ‚Anschaulichkeit‘ physikalischer Theorien“, Naturwiss. 16, 121- 128 (1928)
- [Gauß 1827] Gauß, C. F.: Allgemeine Flächentheorie (Disquisitiones generales circa superficies curvas; 1827), deutsch hrsg. von A. Wangerin, Leipzig (Ostwald's Klassiker; Nr. 5)
- [Gerthsen/Pollermann 1971] Gerthsen/ Pollermann: Einführung in das Physikalische Praktikum für Mediziner und für das Anfängerpraktikum, 6. Aufl. Berlin (usw.) 1971
- [Graßmann 1847] Graßmann, H.: Geometrische Analyse, geknüpft an die von Leibniz erfundene Geometrische Charakteristik, Leipzig 1847
- [Haas 1914] Haas, A. E.: Die Grundgleichungen der Mechanik, dargestellt auf Grund ihrer geschichtlichen Entwicklung, Leipzig 1914
- [Heisenberg 1925a] Heisenberg, W.: „Über eine Anwendung des Korrespondenzprinzips auf die Frage nach der Polarisation des Fluoreszenzlichtes“, Z. Physik 31, 617- 626 (1925)
- [Heisenberg 1925b] Heisenberg, W.: „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“, Z. Physik 33, 879- 893 (1925)

- [Heisenberg 1927] Heisenberg, W.: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, Z. Physik 43, 172- 198 (1927)
- [Heisenberg 1929a] Heisenberg, W.: „Die Entwicklung der Quantentheorie 1918- 1928“, Naturwiss. 17, 490- 496 (1929)
- [Heisenberg 1929b] Heisenberg, W.: Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, Leipzig 1930
- [Heisenberg 1931] Heisenberg, W.: „Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik“, Monatshefte für Mathematik u. Physik 38, 365- 372 (1931)
- [Heisenberg 1936] Heisenberg, W.: „Prinzipielle Fragen der modernen Physik“; W. Heisenberg, Gesammelte Werke (Hrsg. W. Blum, H.-P. Dürr u. H. Rechenberg), Abt. C, Bd. 1 (Physik und Erkenntnis 1927- 1955), S. 108- 119
- [Heisenberg 1973] Heisenberg, W.: Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik, München 1973
- [Hermann 1935] Hermann, G.: „Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik“(Auszug aus Abh. d. Fries. Schule 6, 75- 152 (1935)), Naturwiss. 42, 718- 721 (1935)
- [Hertz 1894] Hertz, H.: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt: Einleitung (1894), hrsg. v. J. Kuczera, Leipzig 1984 (Ostwald’s Klassiker; Nr. 263)
- [Hilbert 1899] Hilbert, D.: Grundlagen der Geometrie, Leipzig 1899
- [Janich 1982] Janich, P.: „Was messen Uhren?“, alma mater philippina 1982, 12- 14
- [Janich 1982a] Janich, P.: „Newtons Trägheitsmechanik ohne Definitionslücken“, Studia Leibnitiana Supplementa 22, 1-7 (1982)
- [Janich 1992] Janich, P.: Grenzen der Naturwissenschaft: Erkennen als Handeln, München 1992
- [Janich 1996] Janich, P.: Was ist Wahrheit?: eine philosophische Einführung, München 1996
- [Janich 1997] Janich, P.: Das Maß der Dinge. Protophysik von Raum, Zeit und Materie, Frankfurt 1997
- [Janich 1998] Die Kulturalistische Wende. Zur Orientierung des philosophischen Selbstverständnisses (Hrsg. P. Janich und D. Hartmann), Frankfurt 1998

- [Janich 2001] Janich, P.: „Die Begründung der Geometrie aus der Poiesis“, Sitz.ber. d. Wiss. Ges. an der Johann Wolfgang Goethe- Universität Frankfurt a. M. 39, 27- 68 (2001)
- [Kamlah 1997] Kamlah, A.: „Anschauliches und symbolisches Denken“, in: Sprache und Denken. Language of Thought, Berlin/ New York 1997, S. 325- 369
- [Kamlah 2002] Kamlah, A.: Der Griff der Sprache nach der Natur: eine Semantik der klassischen Physik, Paderborn 2002
- [Klein 1872] Klein, F.: Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen, Erlangen 1872
- [Klein 1898] Klein, F.: Theoretische Mechanik. Vorlesungsskript von Heinrich Liebmann. 2 Bände. Göttingen 1897/98
- [Klein 1925] Klein, F.: Elementarmathematik vom höheren Standpunkte aus. Band 2, Geometrie (ausgearb. von E. Hellinger), 3. Auflage, Berlin 1925
- [Klein 1927] Klein, F.: Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert, Teil I (Berlin, 1926) und Teil II: Die Grundbegriffe der Invariantentheorie und ihr Eindringen in die mathematische Physik (Berlin 1927)
- [Kneser 1927] Kneser, A.: Das Prinzip der kleinsten Wirkung von Leibniz bis zur Gegenwart, Leipzig und Berlin 1928
- [Kronig 1960] Kronig, Ralph: „The Turning Point“, in: Theoretical Physics in the Twentieth Century. A Memorial Volume to Wolfgang Pauli (Hrsg. M. Fierz und V.F. Weisskopf), New York 1960, S. 5- 39
- [Lacki 2002] Lacki, J.: „Observability, Anschaulichkeit and Abstraction: A Journey into Werner Heisenberg’s Science and Philosophy“ Fortschr. d. Physik 50, 440- 458 (2002)
- [Ladenburg 1921] Ladenburg, R.: „Die quantentheoretische Deutung der Zahl der Dispersionsselektronen“, Z. Physik 4, 451- 468 (1921)
- [Lagrange 1887] Lagrange, J. L.: *Mécanique analytique* (deutsch von H. Servus), Berlin 1887
- [Lambert 1760] Lambert, J. H.: *Photometrie* (1760), deutsch von E. Anding, Leipzig 1892 (Ostwald’s Klassiker; Nr. 31)
- [Landé 1926] Landé, A.: „Neue Wege der Quantentheorie“, Naturwiss. 14, 455- 458 (1926)

- [Larmor 1900] Larmor, J.: Aether and matter, Cambridge 1900
- [Leibniz 1904] Leibniz, G. W.: Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Übers. von A. Buchenau; durchges. und mit Einl. und Erl. hrsg. von Ernst Cassirer, Bd. 1, Leipzig 1904
- [Leibniz 1951] Leibniz, G. W.: Schöpferische Vernunft. Schriften aus den Jahren 1668- 1686 (Hg. W. von Engelhardt), Marburg 1951
- [Lorentz 1892] Lorentz, H. A.: „La théorie electromagnetique de Maxwell et son application aux corps mouvants“, in: H.A. Lorentz, Collected papers, Vol. II, The Hague 1936, S. 164- 343
- [Lorentz 1928] Lorentz, H. A.: Vorlesungen über theoretische Physik an der Univ. Leiden, Bd. III. Aethertheorien und Aethermodelle, Leipzig 1928
- [Ludwig 1964] Ludwig, G.: „Versuch einer axiomatischen Grundlegung der Quantenmechanik und allgemeinerer physikalischer Theorien“, Z. Physik 181, 233- 260 (1964)
- [Maar/Burda 2004] Iconic turn. Die neue Macht der Bilder (Hrsg. Chr. Maar und H. Burda), Köln 2004
- [Mach 1909] Mach, E.: Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit, Leipzig 1909
- [Mach 1921] Mach, E.: Die Prinzipien der physikalischen Optik, Leipzig 1921
- [Maxwell 1861] Maxwell, J. C.: Über physikalische Kraftlinien, dt. von L. Boltzmann, (2., repr. Nachdr. d. Ausg. Leipzig 1898), Darmstadt 1986 (Ostwald's Klassiker; Nr. 102)
- [Maxwell 1883] Maxwell, J. C.: Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus, dt. von B. Weinstein, Band 2, Berlin 1883
- [Minding 1839] Minding, F.: „Wie sich entscheiden läßt, ob zwei gegebene krumme Flächen auf einander abwickelbar sind oder nicht; nebst Bemerkungen über die Flächen von unveränderlichem Krümmungsmaße“, J. Reine Angew. Math. 19, 370 ff. (1839)
- [Newton 1988] Newton, Isaac: Mathematische Grundlagen der Naturphilosophie. Ausgewählt, übers., eingel. u. hrsg. von E. Dellian, Hamburg 1988

- [Ornstein/ Burger] Ornstein, L. und H. Burger: „Intensitäten der Komponenten im Zeeman-effekt“, Z. Physik 28, 135- 141 (1924)
- [Pauli, Quantentheorie] Pauli, W.: „Quantentheorie“, in: Handbuch der Physik (Hrsg. H. Geiger u. K. Scheel), Bd. 23, Berlin 1926, S. 1- 278
- [Pauli 1958] Pauli, W.: „Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik“, in: Handbuch der Physik (Hrsg. S. Flügge), Bd. V, 1, Berlin 1958
- [Pauli, Briefe] Pauli, W.: „Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.“, Band 1: 1919-1929. New York, Heidelberg, Berlin (1979)
- [Peruzzi 2000] Peruzzi, G.: Maxwell: der Begründer der Elektrodynamik, Heidelberg 2000 (Spektrum der Wiss.; 2000, Biographie 2)
- [Planck 1900] Planck, M.: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“, Verhandl. Dtsch. phys. Ges. 2, 237- 245 (1900)
- [Planck 1943] Planck, M.: „Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums“, Naturwiss. 31, 153- 159 (1943)
- [Max Planck 1959] Beck, A. (Red.): Max Planck zum Gedenken. Hrsg. von der Dt. Akad. d. Wiss. zu Berlin, Berlin 1959
- [Pohl 1976] Pohl, R.W.: Optik und Atomphysik, Berlin, Heidelberg, New York 1976 (Einführung in die Physik. Dritter Band)
- [Ramsauer 1953] Ramsauer, C.: Grundversuche der Physik in historischer Darstellung. Erster Band: Von den Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen, Berlin (usw.) 1953
- [Reiche/Thomas 1925] Reiche, F. und W. Thomas: „Über die Zahl der Dispersionselektronen, die einem stationären Zustand zugeordnet sind“, Z. Physik 34, 510- 523 (1925)
- [Reichenbach 1949] Reichenbach, H.: Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik (1949), in: H. Reichenbach, Ges. Werke Band 5, Braunschweig, Wiesbaden 1989
- [Renn 2004] Renn, J.: „Die klassische Physik vom Kopf auf die Füße gestellt: Wie Einstein die Spezielle Relativitätstheorie fand“ Physik- Journal 3, 49- 55 (2004)
- [Sachs 1989] Sachs, H.: „Einige Gedanken zur Geschichte und zur Entwicklung der Graphentheorie“, Mitt. Math. Ges. Hamburg 11, Heft 6 (1989), 623- 641.

- [Scheibe 1990] Scheibe, E.: „Die Kopenhagener Schule und ihre Gegner“, in: *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze? Zur Physik und Philosophie der Quantenmechanik* (Hrsg. J. Audretsch und K. Mainzer), Mannheim (usw.) 1990, S. 157- 182
- [Schneider 1988] Schneider, Martin: „Funktion und Grundlegung der Mathesis Universalis im Leibnizschen Wissenschaftssystem“, *Studia Leibnitiana*, Sonderheft 15, Stuttgart 1988
- [Sorkin 1975] Sorkin, R.: „Time- evolution problems in Regge calculus“, *Phys. Review D* 12, 385- 396 (1975)
- [Schrödinger 1926] Schrödinger, E.: „Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung)“, *Ann. Phys.* 79, 489-527 (1926)
- [Schrödinger 1933] Schrödinger, E.: „Der Grundgedanke der Wellenmechanik“, Nobel- Vortrag, gehalten zu Stockholm am 12. Dezember 1933, Stockholm 1934
- [Smolin 2004] Smolin, L.: „Quanten der Raumzeit“, *Spektrum der Wiss.* 3, 54- 63 (2004)
- [Smolin 2005] Smolin, L.: „The case for background independence“ (25. July 2005), arXiv:hep-th/0507235v1
- [Sommerfeld 1978] Sommerfeld, A.: *Atombau und Spektrallinien*, Bde. I und II (Nachdr.), Frankfurt/M. 1978
- [Tetens 1987] Tetens, H.: *Experimentelle Erfahrung. Eine wissenschaftstheoretische Studie über die Rolle des Experiments in der Begriffs- und Theoriebildung der Physik*, Hamburg 1987 (Paradeigmata; 8)
- [Thirring 1928] Thirring, H.: „Die Grundgedanken der neueren Quantentheorie; Teil 1: Die Entwicklung bis 1926“, *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 7, 384- 431 (1928)
- [Thomas 1925] Thomas, W.: „Über die Zahl der Dispersionselektronen, die einem stationären Zustände zugeordnet sind“, *Naturwiss.* 13, 627 (1925)
- [van der Waerden 1967] van der Waerden, B. L. (Hg.): *Sources of quantum mechanics*, Amsterdam 1967
- [von Weizsäcker 1931] von Weizsäcker, C. F.: „Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop“, *Z. Physik* 70, 114- 130 (1931)

[von Weizsäcker 1941] von Weizsäcker, C. F.: „Zur Deutung der Quantenmechanik“, Z. Physik 118, 489- 509 (1941)

[Wiechert 1899] Wiechert, E.: Grundlagen der Elektrodynamik, Leipzig 1899

[Zeilinger 2005] Zeilinger, A.: Einsteins Spuk: Teleportation und andere Mysterien der Quantenphysik (aus dem Engl. von F. GRIESE), München 2005